Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Morfologisch SOBEK model Rijn-Maasmonding

Rapport

juli 2007

Q4239.00

WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Morfologisch SOBEK model Rijn-Maasmonding

dr.ir. C.J. Sloff, ir. E. Verschelling, Dipl-ing. A. Hauschild, en ing. J. Crebas

Rapport

juli 2007

WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:	Rijkswaterstaat RIZA
Titel:	Morfologisch SOBEK model Rijn-Maasmonding

Samenvatting:

Voor het simuleren van morfologische processen in het Rijn-Maasmonding gebied zal gebruik worden gemaakt van het eendimensionale model in SOBEK-River. Hiervoor is in dit project het SOBEK-River instrumentarium uitgebreid met morfologiefunctionaliteit en is de hydrodynamische schematisatie uitgebreid met zand/slib eigenschappen en morfologie. Het project heeft geleid tot een eerste versie van een morfologieinstrumentarium dat geschikt is voor het simuleren van grootschalige morfologische veranderingen (schaal minimaal enkele kilometers) en tijdschalen van enkele tientallen jaren. Omdat het instrumentarium de belangrijkste elementen bevat die de morfologische veranderingen en de bodemsamenstelling in de Rijn-Maasmonding bepalen is het vooral geschikt voor dit gebied (multi-fractie berekening van zand/slib, zwevend transport en bodemtransport, etc.). Een dergelijk instrumentarium waarbij al deze elementen zijn gekoppeld, en hun interacties kunnen worden gesimuleerd, was tot nu toe niet beschikbaar voor dit gebied.

De implementatie van morfologiefunctionaliteit is uitgevoerd met behulp van sedimenttransport en morfologieprocessen in de waterkwaliteitsmodule DelWAQ in SOBEK-River. Daarbij is eveneens een aangepaste online koppeling tussen deze module en de waterbewegingsmodule gerealiseerd. De mogelijkheden van het nieuwe systeem zijn aanzienlijke uitgebreider dan het in het verleden toegepaste SOBEK-RE modelsysteem, onder andere door combinatie van functionaliteit voor suspensief sediment, zand en slib, en meerdere sediment fracties in transport en in de bodem.

Testberekeningen zijn uitgevoerd voor de periode 1990-2000 en vergeleken met waarnemingen. Daaruit blijkt dat het model realistische simulaties levert van de toestand van het systeem (bijvoorbeeld de ligging van zand-slibovergangen) en de trends in ontwikkelingen in het systeem. Wel is het resultaat gevoelig voor de nauwkeurigheid van het stromingsmodel, de verdeling van sediment over de splitsingspunten, en de hoeveelheden en locaties van baggerwerk. De nauwkeurigheid van het instrumentarium kan nog aanzienlijk worden verbeterd door middel van een verfijning van de kalibratie van stromings- en morfologiemodule op basis van een uitgebreide set van meetgegevens.

Referenties:	Overeenkomst RI-4645A "Morfologisch SOBEK model Rijn-Maas monding"

Ver	Auteur	Datum	Opmerk.	Review	Goedkeuring
0.1	dr.ir. C.J. Sloff	20/4/2007		F. vd. Knaap	C.A. Bons
0.2	dr.ir. C.J. Sloff	06/7/2007		F. vd. Knaap	C.A. Bons

Projectnummer:	Q4239.00
Trefwoorden:	zandtransport, slibtransport, ééndimensionale modellen, morfodynamische modellen
Aantal bladzijden:	189
Classificatie:	Geen
Status:	Definitief

Samenvatting

Voor het beheer van de riviertakken in de Rijn-Maasmonding is in dit onderzoeksproject een eendimensionaal morfologisch instrumentarium ontwikkeld. Het model is bedoeld als hulpmiddel om effecten te kwantificeren, zoals effecten van de Deltawerken, effecten van zandwinning, en effecten van klimaatveranderingen. Gekozen is voor een instrument dat alle voor de morfologie relevante processen en hun onderlinge interacties inzichtelijk kan maken. Het betreft zowel de waterbeweging met het samenspel tussen getijde en rivierafvoer, als de sedimentbeweging van afzonderlijke zand- en slibfracties. Anders dan in eerdere en reeds beschikbare modellen voor dit gebied, zijn al deze processen gecombineerd in één modelsysteem op basis van het SOBEK-River modelinstrumentarium. Dit heeft geleid tot één van de meest geavanceerde eendimensionale modelsystemen voor morfologie die er op dit moment beschikbaar zijn. Het project past binnen een reeks van projecten waarbij aspecten van zwevende stof, zand en slib worden beschouwd, en waarbij het eendimensionale SOBEK-modelsysteem als belangrijkste instrument wordt gehanteerd.

Het modelinstrumentarium is geschikt voor het simuleren van grootschalige morfologische veranderingen (schaal minimaal enkele kilometers) op tijdschalen van enkele tientallen jaren. Het instrumentarium bevat de belangrijkste elementen die de morfologische veranderingen en de bodemsamenstelling in de Rijn-Maasmonding bepalen. Deze elementen hebben betrekking op interacties tussen de erosie- en sedimentatieprocessen van zand en slib, de waterbeweging en sedimentbeweging door afzonderlijke takken en over de splitsingen, en menselijke ingrepen zoals onderhoudsbaggerwerk. Combinatie van deze elementen betekent ook dat recent ontwikkelde concepten voor transport, sedimentatie en erosie van (gelijktijdig aanwezige) zand- en slibfracties zijn geïmplementeerd. Verder betekent dit dat het instrumentarium geschikt is om het tijdsafhankelijke gedrag van het riviersysteem te simuleren. Zowel de bodemligging als de sedimentsamenstelling in de rivierbodem kan met dit nieuwe instrumentarium als functie van tijd en plaats worden berekend.

De implementatie van de morfologiefunctionaliteit heeft plaatsgevonden door de bestaande waterkwaliteitsmodule DelWAQ uit te breiden met processen voor sedimenttransport, morfologie en bodemsamenstelling. Een speciaal numeriek schema is ontwikkeld voor een stabiele en robuuste oplossing. Met de DelWAQ-aanpak is het in principe mogelijk de nieuwe morfologiefunctionaliteit te combineren met andere waterkwaliteitsprocessen (zoals verspreiding van stoffen), en in de nabije toekomst ook te combineren met de tweedimensionale overstromingsmodule van SOBEK-River en andere meerdimensionale modelsystemen. Omdat het DelWAQ-instrumentarium reeds is geïntegreerd in het SOBEK-instrumentarium, kan voor de morfologiemodellen ook gebruik worden gemaakt van de bestaande user interface. De mogelijkheden van het nieuwe systeem zijn aanzienlijk uitgebreider dan het in het verleden toegepaste SOBEK-RE-modelsysteem.

Tijdens de studie zijn simulaties uitgevoerd voor het Rijn-Maasmondinggebied in de periode 1990-2000. De resultaten zijn vergeleken met de trends die Snippen et al. (2005) uit metingen hebben afgeleid. Daaruit blijkt dat het model realistische simulaties levert van de toestand van het systeem (bijvoorbeeld de ligging van zand-slibovergangen) en de trends in ontwikkelingen in het systeem. Belangrijk is het onderscheid tussen fijn en grover sediment.

Het fijne sediment wordt in suspensie via de rivieren afgevoerd en draagt vooral bij aan de morfologie van de benedenloop. Het grovere sediment wordt langs de bodem getransporteerd en is vooral van belang voor de morfologie in de bovenstroomse riviertakken. Bij de toetsing van de nieuwe DelWAQ-morfologiemodule lag de nadruk op analyse van de grootschalige ontwikkeling van elke riviertak in de periode 1990-2000, waarbij de berekende variaties binnen de riviertakken niet nader zijn beschouwd. Uit de uitkomsten van het model kan worden geconcludeerd dat met een aanvullende kalibratie het resultaat nog aanzienlijk kan verbeteren. Daarbij moet de nadruk liggen op verbetering van de stromingsberekening, de grootte van het zandtransport, de verdeling van sediment op de splitsingspunten en de grootte en locatie van het baggerwerk. Voorwaarde hiervoor is dat gebruik wordt gemaakt van een uitgebreide en volledige data-set.

Ondanks dat het model nog niet volledig is gekalibreerd en de nauwkeurigheid nog niet is vastgesteld, kan het reeds worden ingezet voor nadere analyse van de gevoeligheden in het systeem voor de geïmplementeerde elementen (bijvoorbeeld zand/slib interacties, uitwisselingsprocessen met bedding, baggerhoeveelheden, etc.). Enerzijds kan op basis van gevoeligheden worden vastgesteld welke processen maatgevend zijn bij ontwikkelingen in het systeem. Anderzijds is het mogelijk een onderlinge vergelijking te maken tussen de effecten van verschillende scenario's of ingrepen. Het ontwikkelde modelinstrumentarium is geschikt voor het simuleren van grootschalige en tijdsafhankelijke morfologische veranderingen (schaal minimaal enkele kilometers) en tijdschalen van verscheidene jaren en langer. Omdat het model eendimensionaal is, is het niet geschikt voor effecten op de schaal van de rivierbreedte (veranderingen in dwarsprofiel, etc.).

De gekozen lijn voor implementatie van morfologie via de waterkwaliteitsmodule van SOBEK-River, DelWAQ, sluit aan op het migratietraject van rivierenfunctionaliteit van het SOBEK-RE (oude versies van SOBEK) naar SOBEK-River (huidige 1D modellenlijn). Het systeem zal daardoor onderdeel worden van regulier SOBEK beheer en verdere SOBEK ontwikkeling. Door flexibiliteit van DelWAQ wordt binnen afzienbare tijd ook uitbreiding naar meerdimensionale waterbewegingsmodellen (Delft3D, Sobek-2D, etc.) verwacht. Tevens wordt de mogelijkheid reeds geboden om de morfologieberekeningen te combineren met waterkwaliteitsprocessen, eventueel via eenvoudig door de gebruiker zelf in te brengen procesbeschrijvingen.

Inhoud

1 Inleiding 1–1
1.1 Kader 1–1
1.2 Opzet 1–4
1.3 Doelstelling 1–5
1.4 Organisatie 1–6
1.5 Leeswijzer 1–6
2 SOBEK model Rijn-Maasmonding 2–1
2.1 Inleiding 2–1
2.2 Modelschematisatie 2–1
2.3 Resultaten 2–5
2.3.1 Waargenomen trends 2–5
2.3.2 Simulaties met SOBEK-River 2–6
2.3.3 SOBEK simulaties met verhoogd slibaanbod 2–9
2.3.4 SOBEK berekeningen met DelWAQ-morfologiemodule 2–13
2.3.5 Overzicht van rekenresultaten 2–15
2.4 Discussiebijeenkomst 2–16
3 Implementatie en analyse Van Rijn transportmodel (Stap 1&2) 3–1
4 DelWAQ-morfologie in SOBEK-River (Stap 3a t/m 4) 4–1
4.1 Algemeen 4–1
4.2 DelWAQ-processen 4–4
4.3 Online koppeling SOBEK-River 4–6
4.4 Numerieke aspecten 4–7
4.5 Gebruiksaspecten 4–8
5 Discussie 5–1
5.1 Betrouwbaarheid van het 1-D modelinstrumentarium 5–1
5.2 Noodzakelijke elementen 5–1
5.3 Toepasbaarheid voor beheersvragen 5–3
6 Conclusies en aanbevelingen 6–1
7 Literatuur 7–1

Bijlagen

A SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River A–1

A.1 Implementatieaspecten A–1

B Van Rijn transport model B–1

B.1 Transportmodel TR2004 ..... B–1

B.2 Implementatie Van Rijn in SOBEK-RE-morfologie module in SOBEK-River B–7

B.3 Testberekeningen B–7

C Simulaties Rijn-Maasmonding C–1

C.1 Schematisatie C–1

C.2 Simulaties Rijn-Maasmonding met uniform sediment (zand) C–3

C.3 Schematisatie voor multi-fractie aanpak C–5

C.4 Simulatieresultaten met SOBEK-RE morfologie module in SOBEK-River C–10

C.4.1 Bodemligging, 8 fracties C–10

C.4.2 Bodemsamenstelling, 8 fracties C–17

C.4.3 Bodemligging, 6 fracties, verhoogd aanbod slib C–25

C.5 Simulatieresultaten met DelWAQ-morfologiemodule in SOBEK-River C–33

C.5.1 Bodemveranderingen C–33

C.5.2 Bodemsamenstelling C–54

D Discussiebijeekomst D–1

E Ontwerp en implementatie DelWAQ-morfologie E–1

E.1 DelWAQ process library E–1

E.2 Data structures E–2

E.3 Conditions E–5

E.3.1 Boundary conditions E–5

E.3.2 Confluences E–6

E.3.3 Bifurcations E–6

E.3.4 Lateral sediment E–9

E.4 Bed-material sediment transport E–9

E.4.1 General E–9

E.4.2 Shields parameter E–9

E.4.3 Sediment-transport formula of Engelund en Hansen E–10

E.4.4 Meyer-Peter and Müller transport formula E–10

E.4.5 Van Rijn TR2004 transport formula (multi-fraction) E–12

E.4.6 User-defined formula E–12

E.4.7 Hiding and exposure E–12

E.4.8 Non-erodible layers E–13

E.5 Suspended-sediment transport E–15

E.5.1 General E–15

E.5.2 Galappatti model E–16
E.5.3 Transport of clay (Inorganic Matter processes) E–19
Sedimentation E–23
Erosion E–24
Sand-mud modelling E–24
E.5.4 Numerical solution of advection-diffusion processes E–26
E.5.5 Bed-material fluxes (numerical implementation) E–31
E.6 Bed layers E–31
E.6.1 General E–31
E.6.2 Active layer / mixing layer and exchange layer E–32
E.7 List of variables E–34
F Bed-level update in SOBEKSIM F–1
F.1 Inleiding F–1
F.2 Implementatie F–1
F.3 Output F–2
F.4 Aanpassingen in ini-, inp- en fnm-bestanden F–2
F.5 Wijzigingen in Sobeksim F–3
F.6 Toegevoegde routines F–3
F.7 Routines voor aanpassing dwarsprofielen F–4
G Numerical methods for morphology in SOBEK-River G–1
G.1 General G–1
G.2 Background of the numerical scheme G–3
G.3 Numerical scheme for DelWAQ G–5
G.4 Numerical experiments G–10

1 Inleiding

1.1 Kader

Onder invloed van zowel natuurlijke processen als menselijk ingrijpen verandert de bodemligging (morfologie) in de Rijn-Maasmonding in tijd en in ruimte. De ontwikkeling van de bodemligging is voor een groot aantal functies van de Rijn-Maasmonding van belang. Er is een directe relatie met beheerparameters als doorstroomprofiel, diepte, breedte, areaal intergetijdengebied en bodemtextuur. Daarnaast is er een indirecte relatie met de stroomsnelheden, waterstanden en zoutindringing. Omdat een deel van het sediment (vooral het slib) vervuild is, is er ook sprake van een koppeling met de waterkwaliteit, waterbodemkwaliteit en ecologie.

Voor de beheerder van de Rijn-Maasmonding (Rijkswaterstaat Zuid-Holland) is het derhalve belangrijk inzicht te verkrijgen in deze veranderingen. Daarmee kunnen eventuele problemen tijdig worden gesignaleerd, en kunnen gevolgen van eigen activiteiten en die van anderen worden beoordeeld. Verder kunnen maatregelen op de morfologische veranderingen worden afgestemd. Rijkswaterstaat Zuid-Holland heeft daarom aan RIZA opdracht gegeven tot de operationalisatie (ofwel: het in beheer en onderhoud nemen) van een eendimensionaal (1D) morfologisch model van de Rijn-Maasmonding. Met het oog op de belangrijkste beheersvragen wordt het hiervoor noodzakelijk geacht het op te leveren model geschikt te maken voor het simuleren van processen gerelateerd aan zowel zand als slib. In Figuur 1-1 zijn de belangrijkste beheersvragen gepresenteerd. In het daarna volgende tekstkader zijn deze nader toegelicht.



Figuur 1-1 Beheersvragen m.b.t. morfologie van Rijkswaterstaat Zuid-Holland (Kamsteeg, 2005)

Beheersvragen Rijkswaterstaat Zuid-Holland ten aanzien van morfologische ontwikkelingen in het Rijn-Maasmonding gebied:

lange termijn / grootschalige ontwikkelingen:
- effecten aanleg Deltawerken (nog steeds), 'kanteling' van het morfologisch systeem (verdieping Spui / Kil, verondieping Nwe Merwede / Hollandsch Diep)
- lange termijn morfologische effecten van klimaatverandering (veranderend afvoerpatroon rivieren en versnelde zeespiegelstijging)
- uitschuren Spui, Dordtse Kil en oude Maas: hoe ver gaat dit nog door en wat zou dit kunnen betekenen voor o.a. stabiliteit van oevers?
- sedimentverdeling en stabiliteit van de splitsingspunten, met het oog op de debietverdeling en daaraan gerelateerde veiligheidsvraagstukken.

korte termijn ontwikkelingen:
- morfologische effecten zandwinning Merwedes
- aanslibbing in de (te verdiepen) vaargeul van de Nieuwe Merwede (i.r.t. aanslibbing in de vaargeul naar Moerdijk)
- morfologie Nieuwe Waterweg, baggerinspanning en verzilting in Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg
- verontreinigde waterbodems in Nieuwe Merwede, Hollands Diep en Haringvliet: noodzaak tot saneren of saneringsprojecten of afdekking door voortgaande sedimentatie?

Doel van het nieuwe instrument is dus het inzichtelijk maken van de processen en daaraan gerelateerde veranderingen die in de bodemligging en bodemsamenstelling in het systeem optreden. Het nieuwe instrument is daarom speciaal ontwikkeld voor de processen en condities die in het Rijn-Maasmonding gebied optreden. In tegenstelling tot eerdere modellen is het nieuwe instrumentarium in staat zowel de zand- als de slibfractie (en de onderlinge interacties, en het volledige “advectie-diffusie” karakter) te simuleren, en komt op korte termijn ook de mogelijkheid voor directe koppeling met meerdimensionale modellen beschikbaar.

Voor de complexe procesbeschrijvingen voor de zand-slibinteracties is het noodzakelijk de meest geavanceerde technieken te gebruiken die op dit moment voor morfologie beschikbaar zijn. Het betreft een multi-fractiemodellering met concepten voor zand en slib. Daarnaast moet ook de noodzakelijke functionaliteit beschikbaar zijn voor hydrodynamica (getij, rivierafvoer, samengestelde dwarsprofielen en complexe kunstwerken). Dit heeft geleid tot de bouw van een integrale morfologiemodule in SOBEK-River met functionaliteit voor zand en slib, en mogelijkheid voor directe koppeling met waterkwaliteitsprocessen (via de waterkwaliteits- of “DelWAQ”-module).

Een dermate geavanceerd en uitgebreid eendimensionaal morfologie-instrumentarium anders dan SOBEK-River met de gerealiseerde morfologie-uitbreiding was op het moment van deze rapportage (mei 2007) nog niet beschikbaar. Ter vergelijking zijn in onderstaande tabel enkele belangrijke vergelijkbare eendimensionale softwaresystemen voor riviermorfologie en hun beschikbare relevante functionaliteit en ondersteuning opgesomd.

Tabel 1.1 Vergelijkbare software systemen voor 1D morfologie en hun eigenschappen

Software	Mike 11	CCHE1D	GSTAR-1D	ISIS	SOBEK-River met DelWAQ
Instituut	DHI	National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi	US Bureau of Reclamation	HR Wallingford	WL | Delft Hydraulics
Land	Denemarken	VS	VS	Engeland	Nederland
Verkrijgbaarheid	tegen betaling	tegen betaling	gratis	tegen betaling	tegen betaling
Gebruikersondersteuning	ja	ja	nee	ja	ja
Multifractie-aanpak voor zand en grind	beperkt	ja	beperkt	nee	ja
Multifractie-aanpak voor zand en slib	nee	ja	beperkt	nee	ja
Advectie-diffusie van zwevend sediment	nee	op basis van door gebruiker opgegeven aanpassingslengtes	beperkt	nee	ja

Overige systemen zoals MORMO van de ETH (Zwitserland), SMS software van de Scientific Software Group (VS) en andere beschikken niet over voldoende functionaliteit of zijn onvoldoende generiek om voor de Rijn-Maasmonding te worden ingezet. Ook de mogelijkheid om een koppeling te realiseren met de operationele SOBEK-schematisatie voor de waterbeweging in het Rijn-Maasmondinggebied, is een belangrijke voorwaarde om te kiezen voor een systeem dat hierin reeds voorziet. Tenslotte is het voor een systeem dat zal worden ingezet als beheersinstrumentarium ook belangrijk dat aspecten ten aanzien van software beheer en onderhoud zijn georganiseerd.

Voor de uitbreiding van het SOBEK-instrumentarium is uitgegaan van inzichten en resultaten uit de voorstudie voor dit project (Mosselman et al., 2005). De voorstudie heeft geleid tot een aantal bouwstenen voor het te ontwikkelen SOBEK-morfologie model. De belangrijkste bouwstenen zijn:

- De conversie van de morfologiemodule uit de oude SOBEK-lijn (SOBEK-RE) naar de nieuwe SOBEK-lijn (SOBEK-River). De morfologiemodule is als het ware uit SOBEK-RE geweekt, en via een ad-hoc koppeling geïntegreerd in de hydrodynamische module.
- Het advies voor de implementatie voor mengsels van zand en slib door middel van een uitbreiding en koppeling van de DelWAQ-module aan SOBEK-River. De DelWAQ-module is de waterkwaliteitsmodule van WL welke kan worden gekoppeld aan diverse hydrodynamische modellen.

Naast bovengenoemde voorstudie zijn ook andere projecten uitgevoerd die hebben geleid tot een geleidelijke ontwikkeling van het SOBEK-Rivermodel voor de Rijn-Maasmonding. Daarbij zijn vooral bouwstenen ontwikkeld voor de zwevende-stofmodellering in het projectgebied, waarbij echter nog niet de morfologie is aangepakt. Om te komen tot een operationeel morfologisch model voor de Rijn-Maasmonding worden de bouwstenen verder uitgewerkt en gecombineerd.

Voor de opzet van dit project was het noodzakelijk een fasering in te voeren die aansluit bij discussies en ontwikkelingen ten aanzien van het morfologieinstrumentarium. Discussies worden onder andere gevoerd (met WL en RIZA) in het kader van de integratie van functionaliteit van het oude SOBEK-RE in het nieuwe SOBEK-River. In dit integratietraject is ook een fase voor implementatie van morfologie voorzien, maar deze fase zal pas in een later stadium worden uitgevoerd. De keuzes die voor het Rijn-Maasmonding model zijn gemaakt zijn daarom richtinggevend voor het uiteindelijke integratietraject. Naast dit integratietraject speelt ook de uniformering van morfologiemodules voor 1D en meerdimensionale (2D/3D) modelsystemen (met gestructureerde en ongestructureerde rekenroosters) een toonaangevende rol in de uiteindelijke implementatie. Voor de meerdimensionale modellen is gekozen voor een implementatietraject via DelWAQ dat sterke aansluiting heeft op het ontwerp voor de Rijn-Maasmonding.

In dit rapport is sprake van twee SOBEK-versies, de samenhangen met een oude en een nieuwe productlijnen. Voor de naamgeving van deze versies geldt:

- SOBEK-River is de nieuwste productlijn waarbij rivierfunctionaliteit in SOBEK-Rural is ingebracht.
- SOBEK-RE is de oude versie van het modelsysteem voor rivier (“R”) en estuariene (“E”) toepassingen, met mogelijkheid voor morfologische berekeningen voor bovenrivieren.

Als basis voor deze studie is gebruik gemaakt van het uit SOBEK-RE naar SOBEK-River geconverteerde model van het Noordelijk Deltabekken, met de morfologisch schematisatie en parameters van Mol (2003).

1.2 Opzet

In het project zijn de eerder uitgewerkte bouwstenen verder ontwikkeld tot een nieuw morfologisch model voor de Rijn-Maasmonding, waarbij zowel zand en slib fracties zijn beschouwd. In de eerste stappen is de beschikbare morfologiemodule voor zand en grind in de SOBEK-River lijn toegepast om de zand-slib concepten te toetsen en het inzicht in de problematiek te vergroten. Deze tussenstap in de ontwikkeling van het morfologieinstrumentarium was vooral bedoeld voor toetsing van de concepten in het model van de Rijn-Maasmonding. Vervolgens is de stap gezet om een nieuwe morfologie module (met advectie-diffusie processen) in SOBEK-River te implementeren. De opzet van het rapport volgt in grote lijnen het achterliggende stappenplan. De volgende stappen zijn daarbij onderscheiden:

- Uitbreiding en toepassing van de morfologie module uit de oude SOBEK-lijn die is geïmplementeerd in SOBEK-River, en reeds beschikbaar was bij aanvang van het project:
  - Stap 1: Implementatie, toepassing en analyse van de Van Rijn TRF2004 transportformule (Van Rijn, 2007). De motivatie voor deze aanpak is dat de Van Rijn transportformules de mogelijkheid bieden te rekenen met zand/slib transport. Daarom wordt deze ingezet voor het berekenen van de transportcapaciteit in dit model.

  - Stap 2: Uitvoeren van morfologische berekeningen voor het Rijn-Maasmonding model met bovengenoemde uitbreiding. Deze simulaties zijn bedoeld om het betreffende concept te toetsen, en om inzicht te krijgen in de mogelijkheden het zand/slib gedrag in de Rijn-Maasmonding te simuleren. Omdat in het modelconcept nog geen advectie-diffusieprocessen zijn gemodelleerd kan het alleen worden gebruikt om grootschalige morfologische processen te onderzoeken (lengteschalen groter dan de aanpassingslengte van het zwevend sediment).

- Ontwerp en bouw van morfologiefunctionaliteit in SOBEK-River via de DelWAQ-module:
  - Stap 3a: Ontwerp van de morfologiemodule. De bedoeling van deze stap is om het implementatietraject uit te werken om te komen tot een eerste kale werkende versie, waarbij de vervolgstappen leiden tot verdere verbetering en uitbreiding van de functionaliteit.
  - Stap 3b: Inbouw van DelWAQ-processen voor zand-slib. Procesroutines zijn opgezet voor sedimenttransport, bodemveranderingen door sedimenttransportgradiënten, bodemsamenstellingsveranderingen en voor specifieke onderdelen zoals splitsingspunten en sedimentontrekkingen. De aanpak die wordt aangeboden in deze stap betreft een minimale versie (toegespitst op de benodigde functionaliteit voor Rijn-Maasmonding), waarbij geen rekening is gehouden met uitbreiding en onzekerheden voor een zeer generieke toepassing.
  - Stap 3c: Terugkoppeling morfologische veranderingen naar hydrodynamische module van SOBEK-River. De uit DelWAQ berekende bodemveranderingen worden doorgegeven aan SOBEK-River door het koppelingsprogramma van DelWAQ en SOBEK. Vervolgens worden de dwarsprofielen aangepast en kan een nieuwe waterbewegingssimulatie worden uitgevoerd.
  - Stap 4: Extra functionaliteit voor zand/slib mengsels. In het Rijn-Maasmonding gebied is sprake van trajecten waar zand en slib gelijktijdig in de bedding voorkomen en daarbij de erodeerbaarheid en bodemsamenstelling op een speciale wijze beïnvloeden. In het DelWAQ-model is daarvoor een specifieke aanpak geïmplementeerd.

In tegenstelling tot eerdere morfologische studies is in dit project een instrumentarium beschikbaar gekomen waarmee het gecombineerde morfologische effect van zand en slib is te simuleren in de Rijn-Maasmonding.

1.3 Doelstelling

Doel van het project is de ontwikkeling van een eendimensionaal morfologisch modelinstrumentarium met niet-uniform sediment (zand-slibmengsels), Van Rijn sedimenttransportformule (2007), en onderscheid tussen transport van zwevende stof en van grof sediment langs de bodem. Tevens heeft dit project tot doel met het resulterende instrumentarium het vergroten van inzicht in zand-slibprocessen in de Rijn-Maasmonding en de modellering ervan.

Dit rapport beschrijft de activiteiten die hiervoor zijn uitgevoerd, de wijze waarop de morfologische functionaliteit is geïmplementeerd, en enkele resultaten van de berekeningen die zijn uitgevoerd voor het projectgebied.

1.4 Organisatie

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door dr. ir. C.J. Sloff, dipl.-ing. Anke Hauschild, ing. Johan Crebas, ir. Erwin Meijers, en ir. Eelco Verschelling. Daarnaast voorzagen dr. ir. Bert Jagers, ir. Leo Postma, ir. Jos van Gils, ir. Qinghua Ye (Unesco-IHE), Jan van Beek, dr. ir. Zheng Bing Wang, dr. ir. Erik Mosselman en prof. dr. ir. Leo van Rijn het team van waardevolle adviezen en bijdragen. De projectleiding was in handen van Kees Sloff. Drs. Jasper Hugtenburg en ir. Marcel Bruggers begeleidden het project namens de opdrachtgever.

1.5 Leeswijzer

De hoofdtekst in dit rapport beschrijft de hoofdlijnen van de ontwikkeling van het morfologie-instrumentarium voor de Rijn-Maasmonding. In de bijlagen bij dit rapport is een gedetailleerde beschrijving van en toelichting op de gebruikte methoden gegeven. Enkele delen zijn Engelstalig in verband met gebruik van deze stukken voor SOBEK documentatie.

In hoofdstuk 2 zijn de schematisatie en berekeningsresultaten van het eendimensionale model voor de Rijn-Maasmonding gepresenteerd. Daarbij zijn verschillende aspecten van de modelberekeningen toegelicht, en zijn de resultaten geëvalueerd.

Vervolgens is in hoofdstuk 3 een inleiding gegeven op de implementatie van de sedimenttransportformulering van Van Rijn. Hoofdstuk 4 beschrijft de rekenprocedures en processen die zijn geïmplementeerd in DELWAQ. Daarbij is ook een toelichting gegeven bij numerieke aspecten en bij gebruiksaspecten (d.w.z. de user-interface).

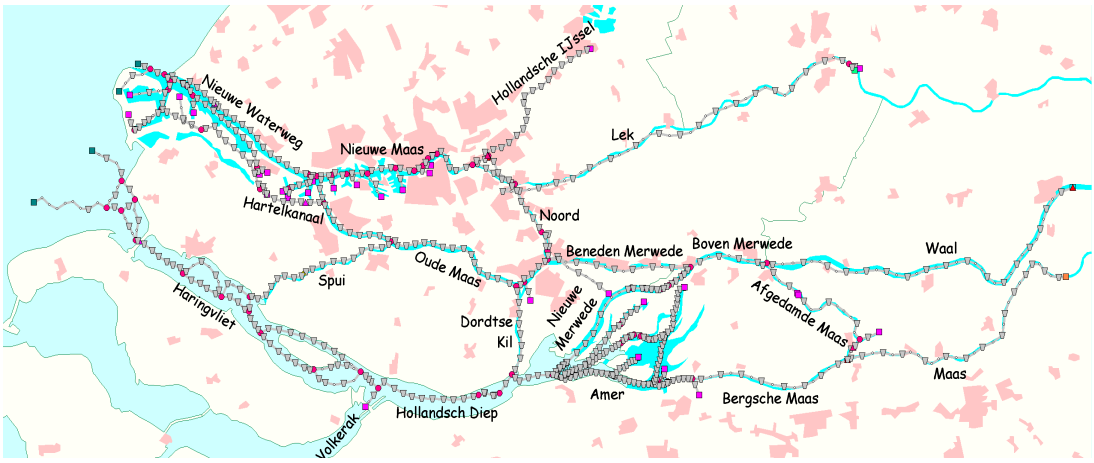
In hoofdstuk 5 presenteert een discussie van het resulterende modelinstrumentarium en de toepassing voor de Rijn-Maasmonding, en in hoofdstuk 6 zijn tenslotte de conclusies en aanbevelingen van deze studie gepresenteerd.

2 SOBEK model Rijn-Maasmonding

2.1 Inleiding

Voor de Rijn-Maasmonding wordt uitgegaan van een eendimensionaal hydrodynamisch model dat reeds wordt toegepast voor watervraagstukken in het Rijn-Maasmonding gebied. Voor transport van zand en slib, en morfologische veranderingen is de beschikbare hydrodynamische schematisatie uitgebreid met morfologische en sedimentaire kenmerken.

Het SOBEK-River model van de Rijn-Maasmonding is onderdeel van een groter model dat zowel het Noordelijk als het Zuidelijk Deltabekken omvat (Oosterschelde en Westerschelde). Figuur 2-1 toont het deel dat in deze opdracht gebruikt wordt, en dat als een uitsnede van het grote model wordt toegepast. In de figuur zijn takken, knopen en dwarsprofielen weergegeven.



Figuur 2-1 SOBEK model Rijn-Maasmonding

Het model is toegepast voor morfologische berekeningen zowel met uniform sediment (vergelijkbaar met de aanpak van Mol, 2003) en met gegradeerd sediment (multi-fractie aanpak met formule Van Rijn, 2007). Het laatste type berekening is uitgevoerd met zowel het SOBEK-River instrumentarium met SOBEK-RE morfologie, en met de versie met DelWAQ-morfologie. De details betreffende deze simulaties, en bijbehorende schematisaties en resultaten zijn beschreven in Bijlage C. In de volgende paragraaf worden de belangrijkste aspecten en constateringen ten aanzien van de modelschematisaties gepresenteerd.

2.2 Modelschematisatie

De modelschematisatie heeft een lange voorgeschiedenis. In het kader van het project Deltabreed is deze recentelijk geconverteerd naar de nieuwe SOBEK-lijn, SOBEK-River. In eerste instantie is hierbij alleen uitgegaan van de hydraulische schematisatie. Ten behoeve van uitbreiding met morfologie is in Mosselman et al (2005) de morfologische schematisatie uit het model van Mol (2003) omgezet naar de morfologiemodule in SOBEK-River.

Hydraulische schematisatie

Bij de omzetting van de SOBEK-RE schematisatie naar de SOBEK-River schematisatie zijn zoveel mogelijk componenten gehandhaafd. Desondanks zijn er ook wijzigingen opgetreden die van belang zijn gebleken voor de uitkomsten van de berekeningen. De belangrijkste karakteristieken van de schematisatie voor waterbeweging zijn:

- De takken in het model zijn gedefinieerd op de kaart van het gebied zoals getoond in Figuur 2-1. De gemiddelde lengte van de resulterende takken bleek echter af te wijken van het SOBEK-RE model. Netto is door de nieuwe definitie van de takken het model toegenomen in lengte.
- De basiscomponenten van het SOBEK-River model zijn “nodes” (knopen) en “reaches” (takken). Op de reaches kunnen diverse elementen zoals rekenpunten (waterstandspunten), dwarsprofielen, kunstwerken en zijdelingse in- en uitstromingen worden gedefinieerd.
- De dwarsprofielen zijn geschematiseerd met behulp van breedte-diepte tabellen, waarbij voor verschillende niveaus de totale en stroomvoerende breedte zijn gedefinieerd. Dit zijn zogenaamde “getabuleerde” profielen. Deze profielen zijn overgenomen uit het oude SOBEK-RE model. Het betreft de profielen die zijn geconverteerd naar SOBEK-River in het project Deltabreed (in 2004).
- In het oude SOBEK-model zijn de hydraulische ruwheden per locatie opgegeven als functie van waterstand of afvoer, of van beide. Ze gelden daar echter voor locaties van het rekenrooster die niet overeenkomen met de locaties van dwarsprofielen. Voor het nieuwe SOBEK-model zijn de ruwheidswaarden getransformeerd naar de locaties van dwarsprofielen. In een aantal takken zijn verschillende ruwheden gedefinieerd voor positieve en negatieve richting.
- Als bovenstroomse randvoorwaarden worden afvoerreeksen opgelegd in de Lek te Hagestein, in de Waal te Gorinchem, in de Maas te Lith en in de Schelde. Benedenstrooms worden getijrandvoorwaarden opgelegd.
- Het model bevat tal van kunstwerken, voorzien van *controllers* en *triggers*. De voor simulatie van de waterbeweging belangrijkst beschouwde kunstwerken zijn de Haringvlietsluizen en de Stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg. Deze zijn zowel in de nieuwe als in de oude modelversie geschematiseerd met behulp van “general structure” formulering. Door verschillen in de numerieke oplossingsmethode zijn de berekende stromingscondities in het kunstwerk en de resulterende vervallen niet gelijk in de oude en nieuwe SOBEK versies. Verschillen in de orde van 0,1 m kunnen optreden (zelfs wanneer het kunstwerk volledig is geopend). Deze afwijkingen zijn merkbaar over grote afstanden stroomopwaarts (door de geringe waterspiegelverhangen werken deze “stuweffecten” ver door). Als gevolg daarvan beïnvloedt bijvoorbeeld de opstuwing ter plaatse van de Stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg de afvoerverdeling naar het Noordelijk en Zuidelijk deel van het model.

Een vergelijking van oude (SOBEK-RE) en nieuwe (SOBEK-River) hydraulische modelresultaten in Mosselman et al. (2006) leidde tot een aantal afwijkingen in berekende waterstanden en afvoeren die zijn te wijten aan bovengenoemde aspecten. Vooral het verschil in taklengte en de afhandeling van kunstwerken zijn relevant. Verder bleek het in die fase van het onderzoek niet mogelijk de morfologieberekening aan de praat te krijgen.

De belangrijkste oorzaken lagen in de afstemming tussen de hydraulische schematisatie en de beperkingen ten aanzien van de op te leggen morfologische schematisatie.

Morfologische schematisatie

Voor de morfologische berekeningen met uniform sediment is de invoer voor de morfologiemodule van het Sobek-RE model van Mol (2003) geconverteerd naar de knopen en takken van het SOBEK-River model. Ook de baggerhoeveelheden zijn overgenomen. Bijbehorende meest relevante karakteristieken zijn:

- hydraulische tijdstap ½ uur
- Transportformule Engelund en Hansen voor alle takken. Voor Merwedes en Waal wordt deze vermenigvuldigd met een kalibratiefactor van 0,8, in de overige takken een factor 1,0.
- Sedimentverdeling op splitsingspunten berekend met een verdelingsfunctie volgens een machtswet (conform Mol, 2003)
- Getabuleerde dwarsprofielen, met een sedimenttransportbreedte gelijk aan de maximale breedte. Door beperkingen van de implementatie bleek het in de eerste morfologiekoppeling (SOBEK-RE morfologie aan SOBEK-River) niet mogelijk de transporterende breedte te beperken tot de breedte van het zomerbed. Dit heeft vooral gevolgen voor transport tijdens hoogwaterafvoeren in de Waal (in benedenstroomse takken zijn minder uiterwaarden aanwezig). In de DelWAQ-koppeling is dit probleem later opgelost door de transporterende breedte gelijk te stellen aan de breedte van de ‘main channel’.

Voor de berekeningen met multi-fractie aanpak is bovengenoemde schematisatie verder uitgebreid. De details van deze uitbreiding zijn gepresenteerd in Bijlage C.3. De belangrijkste karakteristieken zijn:

- Opdeling van bodemmateriaal in 6 tot 8 korrelgroottefracties. Gebruik is gemaakt van meetdata van Fugro zoals gerapporteerd in Snippen et al. (2005) voor de initiële bodemsamenstelling in de rivierbedding.
- Transportformule Van Rijn (2007) voor alle takken. De correctiefactor voor “critical bed-shear stress” is op 0.9 gezet.
- Sedimentverdeling op splitsingspunten berekend met een verdelingsfunctie volgens een machtswet (conform Mol, 2003) toegepast op alle fracties. Overigens is de onzekerheid in deze functie dusdanig groot, dat hiervoor aanvullende gevoeligheidsberekeningen zijn uitgevoerd.
- In het model wordt gerekend met een opdeling van de bodem in lagen. De toplaag, d.w.z. menglaag of actieve laag, heeft in het model een constante dikte 0,5 m. Hoewel deze laagdikte afhankelijk kan worden verondersteld aan de hoogte van beddingvormen, en dus afvoerafhankelijke variaties zou moeten vertonen, is vooralsnog gekozen voor een tijdgemiddelde constante dikte. Gezien de onzekerheden in de concepten (bijvoorbeeld in situaties zonder beddingvormen, bijvoorbeeld met slib) en het ontbreken van gegevens zal een andere keuze niet leiden tot nauwkeurigere voorspellingen. In deze fase van de studie is er voor gekozen de gevoeligheid van de keuze te onderzoeken (zie Bijlage C.4), in plaats van een poging het model uit te breiden.

- Voor baggerwerk en stort zijn de baggertabellen van het uniforme sediment model omgezet naar onttrekking/suppletie van sediment volume per korrelgroottefractie. De verdeling per fractie gebeurd per baggertraject naar rato van aanwezige fracties in het beschouwde traject. In DelWAQ gebeurt dit automatisch (op basis van het door de gebruiker gespecificeerde baggervolume, en de op het baggermoment beschikbare berekende bodemsamenstelling van de actieve laag).
- In berekeningen met de morfologiemodule uit SOBEK-RE bleek dat tijdens de simulatie van de afvoerpiek in 1995 numerieke problemen optraden. De transporten in deze periode bleken erg groot, en er ontstonden bodeminstabiliteiten. Om die reden is het afvoerverloop van het jaar 1995 vervangen door dat van 1994. Deze problemen zijn waarschijnlijk toe te schrijven aan een ontaarding van de numerieke integratie die in de Van Rijn formule wordt toegepast. De methode is later herzien ten behoeve van de implementatie in DelWAQ, en leidt daardoor niet meer tot numerieke problemen.

Morfologische factor

In het eendimensionale model voor de Rijntakken worden processen beschouwd met een lengteschaal die in de orde ligt van enkele kilometers (in ieder geval groter dan de breedte van de rivier). De bijbehorende tijdschalen zijn die voor stromingsverschijnselen (getijde, voortplanting van afvoergolven) en die voor breedtegemiddelde morfologische processen (zandgolven, “downstream fining”). Over het algemeen geldt in de Waal, de Maas en de Rijn-Maasmonding dat de morfologische veranderingen klein kunnen worden verondersteld gedurende de karakteristieke tijdschaal voor de hydrodynamica. De morfologische tijdschaal is namelijk vele orden groter. De karakteristieke tijdschalen voor de waterbeweging liggen in de orde van uren tot een dag (voor zowel getijdeeffect als voor gedrag van afvoergolf), terwijl die van de morfologie liggen in de orde van weken tot maanden.

Het bovengenoemde onderscheid in tijdschalen kan gebruikt worden voor het versnellen van de langjarige simulaties. Tijdswinst kan bijvoorbeeld worden geboekt door het aantal rekenintensieve stappen te reduceren, of door het rekenproces te vereenvoudigen door bewerkingen die nodig zijn voor kleinere tijdschalen uit het algoritme te verwijderen (bijvoorbeeld met behulp van een quasi-stationaire aanpak, waarbij stroming stationair wordt beschouwd voor de morfologische tijdschaal).

In SOBEK-River met DelWAQ en SOBEK-RE morfologie wordt gebruik gemaakt van de “online” aanpak met morfologische factor: met deze aanpak worden alle processen (waterbeweging, transport en bodem-updating) gesimuleerd met dezelfde kleine tijdstap (flow-tijdstap). De berekende bodemveranderingen worden echter vermenigvuldigd met een ‘morfologische factor’ om tegemoet te komen aan verschillen in tijdschalen. Voor een getijdesituatie betekent dat een met factor *n* berekende morfologische verandering over een periode van 1 getij overeenstemt met de echte morfologische verandering over een periode van *n* getijden. In combinatie met afvoergolven op rivieren moet echter voorzichtig worden omgegaan met een morfologische factor. De grootte en de duur van stroming van en naar het winterbed tijdens hoogwatergolven is bepalend voor het ontstaan van zandgolven die door de rivier migreren. Daarnaast zijn ook deze tijdschalen van belang voor de afvoerafhankelijke variaties in de samenstelling van het getransporteerde materiaal en de resulterende bodemsamenstelling. Het gebruik van de morfologische factor mag niet leiden tot grote veranderingen in bovengenoemde effecten. De gebruikelijke procedure is:

- De oorspronkelijke tijdserie van rivierafvoeren opgelegd als randvoorwaarde op de instroomranden wordt gecomprimeerd door de tijdschaal te delen door de morfologische factor. Bijvoorbeeld, een afvoerserie voor een periode van 1 jaar wordt met een morfologische factor van 12 teruggebracht tot een tijdsduur van 1 maand (getijranden daarentegen worden niet gecomprimeerd).
- Door de afvoergolven te comprimeren wordt ook het hydraulische gedrag (snelheid van de golf en demping) beïnvloed. De effecten van berging op de golfvorm zijn anders voor een kortere (gecomprimeerde) afvoergolf. In principe loopt de golf na toepassing van de morfologische factor *n* nog met een vergelijkbare snelheid stroomafwaarts als van een normale hydraulische berekening (zonder factor *n*). De breedte van de golf is echter door de compressie kleiner (gereduceerd met de factor *n*). De tijdsafhankelijke respons van de morfologie is daardoor anders dan in een berekening zonder morfologische factor. In de Rijntakken is deze afwijking gering wanneer een morfologische factor kleiner dan 10 wordt toegepast. Aanbevolen wordt om te rekenen met een factor 6.

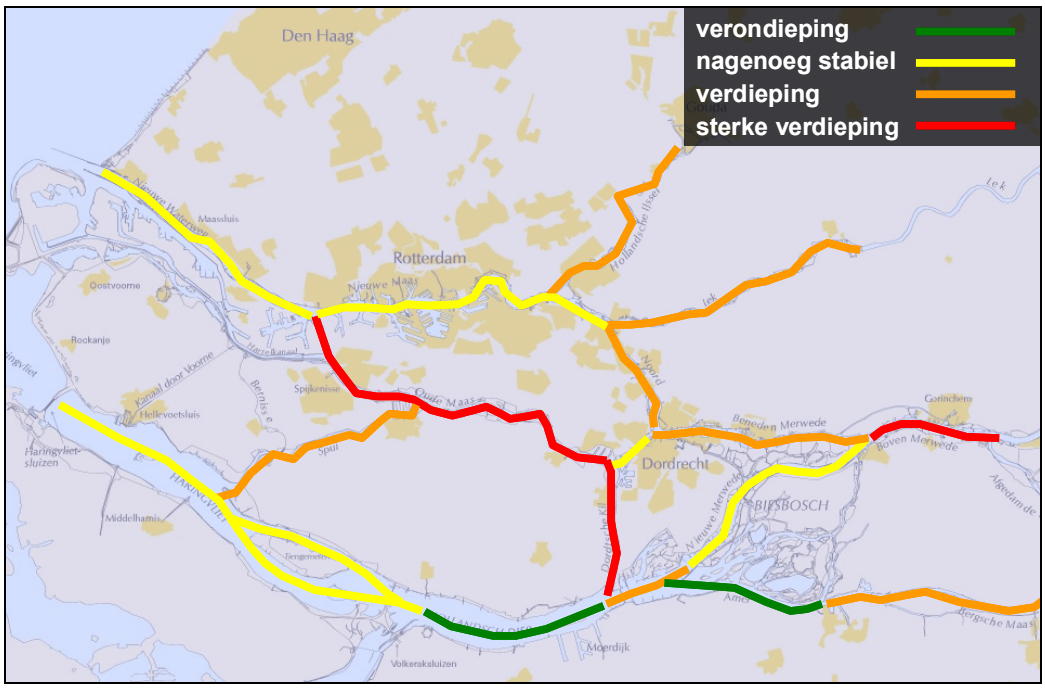
Voor de in deze paragraaf beschreven schematisatie van het Rijn-Maasmonding gebied is zoveel mogelijk uitgegaan van bestaande kennis en eerdere modelschematisaties van het systeem. De nauwkeurigheid van de schematisatie en keuzes ten aanzien van de hydraulische kalibratie spelen namelijk een grote rol bij de uiteindelijke resultaten van het morfologische model. In paragraaf 2.3 zijn de resultaten van de simulaties gepresenteerd en vergeleken met de waargenomen trends in het gebied. De nadruk ligt hierbij vooral op het weergeven van de grootschalige morfologische veranderingen.

2.3 Resultaten

Het doel van de simulaties is om het gedrag van de morfologie en het transport met de nieuwe transportformule te onderzoeken. De berekeningen zijn daarom gemaakt voor de periode 1990-2000 en getoetst aan de waargenomen veranderingen in die periode. Daarnaast zijn enkele parameters en randcondities gevarieerd om de invloed ervan te kunnen isoleren.

2.3.1 Waargenomen trends

In Figuur 2-2 is aangegeven welke trends zijn waargenomen in het Rijn-Maasmonding gebied in de periode 1990-2000. Deze trends zijn gebaseerd op de sedimentbalans gepresenteerd in Snippen et al. (2005). De morfologische ontwikkelingen hangen hoofdzakelijk samen met de baggerinspanning (bijna 7 miljoen m^3/jaar, vooral in de Nieuwe Waterweg), de afsluiting van het Haringvliet (1970, getijdevolume gewijzigd), en de grote afvoeren in 1993 en 1995.



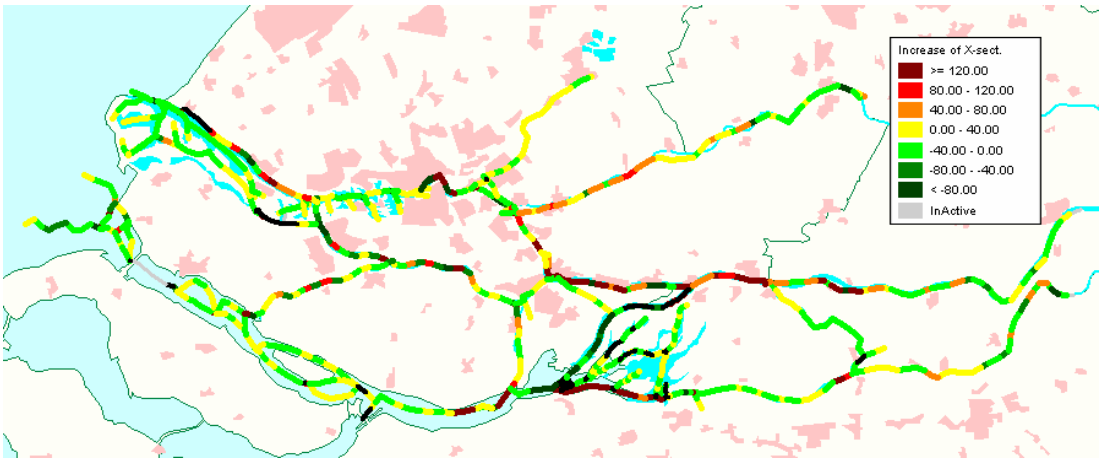
Figuur 2-2 Waargenomen trends in bodemligging in de periode 1990-2000, niet gedifferentieerd naar natuurlijke processen of baggerwerkzaamheden

In Snippen et al. (2005) zijn de trends gekwantificeerd. In de Dordtse Kil en de Oude Maas is sprake geweest van een verdieping van orde 5 tot 10 cm per jaar. In de Boven Merwede bedroeg deze daling circa 4 cm/jaar, terwijl in de Beneden-Merwede en Nieuwe Merwede sprake was van een daling van respectievelijk 1,5 en 0,2 cm/jaar. In de Amer en het Hollandsch Diep is sprake van een stijging van 1,5 a 2 cm/jaar. Bij deze waarden is niet een differentiatie aangegeven naar ontwikkelingen door natuurlijke processen of baggerwerkzaamheden.

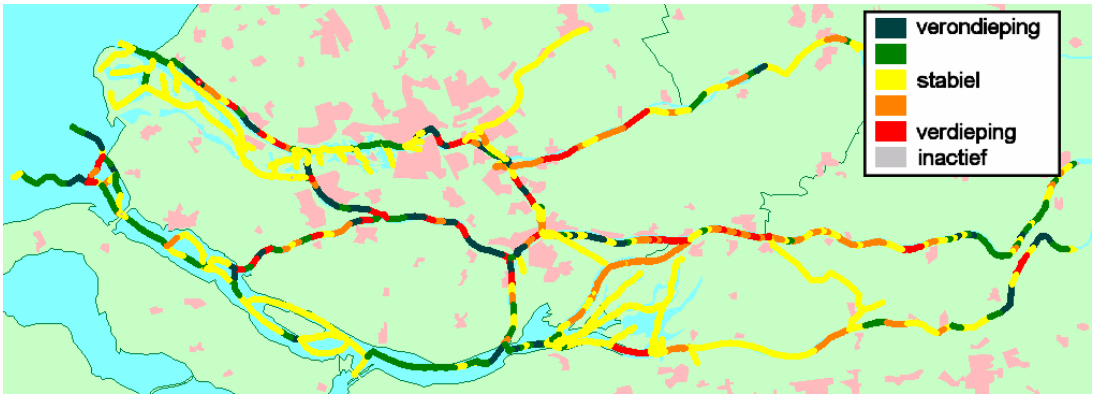
2.3.2 Simulaties met SOBEK-River

Met het hydraulisch en morfologisch model is in de beginfase van het project met succes een periode van 10 jaar doorgerekend met uniform sediment en de transportformule van Engelund Hansen (1967). Het betreft simulaties met de morfologie module uit SOBEK-RE (gekoppeld aan de waterbewegingssimulaties met SOBEK-River). Enkele resultaten zijn weergegeven in Bijlage C.2. De resultaten bleken goed overeen te stemmen met die van Arjan Mol (2003) berekend met behulp van het SOBEK-RE instrumentarium.

Vervolgens zijn berekeningen gemaakt met de multi-fractie aanpak en de Van Rijn (2007) transportformule. Het betreft in eerste instantie berekeningen met de morfologie module van SOBEK-RE nadat deze was gekoppeld aan SOBEK-River. In tweede instantie is gerekend met de implementatie van morfologiefunctionaliteit in de DelWAQ-module van SOBEK-River.



Figuur 2-3 Berekende verandering in dwarsprofiel voor periode 1989-2000 in [m^2] (positieve waarde is erosie, d.w.z. geel en rood, negatieve waarde is sedimentatie, d.w.z. groen) (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



Figuur 2-4 Berekende verandering in segmentvolume voor periode 1989-2000 in [m^3] (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River)

In Figuur 2-3 en 2-4 zijn de berekende trends in bodemligging op vergelijkbare wijze gepresenteerd. als in Figuur 2-2. Opgemerkt moet worden dat voor beide figuren niet de bodemverandering, maar enerzijds de toename in dwarsprofiel, en anderzijds de verandering in volume van rekencellen is gebruikt. De resultaten zijn daarom afhankelijk van de breedte van het dwarsprofiel (in geval van toename van dwarsprofiel) en oppervlak van de cel (in geval van segmentvolumes). Een directe weergave van berekende bodemveranderingen in een kaart van het gebied is namelijk nog niet beschikbaar. Omdat de breedtes en segmentoppervlakken variëren in het model leidt dit tot een enigszins onregelmatig patroon van kleuren langs de takken. Voor een meer nauwkeurige vergelijking wordt daarom verwezen naar Bijlage C.4 en Bijlage C.5. Daar zijn resultaten van de berekende bodemligging en de bodemverandering gepresenteerd in lijnfiguren.

De berekeningen met de morfologie module uit SOBEK-RE zijn uitgevoerd met 8 sedimentfracties (zie Tabel C.3), en zonder advectie-diffusie gedrag van fijn sediment. Uit de resultaten voor de bodemligging uit deze berekeningen (zie ook Bijlage C.4) volgt:

- Over het algemeen zijn de berekende veranderingen gering (maximaal in de orde van enkele centimeters per jaar).

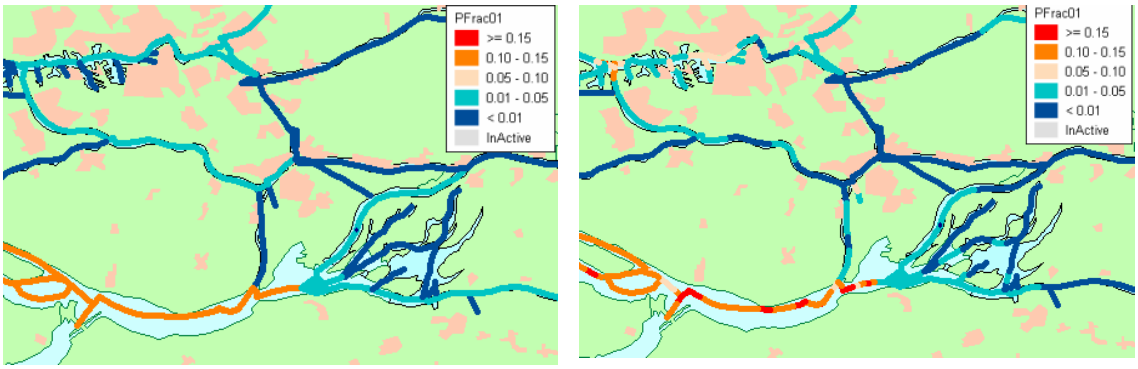
- De morfologische veranderingen doen zich niet gelijkmatig voor over een tak, maar vertonen een gedifferentieerd beeld op korte trajecten. Enerzijds kan dit worden toegeschreven aan inspeeleffecten, waarbij de geschematiseerde dwarsprofielen zich in het begin van de berekening aanpassen aan de lokale evenwichtscondities. Anderzijds is sprake van bodemgolven die zich langzaam door het systeem verplaatsen, en die worden veroorzaakt door onregelmatigheden in de afvoer of ingrepen in de rivier (zoals baggerwerk).
- De invloed van baggerwerk op de bodemveranderingen is substantieel (zie figuren in Bijlage C.4). De trajecten in Figuur 2-3 met erosie (oranje en rood) zijn vrijwel allen grotendeels te relateren aan de sedimentonttrekkingen ten behoeve van baggeren.
- De Nieuwe Merwede toont een stijging, terwijl de Beneden Merwede een daling toont. De veranderingen liggen (bij een breedte van orde 400 m) in de orde van 2 cm/jaar. Er wordt van uitgegaan dat de splitsingspuntrelatie op de Merwedekop hier een belangrijke rol speelt.
- Uit de vergelijking van een simulatie met en zonder baggeren volgt dat de bovenloop van de Nieuwe Merwede is gedaald door baggerwerk, maar dat de benedenloop is gestegen doordat ter plaatse sediment wordt gesuppleerd.
- In het benedenstroomse deel van de Lek wordt een daling berekend van circa 2 tot 4 cm per jaar, wat in overeenstemming is met de waarnemingen. Ook de daling in de Boven Merwede (orde 4 cm per jaar) is in overeenstemming met de waarnemingen.
- De Dordtse Kil en Oude Maas zijn relatief stabiel in de simulatie, en tonen niet de relatief sterke verdieping die is waargenomen in het prototype.
- De grootste bodemverandering treedt op in de Amer: hier daalt de bodem aanzienlijk in de simulaties (orde 10 cm/jaar). Deze bodemdaling is vrijwel volledig toe te schrijven aan baggerwerk in de simulatie. In het prototype is hier juist een sterke aanzanding opgetreden in de beschouwde periode.
- De resulteren bodemveranderingen zijn relatief ongevoelig voor de dikte van de menglaag.
- Op Hollandsch Diep en Haringvliet zijn bodemveranderingen zeer gering (hooguit 1 cm). Het bodemsediment wordt hier vrijwel niet getransporteerd door lage snelheden. Slechts bij hoogwaters treedt hier enig transport van betekenis op.

In Bijlage C.4 zijn tevens de resultaten getoond voor de ontwikkeling van de gemiddelde diameter en de hoeveelheid klei in de menglaag (fractie 1, kleiner dan 8 μm). De ontwikkeling blijkt relatief sterk af te hangen van de laagdikte van de menglaag. Door een grotere laagdikte neemt de snelheid af waarmee de bodemsamenstelling verandert, en waarmee storingen zich in de bodemsamenstelling stroomafwaarts voortplanten. Uit de resultaten kan worden afgeleid:

- Veranderingen in de gesimuleerde bodemsamenstelling zijn vooral waar te nemen in de omgeving van takovergangen en op splitsingen en samenvloeiingen. Op deze takovergangen treden in het model sprongen op in de initiële bodemsamenstelling omdat deze per tak constant genomen is (maar wel per tak verschillend). Tijdens de simulatie verplaatst de invloed van bodemsamenstelling uit de bovenstroomse takken zich stroomafwaarts naar de takken benedenstrooms van de samenvloeiingen en splitsingen. Deze veranderingen kunnen worden beschouwd als een gevolg van de schematisatie, en dus niet toe te schrijven aan omstandigheden die daadwerkelijk in de rivier zijn opgetreden.

- Bij geringe dikte van de menglaag verlopen veranderingen in bodemsamenstelling sneller, en strekken de veranderingen zich verder uit benedenstrooms van de overgangen in takken.
- In de baggeroptie is het noodzakelijk de samenstelling van het bagger (en suppletie) materiaal vooraf voor te schrijven (via tabellen). Daarbij is uitgegaan van de beginsamenstelling van de betreffende tak. Deze samenstelling is tijdens de simulatie over het algemeen niet gelijk aan de op ieder tijdstip berekende (en dus veranderende) samenstelling van de menglaag. Hierdoor kan deze bagger/suppletie-actie naast de autonome veranderingen een grote invloed hebben op de ontwikkeling van de menglaag. Dit is bijvoorbeeld het geval op het eind van de Waal, en de Boven Merwede.
- Op Hollandsch Diep en Haringvliet is slechts sprake van zeer kleine veranderingen in bodemsamenstelling (conform de geringe bodemontwikkeling).
- De hoeveelheid van fijnste fractie (< 8 µm) is in Waal, Boven- en Beneden-Merwede, Maas en Lek minder dan orde 2 %.
- De fijne fractie neemt in de Oude Maas iets af van orde 3% naar orde 1%.
- De grootste veranderingen in slibgehalte treden op in de Nieuwe Maas (lokaal een toename van orde 3 % naar 10 %), en juist benedenstrooms van de samenvloeiing van Amer en Nieuwe Merwede.

In Figuur 2-5 is getoond hoe in de betreffende trajecten het gehalte van fractie 1 verandert in de loop van de berekening. Het betreft de resultaten van de berekeningen met de DelWAQ-morfologiefunctionaliteit zoals gepresenteerd in bijlage C.5.2. De resultaten van de berekeningen met het SOBEK-RE-morfologiemodule leverde vergelijkbare resultaten op.



Figuur 2-5 Berekende fractie slib initieel (links) en aan eind van berekening (rechts), gesimuleerd voor periode 1989-2000 (berekend met behulp van de DelWAQ-morfologiemodule)

2.3.3 SOBEK simulaties met verhoogd slibaanbod

De hoeveelheid slib in de Rijn-Maasmonding is voor een belangrijk deel afhankelijk van het aanbod op de instroomranden. Dit aanbod wordt niet noodzakelijkerwijs bepaald door de lokale bodemsamenstelling maar door resuspensie in bovenstrooms gelegen trajecten. Op de instroomranden wordt in het rekenmodel de samenstelling van het instromende materiaal bepaald door de initiële bodemsamenstelling op die trajecten (vermenigvuldigd met het evenwichtstransport). Omdat hier initieel sprake is van relatief grof sediment zal er bij alle afvoeren weinig slib binnenkomen, hetgeen de geleidelijk vergroving verklaart in de berekeningen met de SOBEK-RE morfologie module in de voorgaande sub-paragraaf.

Voor de simulaties met de morfologie module uit SOBEK-RE is gekozen om een aantal berekeningen te maken met een verhoogd aanbod van slib op de instroomranden tijdens de hoge rivierafvoeren, echter zonder dat dit slib via een advectie-diffusie model verder het model wordt verspreid. Voor het slibaanbod is gebruik gemaakt van randvoorwaarden voor zwevende stof volgens rapport Meijers en Icke (2006) en Mosselman et al. (2005):

Maas: $$C_{s,Lith} = p_s \left(10,57 + 1,5456 \cdot 10^{-5} Q_{Lith}^{2,247}\right) \quad (2.1)$$

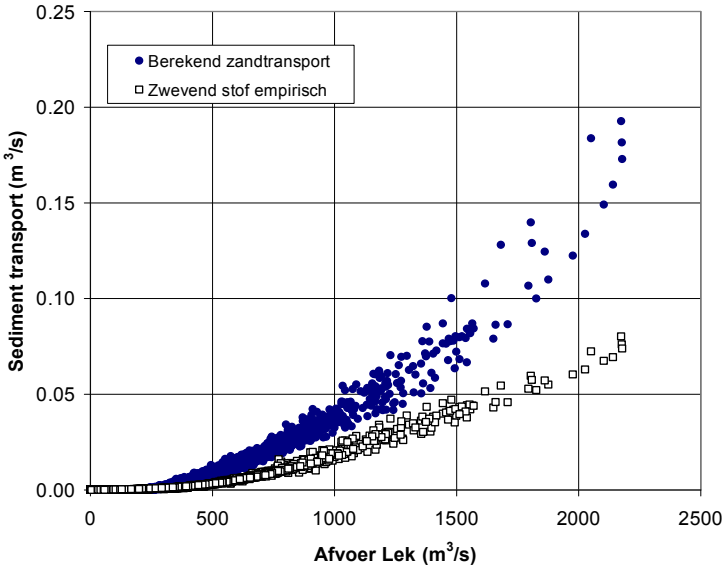
Lek: $$C_{s,Hagestein} = p_s \left(-5,14 + 7,02 \cdot 10^{-5} Q_{Lobith}^{1,645}\right) \quad (2.2)$$

Waal: $$C_{s,Vuren} = p_s \left(-34 + 6,07 \cdot C_{S,Lobith}^{0,65}\right) \quad (2.3)$$

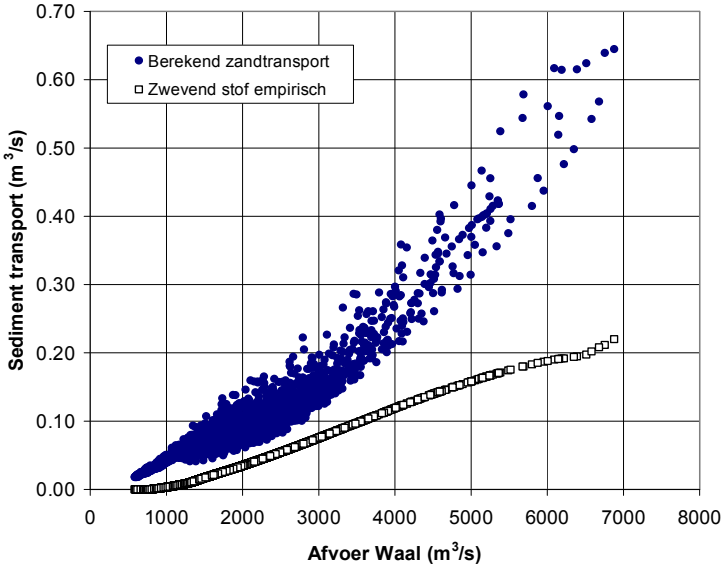
Lobith: $$C_{s,Lobith} = p_s \cdot \left(1,455 \cdot 10^{-5} Q_{Lobith} + 32 \cdot 10^{-3}\right) \cdot 10^3 \quad (2.4)$$

Waarin p_s is het aandeel slib, vooralsnog gelijk gesteld aan 0,62. Bovenstaande relaties leiden tot een relatief grote bijdrage van slib aan het totaaltransport, vooral tijdens de hogere afvoeren. De getallen zijn over het algemeen bij vrijwel alle afvoer gelijk aan de met Van Rijn berekende transporten op de instroomranden, of zelfs aanzienlijk hoger bij piekafvoeren in de Maas. Toepassing van deze grote hoeveelheden slib in het model leidden tot numerieke problemen. Oorzaak hiervan is het gebruik van de SOBEK-RE morfologie module waarbij het slib niet via advectie-diffusie processen wordt getransporteerd. Met de morfologie module via DelWAQ is dit probleem daarom niet meer aan de orde. Om een voldoende lange rekenperiode te garanderen tijdens deze simulaties is het aanbod gehalveerd. In onderstaande Figuur 2-6 t/m Figuur 2-8 staan de berekende transporten (met Van Rijn formule) en het toegevoegde aanbod van slib.

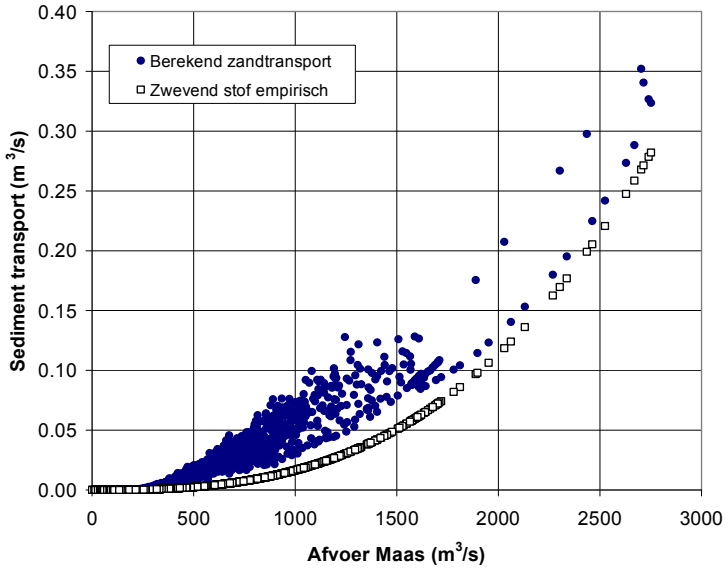
Voor de schematisatie met aangepaste instroomranden is gebruik gemaakt van het model met 6 fracties. Uit een berekening zonder aangepaste instroomranden is per fractie afgeleid hoe groot het berekende sedimenttransport op ieder tijdstip van de simulatie was. Vervolgens zijn voor de fracties 2 t/m 5 (D > 8 μm) deze berekende transporten als randwaarde voor iedere tijdstap ingevoerd in de nieuwe simulatie. In deze nieuwe simulatie is echter voor fractie 1 (D < 8 μm) per tijdstap de hoeveelheid sediment opgelegd die volgt uit de empirische relaties, vermenigvuldigd met een factor 0,5.



Figuur 2-6 Berekend transport (Van Rijn) en aanbod van slib volgens empirische relatie (na halvering) op instroomrand op de Lek



Figuur 2-7 Berekend transport (Van Rijn) en aanbod van slib volgens empirische relatie (na halvering) op instroomrand op de Waal

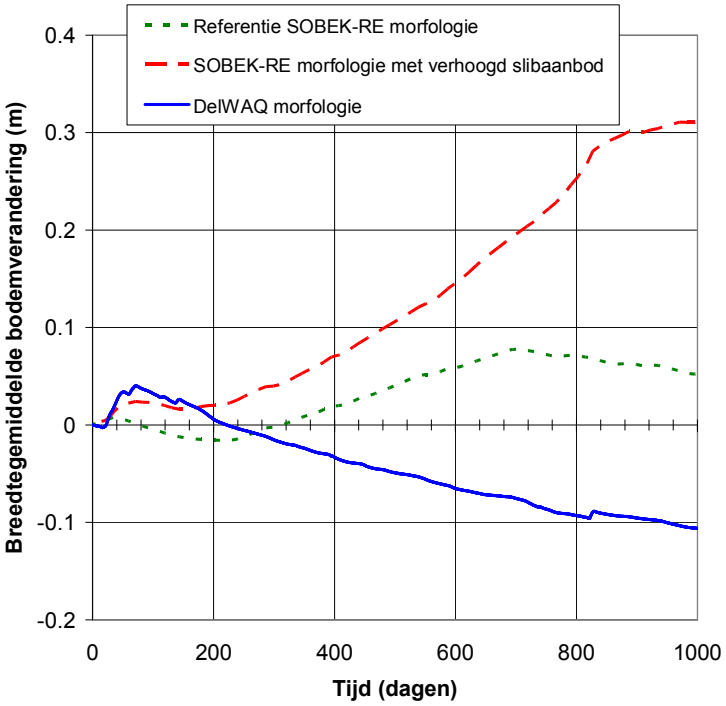


Figuur 2-8 Berekend transport (Van Rijn) en aanbod van slib volgens empirische relatie (na halvering) op instroomrand op de Waal

De berekeningsresultaten zijn gepresenteerd in Bijlage C.4. Uit de vergelijking van de resultaten met en zonder het extra aanbod van Fractie 1 volgt dat het extra slib in de morfologieberekeningen met de SOBEK-RE morfologiemodule leidt tot de volgende effecten:

- Vooral op de Waal en Merwedes, het bovenstroomse deel van de Lek en de Maas en in de Noord neemt het slibgehalte (fractie 1) aanzienlijk toe.
- Ter plaatse van de samenvloeiing van de Amer en Nieuwe Merwede is sprake van een sterke numerieke “overshoot” in het slibgehalte waardoor de SOBEK-RE module problemen heeft met zijn stabiliteit.
- Bodemveranderingen in het model worden over het algemeen slechts in geringe mate beïnvloed door het grotere aanbod van slib. Vooral op het eerste deel van de Waal is sprake van een forse extra stijging in bodemligging (orde 0,5 m), wat samenhangt met het verhoogde aanbod van sediment. Omdat in deze SOBEK-RE module het advectie-diffusiegedrag van dit fijne materiaal ontbreekt zal het sediment alleen via uitwisseling met de bodem stroomafwaarts worden gevoerd (zie ook volgende punt).
- De toepassing van de transportformule van Van Rijn veronderstelt een directe afhankelijkheid tussen de concentratie zwevende stof en de lokale hydraulische omstandigheden. Hierdoor blijkt dat het model redelijk sterk kan reageren op het vergrote slibaanbod dat tijdens hoogwaters in grote hoeveelheden in de menglaag wordt doorgevoerd. Dit leidt in veel situaties tot instabiel gedrag, bijvoorbeeld wanneer op een locatie de menglaag in 1 tijdstap volledig met slib wordt gevuld (transporten worden daardoor in een volgende tijdstap plaatselijk zeer hoog). Dit gedrag past niet bij de werkelijkheid, waarbij via advectie-diffusie een geleidelijke reactie van zwevende-stofconcentratie op de waterbewegingsveranderingen optreedt. Door dit gedrag mee te nemen wordt het systeem wat meer gedempt. Dit blijkt bijvoorbeeld uit de simulaties met de DelWAQ-morfologiemodule, waarbij het extra aanbod van sediment niet leidt tot sedimentatie (zie ook paragraaf 2.3.4).

Om dit te illustreren zijn in Figuur 2.9 de bodemveranderingen weergegeven in de bovenloop van de Waal in een periode vanaf ongeveer 5 jaar na start van de berekening (nadat het model volledig is ingespeeld). Opgemerkt moet worden dat in de DelWAQ-berekeningen het aanbod van zwevende stof op de instroomrand niet is gehalveerd.



Figuur 2-9 Berekende breedtegemiddelde bodemveranderingen rond Waal-km 920 startende op 5 jaar na aanvang van de berekening. Simulaties met een opgelegd aanbod van fijn sediment op de instroomrand.

2.3.4 SOBEK berekeningen met DelWAQ-morfologiemodule

Als onderdeel van testen en validatie van het nieuwe modelinstrumentarium zijn berekeningen uitgevoerd met het Rijn-Maasmonding model met de DelWAQ-morfologiemodule voor de periode 1989 – 2000. In principe zijn de resultaten met DelWAQ-morfologie vergelijkbaar met die berekend met het SOBEK-RE-morfologiemodule in SOBEK-River. Echter in de DelWAQ-simulaties wordt het advectie-diffusie gedrag en de fijnzand en slib modellering op een andere wijze gemodelleerd. De resultaten zijn daarom niet geheel identiek.

Ten opzichte van de simulaties met SOBEK-RE-morfologie (paragraaf 2.3.2) zijn de volgende verschillen van belang:

- Hoewel de eerdere berekeningen zijn uitgevoerd met 8 (en 6) sedimentfracties, zijn de berekeningen met de DelWAQ-module uitgevoerd met slechts 4 korrelgroottefracties. Deze keuze is gemaakt om te voorkomen dat het aantal invoerparameters te groot wordt voor praktisch gebruik (een beperking die vooral in het ontwikkeltraject een rol heeft gespeeld). Het effect van een verdere opdeling in fracties op de betrouwbaarheid van de resultaten is niet nadere onderzocht.

- De simulaties met de DelWAQ-morfologiemodule zijn uitgevoerd op een aangepaste SOBEK-River schematisatie voor de Rijn-Maasmonding die recent is opgeleverd voor de studie "Modellering morfologie van Pannerdense Kop tot Hoek van Holland" (Verschelling et al., 2007). Daarbij zijn onder andere de Waal en Merwedes omgezet naar een schematisatie die beter overeenstemt met het SOBEK-RE Rijntakken model.
- Voor deze berekeningen is naast de Van-Rijn formulering voor het bodemtransport ook gerekend met de zwevend-stof functionaliteit uit DelWAQ voor de twee fijnste fracties (D<0.18 mm). De betreffende twee fracties zijn daarbij zowel als bodemtransport als zwevend transport gemodelleerd, terwijl de grovere fracties alleen als bodemtransport zijn gemodelleerd (uit aanvullende berekeningen is gebleken dat aanschakelen van het suspensie-deel van de Van-Rijn formule voor de grove fracties niet leidt tot andere resultaten, omdat voor de grovere fracties het suspensiedeel gering is).
- Voor de zwevende-stofconcentraties op de instroomranden bij Waal, Maas en Lek is uitgegaan van de concentraties zoals beschreven met de vergelijkingen 2.1 t/m 2.4. Voor de bovenrand van de Waal wordt echter gesteld dat de concentratie zwevende stof gelijk is aan de concentratie bij Lobith. Verder, vanwege de opsplitsing in twee zwevende-stoffracties, zijn de concentraties verdeeld volgens:

Waal/Lek: $$\frac{C_{p1}}{C_{totaal}} = 0,475 - 0,275\frac{Q_{Lobith}}{10.000}; \quad \frac{C_{p2}}{C_{totaal}} = 0,525 + 0,275\frac{Q_{Lobith}}{10.000} \tag{2.5}$$

Maas: $$\frac{C_{p1}}{C_{totaal}} = 0,4; \quad \frac{C_{p2}}{C_{totaal}} = 0,6 \tag{2.6}$$

- Op de instroomrand bij de Noordzee bedraagt de concentratie zwevende stof 10 mg/l, met een opdeling in 4 mg/l van fractie 1 en 6 mg/l van fractie 2.
- In de simulaties is verder voor de splitsingspuntrelaties uitgegaan van de machtswet met een hogere macht k=3 (voor afvoeren) omdat de resultaten aangeven dat er sprake kan zijn van instabiel gedrag van de splitsingen van de Merwedes en bij de Oude Maas.
- In eerste instantie zijn de berekeningen uitgevoerd zonder baggerwerk. In een aanvullende simulatie is het effect van baggerwerk nader onderzocht. Daarbij is echter het baggerwerk vereenvoudigd (constant over trajecten en in de tijd genomen) en is wellicht niet al het baggerwerk in de periode 1990-2000 in het model geïntroduceerd.

De resultaten van de berekeningen zijn gepresenteerd in bijlage C.5. De berekeningen tonen in grote lijnen de effecten die zijn afgeleid op basis van de berekeningen met SOBEK-RE morfologie module. Er zijn echter een aantal aanvullende waarnemingen:

- Ter plaatse van het Hollandsch Diep treedt aanslibbing op conform de waarnemingen in het prototype.
- De zand-slib overgang in de Nieuwe Merwede is gevoelig voor het aanbod van slib op de instroomrand van de Waal. Naarmate het aanbod afneemt schuift deze overgang stroomafwaarts.
- In de Boven-Merwede treedt een forse erosie op direct na het splitsingspunt. Deze erosie is mogelijk toe te schrijven aan de splitsingspuntrelatie, en aanbevolen wordt om het probleem op te lossen door een betere keuze van deze relatie.

- Aan het begin van de Oude Maas en de Dordtse Kil treden forse bodemdalingen op. Dit is naar verwachting eveneens toe te schrijven aan de splitsingspuntrelaties ter hoogte van de Oude Maas bij de Noord en bij de splitsing naar de Dordtse Kil. Een betere keuze van splitsingspuntrelaties zal naar verwachting het gedrag aanzienlijk kunnen verbeteren.
- De bodemveranderingen in het model zijn relatief ongevoelig voor het effect van 'hiding en exposure' en de laagdikte van de actieve laag. De hiding en exposure effecten spelen een geringe rol vanwege de relatief uniforme zandfracties in het Rijn-Maasmonding gebied. Ook de resultaten voor bodemsamenstelling zijn slechts in geringe mate gevoelig voor deze parameters. De invloeden van de kalibratiefactor voor het bodemtransport (Calfac), van het baggerwerk, en van de splitsingspuntrelaties zijn daarom maatgevend voor de betrouwbaarheid van de berekende bodemveranderingen.
- Een aanpassing van de resuspensiefactor van het zwevend-stof model heeft slechts een geringe invloed op de bodemligging. Vooral in de erosietrajecten in de benedenloop (zoals in Spui en Dordtse Kil) is sprake van een toename van de erosie van enkele millimeters per jaar. Dit leidt ertoe dat effecten van zand-slib-interacties niet uit de resultaten zijn af te leiden. Echter, omdat het model niet is gekalibreerd is het onzeker of de berekende resuspensie-fluxen correct zijn. Een nadere analyse (en toetsing aan metingen) van de uitkomsten van de zwevende-stofmodellering is gewenst om de orde van grootte van dit effect te verifiëren.

2.3.5 Overzicht van rekenresultaten

In Tabel 2.1 zijn resulterende trends in bodemveranderingen van 1990-2000 vergeleken voor berekeningsresultaten en waarnemingen uit Snippen et al. (2005). De bodemveranderingen uit DelWAQ (d.w.z. veranderingen van diepste punten in het dwarsprofiel) zijn vertaald naar breedtegemiddelde bodemveranderingen door deze te vermenigvuldigen met een factor 0,7. Uit de analyse van gemiddelde bodemligging en diepste punten in SOBEK-dwarsprofielen bleek dat deze verhouding een redelijke maat is om de berekende veranderingen met elkaar te vergelijken.

Tabel 2.1 Breedtegemiddelde bodemverandering per jaar berekend per tak, vergeleken met waarnemingen uit de studie van Snippen et al. (2005)

	Balans 1990-2000	DelWAQ Referen-tie som	DelWAQ met bagger-en	DelWAQ referen-tie met Calfac=2	SOBEK-RE zonder bagger-en	SOBEK-RE met bagger-en
	Meting	**bere-kend**	**bere-kend**	**bere-kend**	**bere-kend**	**bere-kend**
	cm/jaar	**cm/jaar**	**cm/jaar**	**cm/jaar**	**cm/jaar**	**cm/jaar**
Waal	-	0.9	0.0	1.9	2.2	0.0
Boven-Merwede	-3.8	1.8	-2.7	3.3	1.0	-2.5
Beneden-Merwede	-1.6	-0.3	-2.1	-3.9	0.2	-2.5
Nieuwe Merwede	-0.15	0.2	-1.1	0.3	0.2	0.7
Maas	-	1.0	0.5	1.7	0.6	0.2
Bergsche Maas	-2.1	0.1	-0.5	0.3	0.3	-6.8
Amer	1.9	0.5	-1.7	0.6	0.4	-21.0
Hollandsch Diep (Oost)	-0.9	0.9	0.8	0.9	0.5	0.5
Hollandsch Diep (West)	1.6	0.2	0.3	0.3	0.0	-0.2
Haringvliet	0.25	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0
Noord	-2.9	-2.9	-3.3	-7.1	-1.2	-1.4
Nieuwe Maas	0	0.9	0.9	0.8	1.4	1.4
Nieuwe Waterweg	0	1.1	1.1	3.6	0.5	0.6
Oude Maas (Oost)	0	-4.2	-8.0	-38.6	0.9	0.6
Oude Maas (West)	-4.5	-2.0	-1.9	-2.4	0.1	0.1
Spui	-1.8	-2.1	-2.0	-4.0	-	-
Dordtse Kil	-6.2	-3.7	-3.9	-5.6	-	-
Lek	-2.9	0.8	-0.8	1.4	0.6	-0.4

De getallen in de tabel bevestigen de eerder besproken waarnemingen. Vooral de invloed van het baggerwerk is van significant belang. Dit is bijvoorbeeld duidelijk het geval voor de Amer en de Merwedes. De daling van Spui, Dordtse Kil en Oude Maas is eveneens met een goede combinatie van baggerwerk en grootte van het transport te simuleren. Wel moet worden opgemerkt dat de gesimuleerde erosie niet gelijkmatig optreedt over deze takken, maar voor een deel geconcentreerd plaatsvindt. De invloed van splitsingspuntrelaties speelt hierbij wellicht een rol.

Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat in tegenstelling tot de SOBEK-RE morfologie module in SOBEK-River het nieuwe DelWAQ-morfologieinstrumentarium de morfologische toestand van de Rijn-Maasmonding (met aanwezige trends) op realistische wijze kan reproduceren. Wel moet voor een betrouwbare voorspelling het model in meer detail worden afgeregeld met behulp van goede gegevens van baggerwerk en een herziening van sedimentverdelingsrelaties op de splitsingspunten. Aanbevolen wordt deze aanpassing uit te voeren voordat wordt gestart met een verdere detaillering van processen.

2.4 Discussiebijeenkomst

Op 11 oktober 2006 heeft een discussiebijeenkomst plaatsgevonden waarbij een aantal belangrijke experts zijn geraadpleegd over de implementatie van zand/slib functionaliteit in het modelinstrumentarium.

De bijeenkomst vond plaats tijdens de fase van het project waarin belangrijke beslissingen moesten worden genomen ten aanzien van de verdere ontwikkeling van het modelinstrumentarium, vooral ten aanzien van de te kiezen ontwikkellijn. De uitkomsten van deze bijeenkomst zijn daarom belangrijk geweest bij de keuze voor implementatie via de DelWAQ-module, en de details van de methode. Bijlage D is het verslag van deze bijeenkomst gepresenteerd, waarin de meningen van de verschillende deskundigen zijn samengevat.

3 Implementatie en analyse Van Rijn transportmodel (Stap 1&2)

De morfologie van de Rijn-Maasmonding wordt in grote mate bepaald door de transporten van zowel zand als slib, en de onderlinge interacties ertussen. Om het gedrag van de morfologie en bodemsamenstelling te kunnen simuleren is daarom in eerste instantie het sedimenttransport model van Van Rijn (2007a,b,c), model TR2004, ingebouwd en zijn simulaties uitgevoerd. In tegenstelling tot andere (klassieke) transportformules houdt dit model rekening met het zand/slib gedrag. De betreffende formules zijn gepresenteerd in Bijlage E.4.5, en wordt beschreven op welke wijze deze zijn geïmplementeerd in de SOBEK-River versie. Het betreft de implementatie via de morfologiemodule van SOBEK-RE die is gekoppeld aan SOBEK-River, en is een vorm van de formule waarbij de effecten van golven zijn verwijderd. Dezelfde implementatie is vervolgens overgenomen in DelWAQ. Een vergelijkbare vorm van deze formule is ook opgenomen in Delft3D, maar daarbij is tevens de invloed van golven gehandhaafd. In Bijlage C.4 zijn daar de resultaten van simulaties met deze formules voor de Rijn-Maasmonding gepresenteerd. Voor een analyse van deze resultaten wordt verwezen naar paragraaf 2.3.

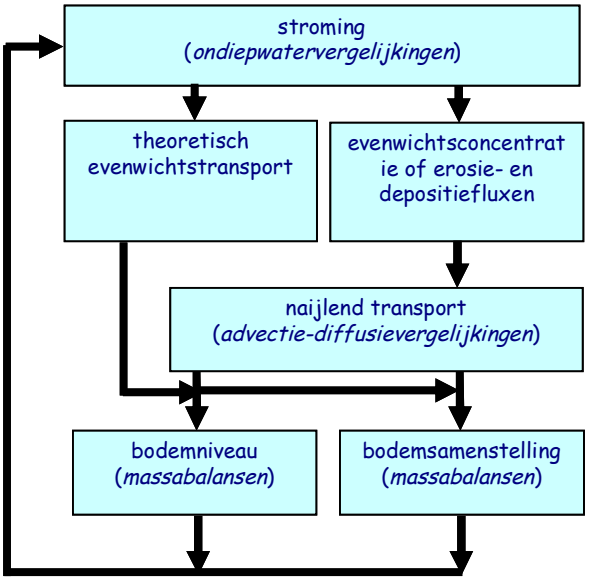
Het sedimenttransportmodel TR2004 van Van Rijn onderscheidt afzonderlijke relaties voor bodemtransport en voor zwevend transport. Gekozen is voor de multifractie-aanpak, waarbij het transport van afzonderlijke sedimentfracties wordt berekend. Deze is vooral geschikt voor sediment waarvoor geldt dat $D_{90}/D_{10} > 4$ en waarbij een opdeling in minimaal 6 tot 8 fracties wordt aanbevolen. Het model van Van Rijn onderscheid zich van andere transportformules doordat het een brede range aan korrelgrootteklasses beschouwt, inclusief de fijnste silt en kleifracties.

Omdat de betreffende transportformule ook de transportcapaciteit van zwevend sediment berekent, kan deze worden toegepast als voorspeller van de evenwichtsconcentratie van zwevend sediment. Deze wordt bijvoorbeeld toegepast in de Galappatti methode voor zwevend transport van zand (zie paragraaf 4.2 en Bijlage 0) of kan worden toegepast voor het formuleren van een entrainment/depositie term van zwevend sediment in het algemeen (voor alle sedimentfracties).

4 DelWAQ-morfologie in SOBEK-River (Stap 3a t/m 4)

4.1 Algemeen

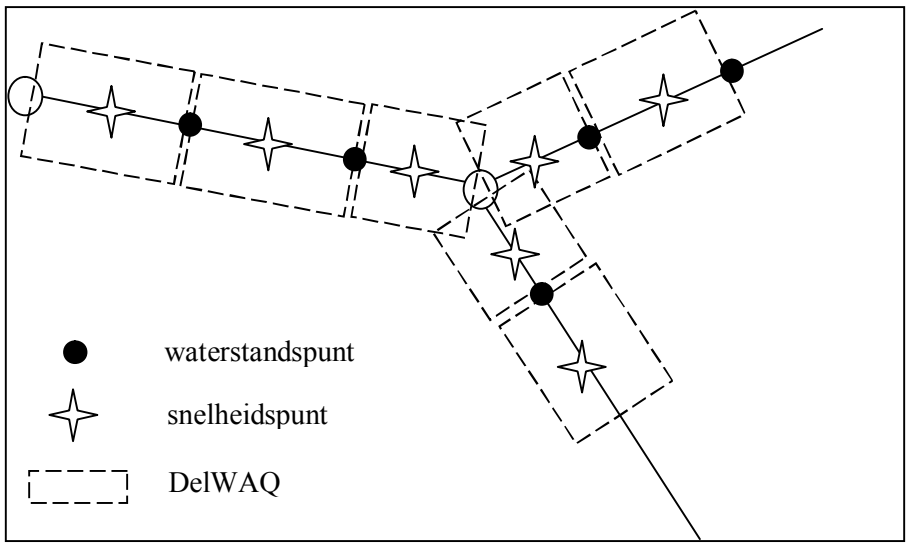
De rekenprocedure voor het simuleren van morfologie met bodem en zwevend transport van zand-slib mengsels kan worden beschouwd als een samenvoeging van de procedures voor bodem/totaal transport uit SOBEK-RE en voor zwevend transport in DelWAQ. In Figuur 4.1 is globaal aangegeven hoe de rekenprocedure is opgezet. Het schema toont dat op basis van het lokaal berekende stroombeeld het theoretische bodemtransport (transportformules) en concentraties en fluxen voor zwevend transport worden berekend. Vervolgens wordt via advectie-diffusieprocessen het na-ijlende transport van zwevend sediment gesimuleerd. Met behulp van massabalansen voor totaal sediment en per sedimentfractie kunnen de nieuwe bodemligging en bodemsamenstelling worden berekend. Met de nieuwe bodemligging kan opnieuw de waterbeweging (voor de volgende tijdstap) worden gesimuleerd, en het schema opnieuw worden doorlopen.



Figuur 4.1 Morfologische berekening in beoogde nieuwe modelsysteem (slib, zand en grind).

In bovengenoemde schema worden de aan sedimenttransport en bodemligging gerelateerde componenten via DelWAQ-processen gesimuleerd. De DelWAQ-module rekent met volumes op een afzonderlijk rekenrooster dat bestaat uit DelWAQ-segmenten (zie bijvoorbeeld Figuur 4.2). Een segment is een kleine rekencel die een klein stukje van de rivier weergeeft, met daarin een volume sediment en water (en eventuele andere stoffen). De rivierloop wordt geschematiseerd als een reeks van segmentjes die via “exchanges” (raakpunten) zijn gekoppeld, en waarbij dit water en sediment met elkaar kunnen uitwisselen via deze exchanges.

De volume-aanpak en flexibiliteit in elementen biedt de mogelijkheid DelWAQ toe te passen op willekeurige rekenroosters voor waterbeweging (zowel 1D als 2D). Door een "pointer-tabel" worden de segmenten onderling administratief aan elkaar verbonden.



Figuur 4.2 Schematische weergave van rekenrooster, met takken en knopen en de daarop gelegen rekenpunten (waterstandspunten, snelheidspunten en DelWAQ-segmenten)

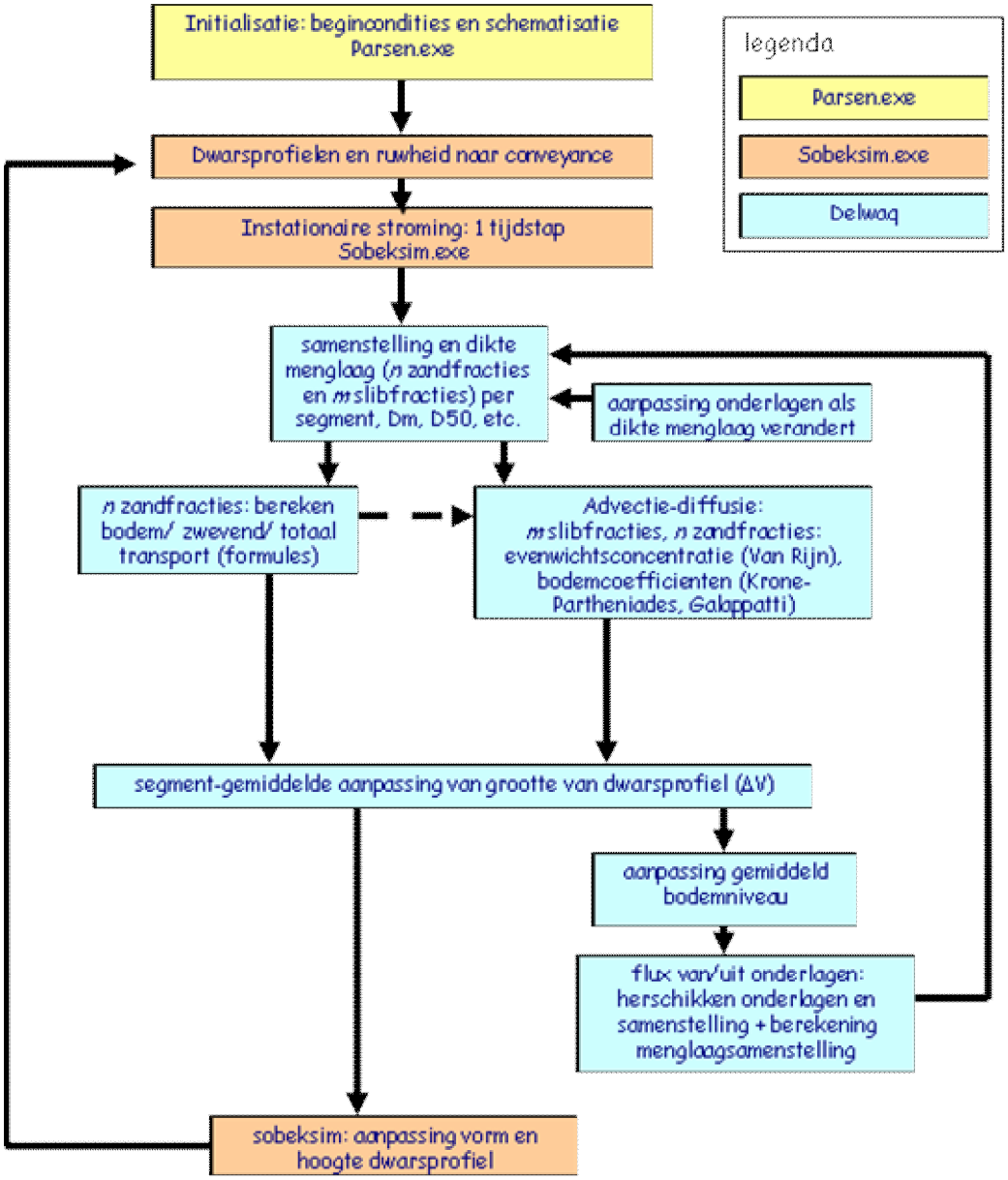
Via het koppelingsprogramma Wqinr worden vervolgens de SOBEK segmenten gerelateerd aan het SOBEK rekenrooster, en worden benodigde gegevens uit Sobeksim (snelheden, waterstanden, breedtes, etc.) doorgegeven naar de DelWAQ-segmenten. In de huidige opzet worden de grenzen van de DelWAQ-segmenten gedefinieerd op de waterstandspunten van het SOBEK rooster. In Figuur 4.2 is weergegeven hoe de roosters van Sobeksim en DelWAQ zijn gedefinieerd en gerelateerd. Overigens zijn in de gepresenteerde schematisatie de DelWAQ-segmenten als het ware (administratief) een halve cel verschoven met het oog op een opsplitsing in volumes ter plaatse van splitsingspunten/samenvloeiingen. Verder kunnen DelWAQ-segmenten ook groter worden gedefinieerd (en dus meerdere SOBEK rekencellen omvatten), maar voor de morfologieimplementatie is deze keuze vooralsnog niet meegenomen (vooral vanuit het oogpunt van stabiliteit en robuustheid van de numerieke oplossingsmethode).

Conform de reeds beschikbare modellering van zwevende stof in DelWAQ worden de belangrijkste sediment en bodem gegevens bepaald voor ieder DelWAQ-segment. Voor het bepalen van veranderingen in de segmenten zijn echter ook gradiënten in sedimenttransport nodig. Deze worden bepaald door ook de transporten op de segmentgrenzen af te leiden.

Voor de afbakening van de te bepalen functionaliteit is in eerste instantie uitgegaan van de volgende componenten/eisen:

- De nieuwe functionaliteit is bedoeld voor het simuleren van transportprocessen van zowel slib als zand en grind (en de onderlinge interacties).
- Toepassing van een stabiel rekenschema dat ook functioneert in situaties met transkritische en superkritische stroming (hoewel in eerste instantie wordt volstaan met een subkritische stroming).

- Keuze van generieke methode die ook in meerdimensionale situaties (SOBEK 2D flow, Delft3D, Waqua) kan worden toegepast. Voor meerdimensionale rekenmodellen zal het noodzakelijk zijn dat zowel transporten als bodemveranderingen in segment-centra worden uitgerekend.
- Ga uit van een multifractie-aanpak waarbij slib en zand (eventueel opgedeeld in *n* zand/grind klasses) als aparte 'stoffen' worden behandeld.
- Aanpassing van de dwarsprofielen vindt plaats in Sobeksim, zodat het niet noodzakelijk is de dwarsprofielen in DelWAQ-processen te importeren. DelWAQ rekent dan met een gemiddeld profiel.



Figuur 4.3 Opzet van morfologische functionaliteit in SOBEK-River (slib, zand en grind).

Figuur 4.3 toont het ontwerp voor de morfologische functionaliteit in SOBEK-River. In essentie stemt het overeen met het modelconcept van Van Ledden (2003). In de volgende sub-paragrafen zijn de details van dit schema in hoofdlijnen gepresenteerd. De uiteindelijke opbouw en beschrijving van de functionaliteit is gegeven in bijlage D.

4.2 DelWAQ-processen

In Figuur 4.3 zijn de processen aangegeven zoals die in DelWAQ zijn ingevoerd. Enkele aanvullende details ten aanzien van Figuur 4.3 zijn:

- Voor sedimentfracties kan onderscheid worden gemaakt in slib (1 of meer slibfracties) en zand (en grind) fracties (1 of meer zandfracties). Voor slib en zandfracties zijn afzonderlijke processen te gebruiken.
- Voor zwevende-stoffracties (slib en fijn zand) kan in het algemeen de reeds beschikbare Krone en Partheniades modellering worden toegepast, waarbij door middel van erosie en depositie termen de uitwisseling van sediment tussen bodem- en waterfase wordt gesimuleerd. Deze aanpak is reeds toegepast in DelWAQ-studies voor zwevende stof in de Rijn-Maasmonding (Meijers en Icke, 2006). De entrainment en depositie fluxen worden berekend met behulp van de verhouding tussen bodemschuifspanning en de kritische schuifspanning, en een empirische erosiecoëfficiënt per sediment fractie.
- Voor zand wordt voorgesteld in de toekomst gebruik te maken van een alternatieve combinatie van transportformules en de parametrisatie van het na-ijlingsgedrag (advectie-diffusie) volgens Galappatti (1983). De Galappatti aanpak dient te worden gecombineerd met de advectie-diffusie aanpak voor slib, waarbij de berekening zich onderscheid in de bodemtermen (erosie en depositie termen). De interactie tussen zand en slib moet alleen worden ingevoerd in de bodemtermen en de transportformules (erodeerbaarheid). Verder is slib van invloed op de opbouw van de bodem (consolidatieeffecten kunnen een rol spelen in het tijdsafhankelijke gedrag van samenstelling en dikte van onderlagen), maar vooralsnog is dit effect buiten beschouwing gelaten (het toegepaste lagenconcept biedt wel ruimte voor deze processen). De modelconcepten van Van Ledden (2003), ten aanzien van erodeerbaarheid van de bedding, zijn in bovengenoemde interacties meegenomen (zie bijlage E.5.3).
- De Galappatti methode (Galappatti, 1983, Galappatti en Vreugdenhil, 1985) is gebaseerd op een asymptotische benadering van de oplossing van de advectie-diffusievergelijking. Het model beschrijft de dieptegemiddelde sedimentconcentratie met behulp van de volgende relatie:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \frac{L_a}{T_a}\frac{\partial C_s}{\partial x} = \frac{C_{se} - C_s}{T_a} \tag{4.1}$$

waarin

C_s = dieptegemiddelde sedimentconcentratie
C_{se} = evenwichtsconcentratie
L_a = aanpassingslengte
T_a = aanpassingstijd

- In het Galappatti model worden regressierelaties toegepast voor het bepalen van de aanpassingstijd. Voor de implementatie is gekozen voor de relaties die zijn afgeleid met behulp van de gradient-type randconditie. In dit geval geldt bij benadering dat $L_a = u \cdot T_a$ met u is de gemiddelde snelheid.
- Voor de verdeling van bodemtransport op splitsingspunten is gebruik gemaakt van een verdelingsfunctie waarbij de ratio van transporten in de benedenstroomse taken een machtfunctie is van de afvoerverdeling en de breedteverhouding van de takken.
- Voor versnellen van morfologische berekeningen wordt gebruik gemaakt van de morfologische factor. Hierbij wordt de morfologie berekend met de tijdstap van de waterbeweging, maar om tegemoet te komen aan de verschillen in tijdschaal wordt de morfologische verandering op elke tijdstap vermenigvuldigd met een factor.
- Reken met de volgende bodemtransportformules:
  - Uniform sediment (1 fractie): Meyer-Peter en Müller (1947), Engelund en Hansen (1959), Van Rijn 1984, Van Rijn TR2004 (2007), User Defined
  - Gegradeerd sediment (meerdere fracties, per sedimentfractie): Meyer-Peter en Müller (ME1, ME2), Ashida en Michiue, Wu, Van Rijn TR2004 (2007)

Voor schematisatie en simulatie van de ondergrondsamenstelling is gekozen voor de optie die ook in SOBEK-RE en Delft3D voor gegradeerd sediment wordt toegepast. Hierbij wordt een boekhouding van verschillende sedimentlagen bijgehouden: een transportlaag, een uitwisselingslaag, en aantal onderlagen. Beschikbaarheid van bepaalde korreldiameters is in dit concept afhankelijk van de samenstelling van de transport laag. De dikte van de transport- en uitwisselingslagen kan afhankelijk zijn van de stromingscondities. Het bijwerken van de samenstelling van de verschillende lagen gebeurt in de transportmodule. De onderlagen zijn vast gedefinieerd ten opzichte van een referentieniveau, en hebben een constante dikte. Aan de onderzijde en bovenzijde kunnen onderlagen tijdens de simulatie worden toegevoegd of verwijderd (bijvoorbeeld als door sedimentatie de bodemligging over een hoogte van meerdere laagdiktes stijgt). Momenteel wordt aan de Universiteit Twente/Delft m.b.v. fundamenteel onderzoek een nieuw concept ontwikkeld met een continuüm beschrijving voor de transportlaag (o.l.v. Astrid Blom).

Overigens zijn in DelWAQ en Delft3D alternatieve concepten beschikbaar voor de sedimenthuishouding in de bodem. Deze zijn echter niet toegepast voor de nieuwe morfologie implementatie, omdat daarmee onvoldoende flexibiliteit beschikbaar was voor de beoogde gegradeerd sediment implementatie:

- In DelWAQ zit reeds een concept met twee bodemlagen: suspensie en erosie van sediment vindt plaats vanuit laag 1 voor zover daarin sediment beschikbaar is. Wanneer in de eerste laag geen materiaal meer aanwezig is, wordt sediment uit de tweede laag gehaald. Dit gebeurt voor elke stof/sediment fractie afzonderlijk. Er is dus geen interactie tussen de sediment fracties; een hoeveelheid sediment van fractie A in de eerste sediment laag blokkeert niet de resuspensie van sediment van fractie B uit de tweede laag.
- Een vergelijkbaar N-laags concept voor DelWAQ is eveneens beschikbaar. In tegenstelling tot het N-laags concept in SOBEK-RE en Delft3D is de positie van de onderlagen gekoppeld aan de bodemligging. Door aanzanding en erosie verschuiven de lagen, waarbij echter de fracties worden herverdeeld.

- Een alternatieve onderlagen-implementatie welke ook is toegepast in het model van Van Ledden (in Delft3D) is die waarbij de bodemsamenstelling wordt berekend op een 1DV grid dat meebeweegt met het bodemoppervlak. Deze is in essentie vergelijkbaar met de bovengenoemde N-laags implementatie in DelWAQ, maar biedt extra flexibiliteit in het tijdsafhankelijke gedrag van lagen (bijvoorbeeld onder invloed van consolidatie of bio-perturbatie).

De DelWAQ-module genereert in principe de volgende resultaten:

- De volumeverandering (sedimentatie en erosie) in een segment;
- De aanpassing van het onderlagenmodel (update van laagdikte, samenstelling per laag, ligging van de lagen ten opzichte van een vast referentie niveau);
- De gemiddelde bodemligging, en korreldiameters zoals berekend in DelWAQ.

De volumeverandering wordt doorgegeven aan SOBEK-River hydrodynamische module. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van een online koppeling welke is beschreven in de volgende paragraaf.

4.3 Online koppeling SOBEK-River

De berekening van de waterbeweging en de morfologie vindt alternerend plaats: op basis van de morfologie worden de dwarsprofielen aangepast hetgeen een nieuwe waterbeweging oplevert die vervolgens de morfologie beïnvloedt. In principe vindt deze terugkoppeling op iedere hydrodynamische tijdstap plaats. Deze interactie tussen modules vindt plaats door een “online” koppeling: de programma’s Sobeksim (waterbeweging), Wqinr (koppelingsprogramma) en DelWAQ2 (waterkwaliteits/morfologie module) communiceren met elkaar d.m.v. berichtjes en data via geheugen dan wel via bestanden (DelftIO).

De uitvoer van DelWAQ-sedimentatie en erosie wordt in Sobeksim vertaald naar de profielen, waarna de volgende tijdstap van de hydraulische berekening kan worden opgestart.

In Sobeksim wordt de initiële waterbeweging uitgerekend, waarna de controle wordt overgegeven aan het DelWAQ-interface programmaWqinr die de voorbewerking doet voor DelWAQ met de afvoeren/snelheden via his-file verkregen van Sobeksim. Vervolgens wordt controle gegeven aan DelWAQ2 die aan de slag gaat met de van Wqinr verkregen gegevens. DelWAQ2 tenslotte schrijft de berekende toename van het volume (deltaVol) naar een bestand voor Sobeksim en geeft de controle over.

De dwarsprofielen in het Rijn-Maasmonding model zijn van het type “tabulated”. Dat betekent dat deze zijn geschematiseerd als een breedte als functie van niveau in de vorm van een tabel. De verdeling van de bodemverandering vindt plaats door middel van een proportionele verdeling van de aanzanding of erosie naar rato van het niveau (diepste punten veranderen het meest). De aanpassing wordt alleen over het deel van het dwarsprofiel verdeeld dat als transporterende breedte is gedefinieerd. In de huidige implementatie is verondersteld dat deze gelijk is aan de breedte van het zomerbed (deze wordt afgeleid uit ruwheidssectie voor “main channel”).

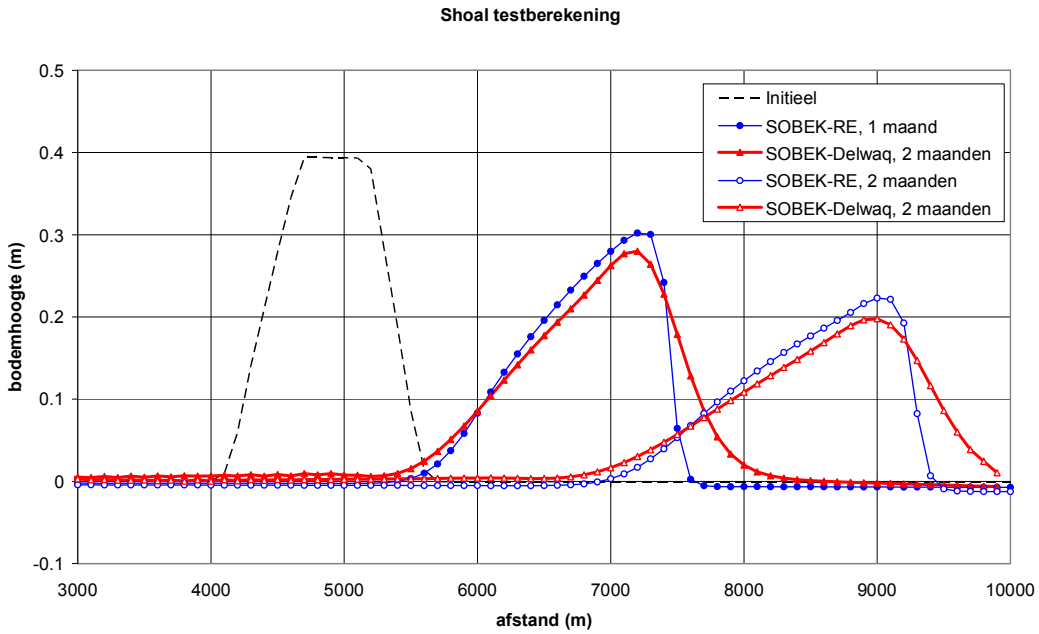
Voorzien wordt dat in de toekomst ook gerekend zal worden met y,z-profielen. Het betreft dan een tabel van hoogte als functie van afstand tot de oever. Voordeel hiervan is dat de conversie naar dwarsprofielen vanuit GIS-bestanden eenvoudiger is. De verdeling van sediment over deze profielen vraagt mogelijk wel een aangepaste aanpak (bijvoorbeeld een verdeling op basis van conveyance).

4.4 Numerieke aspecten

Voor de oplossing van het stelsel hyperbolische vergelijkingen voor waterbeweging en morfologie moet gebruik worden gemaakt van een robuust, stabiel en nauwkeurige numerieke oplosmethode. De oplossing van het stelsel kenmerkt zich door een aantal golven die (onderling beïnvloedend) door de rivier verplaatsen en daarbij dempen of groeien, met versteilende of verflauwende fronten. Morfologische modellering stelt hoge eisen aan de numerieke methode. De sterk niet-lineaire interactie tussen waterbeweging en sediment transport leidt ertoe dat afbreekfouten en onnauwkeurigheden snel kunnen leiden tot oscillaties en instabiliteit van bepaalde golven. Een aantal belangrijke aspecten bij de keuze van het numerieke schema zijn:

- Gebruik wordt gemaakt van een versprongen rooster
- Robuustheid van numerieke oplossing is belangrijk
- Ontstaan van schokken (scherpe fronten) mag niet leiden tot oscillaties.
- De numerieke methode moet in staat zijn (of eenvoudig geschikt te maken zijn) voor de overgang naar morfologie in superkritische stroming.
- Gewaakt moet worden dat massabehoud wordt gerealiseerd (er mag geen sediment verdwijnen of bij komen tengevolge van afbreekfouten e.d.).
- Omdat de morfologie en waterbeweging zijn ontkoppeld is het onder andere niet mogelijk zeer scherpe (schok-)fronten op een rekenrooster, bijvoorbeeld met TVD-rekenschema's, te reproduceren. De fronten worden "uitgesmeerd" over enkele rekencellen. In principe kan voor de morfologie worden gerekend met een ander schema dan voor waterbeweging.

Gekozen is om gebruik te maken van een eerste-orde "upwind" numeriek schema, zowel voor de morfologische veranderingen als voor de bodemsamenstelling. De "upwind" methode maakt gebruik van de stroomrichting om sedimentfluxen voor een rekencel vast te stellen.



Figuur 4.4 Numerieke testberekening van een zandbank (shoal)

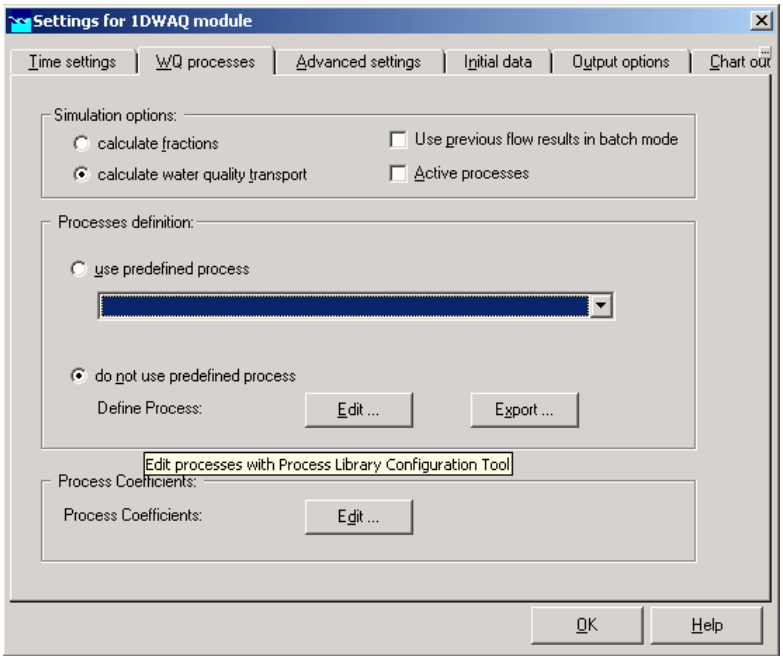
De gekozen aanpak heeft als eigenschap dat deze eerste-orde nauwkeurig is in ruimte en tijd. Dit leidt ertoe dat de lokale afbreekfout kan worden beschouwd als een diffusieterm, en de oplossingen enigszins uitgesmeerd kunnen zijn. Dit verschijnsel is waarneembaar ter plaatse van sterke sprongen en schokken in de oplossing, zoals het geval is in de simulatie in Figuur 4.4. Het front van de zandbank wordt in dit voorbeeld met het numerieke schema van DelWAQ verspreid over orde 8 roostercellen. In de oude SOBEK-RE morfologie module was sprake van een meer geavanceerd maar aanzienlijk complexer numeriek schema waarbij de bovengenoemde diffusieterm wordt gedoseerd afhankelijk van de noodzakelijke demping van numerieke oscillaties ter plaatse van fronten en schokken. Verwacht wordt dat in het kader van het ontwikkelingstraject van SOBEK-River de numerieke oplossingsmethode verder zal worden verbeterd.

4.5 Gebruiksaspecten

Voor de in- en uitvoer van de nieuwe morfologie module wordt gebruik gemaakt van de User Interface van SOBEK-River en van DelWAQ. De gebruikers die bekend zijn met deze modules en bijbehorende interfaces zullen daarom snel hun weg kunnen vinden in de software. Desondanks is in dit project slechts een beperkte inspanning geleverd in gebruiksgemak. Dit heeft ertoe geleid dat het bouwen van een morfologiemodel nog relatief veel ‘klik-werk’ vraagt. In de toekomst (rond 2008, als onderdeel van het joint-venture ontwikkelproject van WL en RIZA) zal dit echter worden opgelost door het bieden van voorgeprogrammeerde processen, en aangepaste invoerschermen. In het vervolg van deze paragraaf wordt beknopt aangegeven hoe de gebruiker, uitgaande van een hydraulische schematisatie, met behulp van de huidige user-interface het model kan uitbreiden met morfologie.

Voor het aanschakelen van de morfologiemodule wordt in het “settings” blok de combinatie 1DFLOW(River) en 1DWAQ geselecteerd.

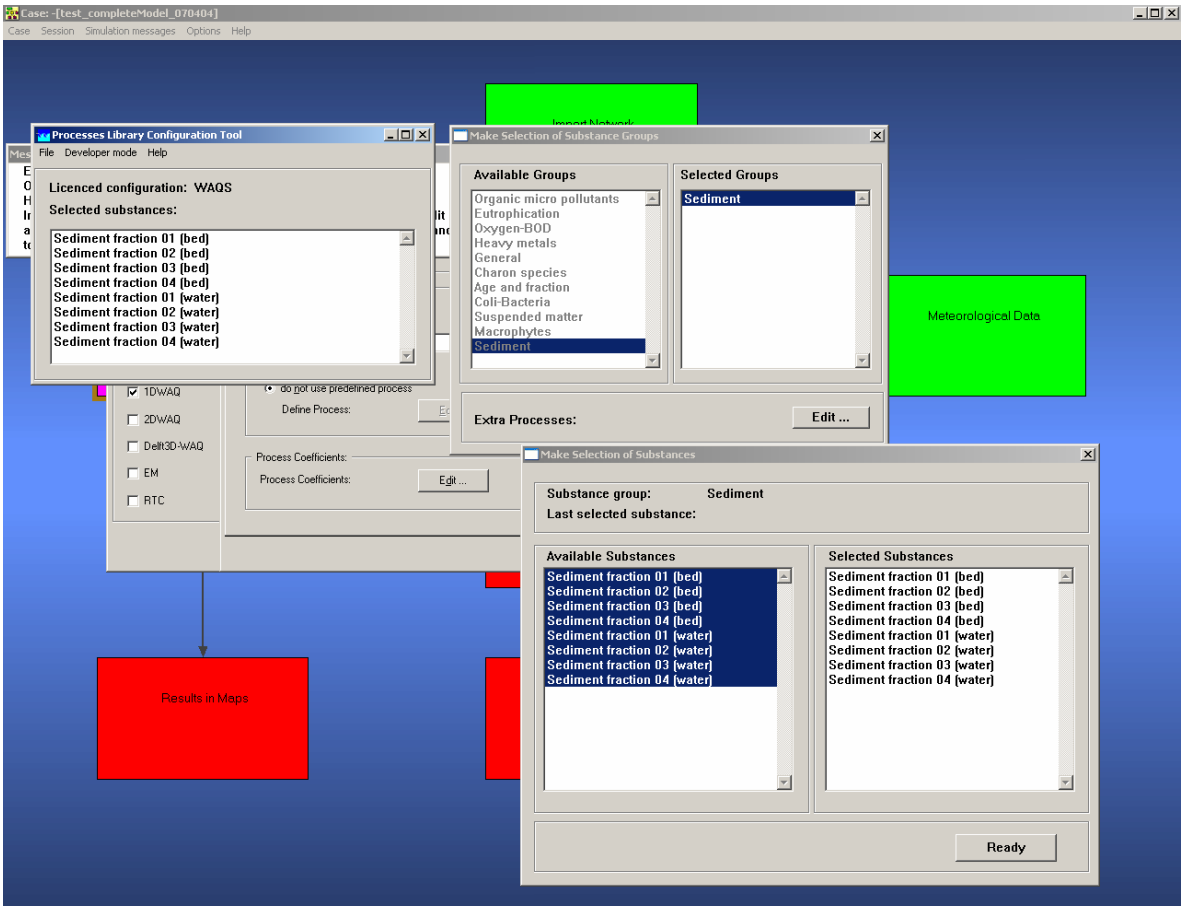
Vervolgens wordt door selectie van de “edit” button bij 1DWAQ het “Settings for 1DWAQ module” geopend. In Figuur 4-1 is het betreffende scherm getoond. De gebruiker selecteert hier “calculate water quality transport”. Vervolgens kan worden geselecteerd of gebruik kan worden gemaakt van een “predefined process”of om zelf processen te definiëren. In de hierna volgende beschrijving wordt uitgegaan van de methode waarbij zelf de processen worden geselecteerd en geactiveerd. Echter, voor het gebruiksgemak van deze interface zijn reeds een aantal veel gebruikte combinaties van processen voor morfologie ingebracht (deze zijn vervolgens nog wel aan te passen aan specifieke modelsituaties).



Figuur 4-1 Invoerscherm DelWAQ-processen,”Settings for 1DWAQ module”

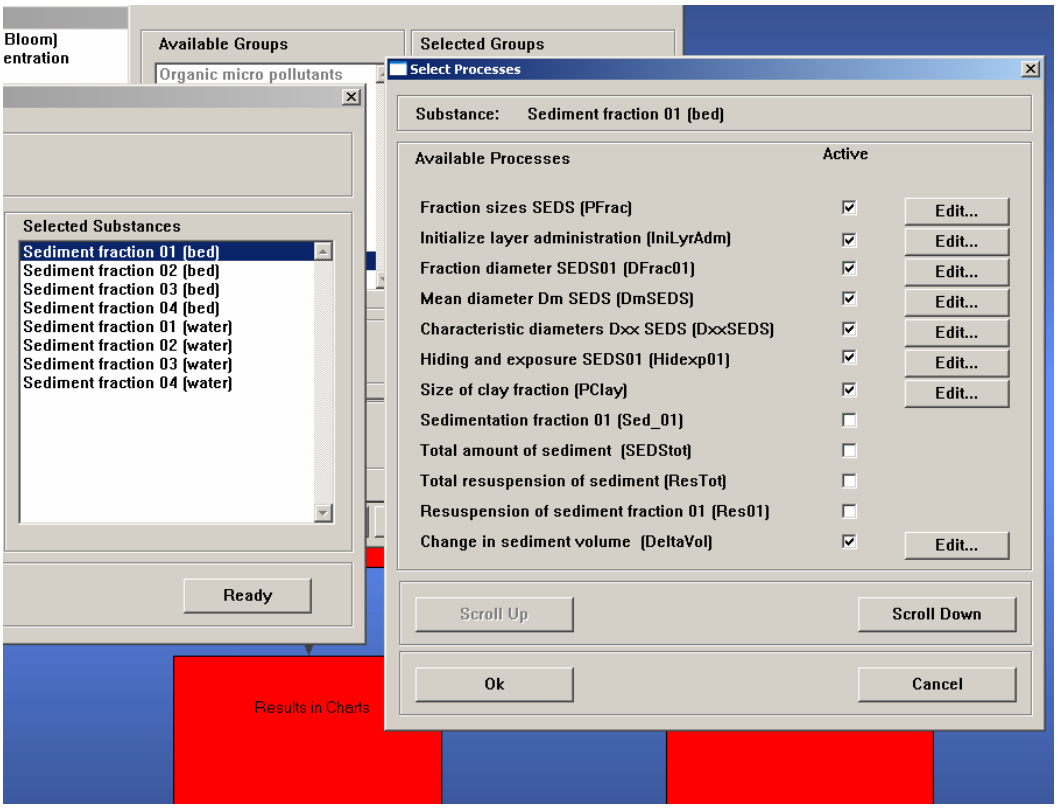
Wanneer in bovengenoemde scherm bij “Define Process”de “edit” button wordt geselecteerd zal het selectiescherm voor processen in DelWAQ worden geopend (Process Library Configuration Tool). Dit invoergereedschap wordt gebruikt voor alle waterkwaliteitsprocessen.

Figuur 4-2 toont het betreffende scherm in de SOBEK User Interface voor de selectie “Sediment”. Voor morfologische berekeningen wordt alleen deze groep “Sediment” geactiveerd, waarna vervolgens een scherm verschijnt voor het selecteren van ‘substances”.



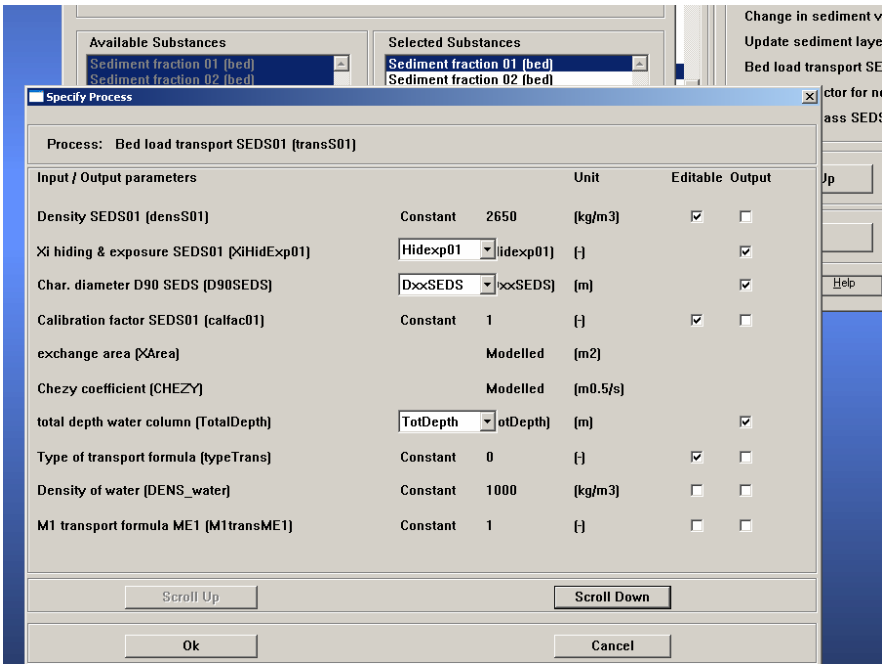
Figuur 4-2 Invoerscherm DelWAQ-processen, selectie van “substances” voor sediment en morfologie

Door in bovengenoemde scherm “Make selection of substances” (“Available Substances”) de gewenste sedimentfracties te selecteren kunnen deze worden geactiveerd. In bovengenoemde figuur kan slechts voor 4 korrelgroottefracties worden gekozen (opgedeeld in sediment in de bodem en sediment in suspensie). Vervolgens wordt door selectie van een fractie (“Selected substance”) in het rechterdeel van dit scherm een extra scherm geopend waarmee processen kunnen worden geactiveerd, en waarmee toegang wordt geboden tot een keuzemenu voor invoerparameters voor de geselecteerde processen (Figuur 4-3).



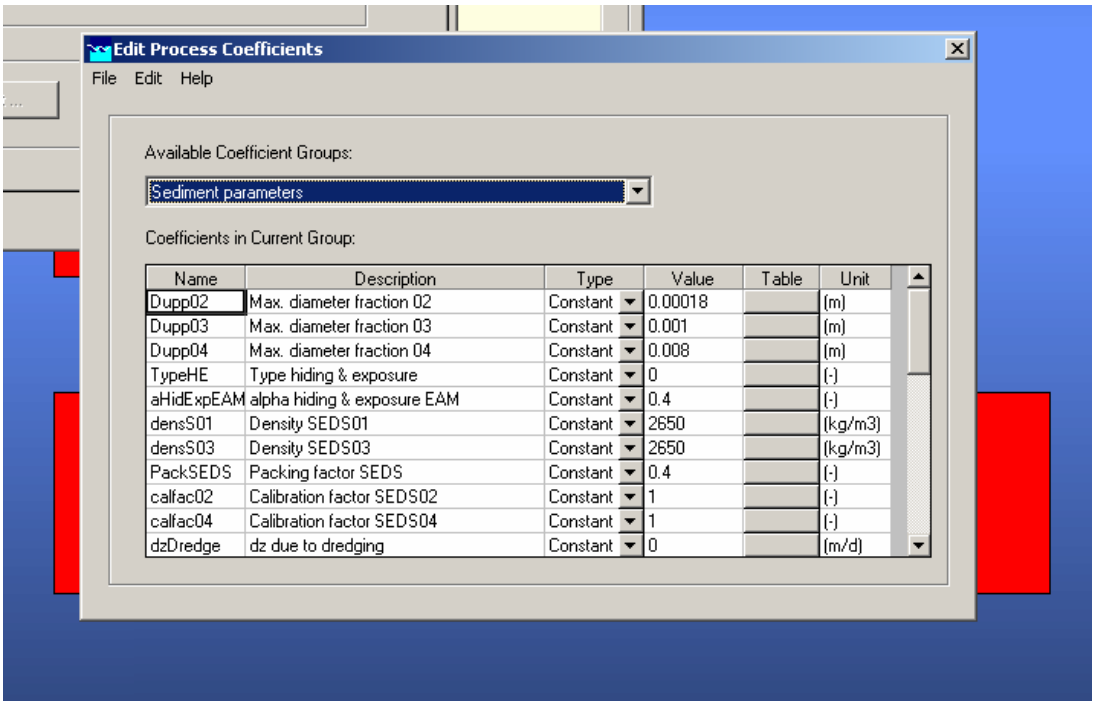
Figuur 4-3 Invoerscherm DelWAQ-processen: processen activeren en bewerken

De keuze ‘edit’ biedt toegang tot een afzonderlijk bewerkingsscherm voor invoerparameters van het geselecteerde proces. In Figuur 4-4 is bijvoorbeeld het scherm gepresenteerd voor selectie van variabelen en constanten in de transportformule voor bodemtransport. Door het aanvinken van vakje onder “editable” wordt het mogelijk de betreffende parameter handmatig in te voeren (anders wordt gebruik gemaakt van defaultwaarden). Deze handmatige invoer vindt overigens later plaats via het settings scherm van de SOBEK interface. Tevens kan worden geselecteerd of betreffende parameter als uitvoer beschikbaar moet komen.



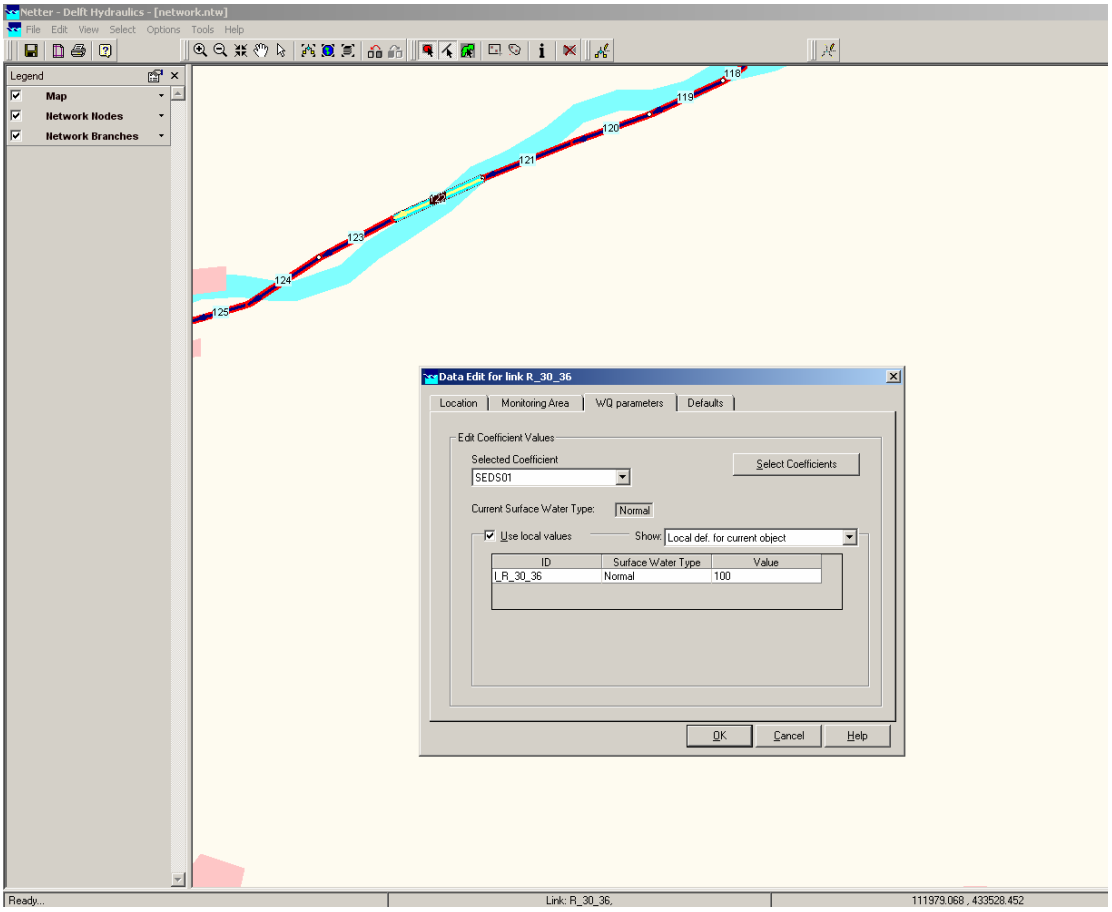
Figuur 4-4 Invoerscherm DelWAQ-processen: voorbeeld invoerscherm bij proces voor bed-load transport

Nadat in bovengenoemde invoerschermen de keuzes voor alles processen zijn geselecteerd, kan de Process Library Configuration Tool worden afgesloten, en kan terug worden gekeerd naar het scherm “Settings for 1DWAQ module” (Figuur 4-1). Door nu de button “Edit” Process coefficients te selecteren is het mogelijk de verschillende parameters en constanten, die eerder als “editable” zijn geselecteerd, te veranderen.



Figuur 4-5 Invoerscherm DelWAQ-processen: edit process coefficients

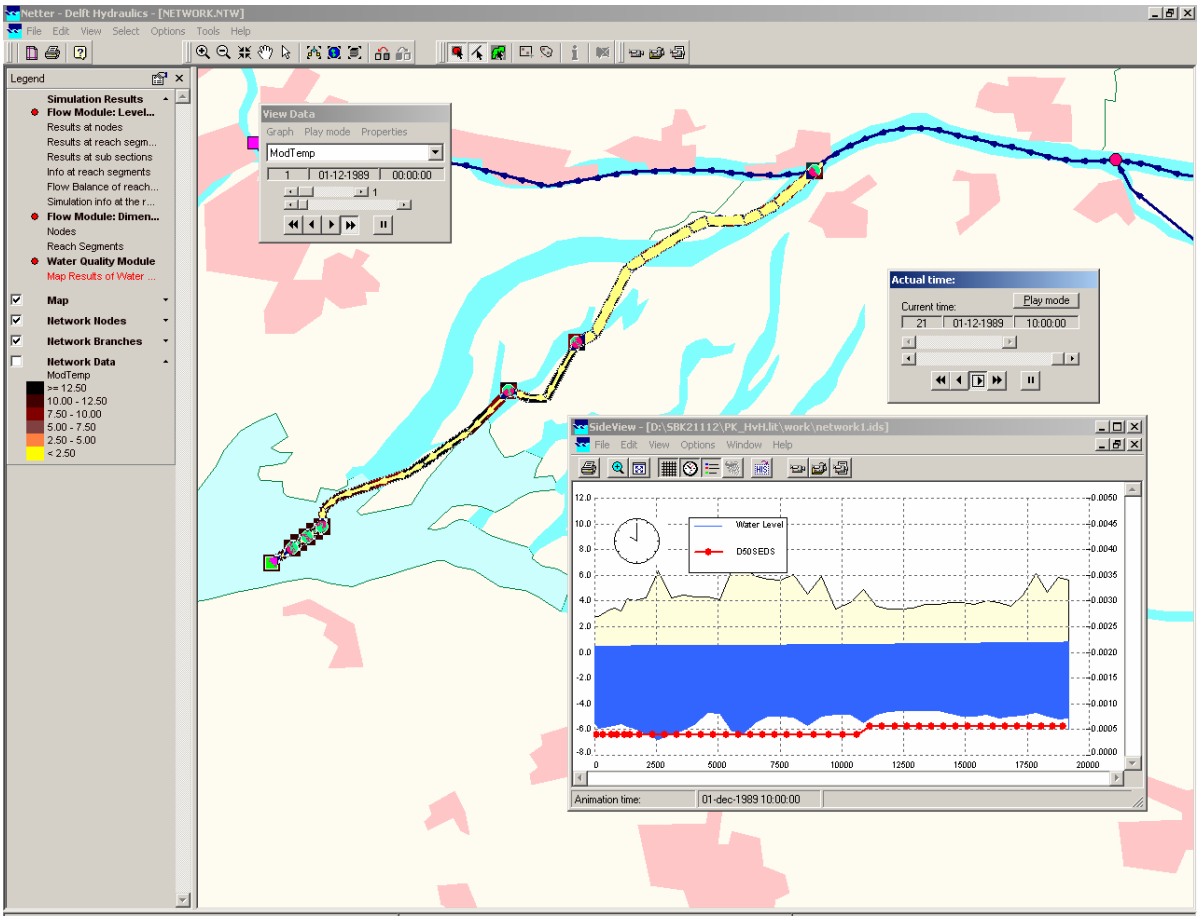
Bij bovengenoemde invoer geldt verder dat het type kan worden gewijzigd in “Table” waardoor eventueel tijdsafhankelijke waarden kunnen worden geselecteerd. Overigens is het ook mogelijk ruimtelijk variërende waarden in te voeren, door gebruik te maken van het “netter” schematisatie scherm. Een voorbeeld hiervan is gepresenteerd in Figuur 4-6 voor een willekeurig geselecteerd segment. Overigens kan deze ruimtelijk variërende invoer ook door middel van invoerbestanden worden aangemaakt.



Figuur 4-6 Invoerscherm DelWAQ-processen: ruimtelijke variaties in process-coefficients in Netter

Tenslotte moet in het settingsscherm voor 1DWAQ ook initiële condities worden ingevoerd voor de relevante variabelen (zoals suspensie concentratie, bodemsamenstelling, etc.).

De uitvoer van de morfologiemodule kan op gebruikelijk wijze via ODSVIEW of via Netter worden bekeken (zie Figuur 4-7). het betreft de uitvoer van DelWAQ. De uitvoer van bodemveranderingen wordt door Sobeksim in een bestand morpmap.his geschreven. Deze is (nog) niet met Netter te openen omdat daarin een koppeling ontbreekt met de uitvoerlocaties in mormap.his en het grid in Netter.



Figuur 4-7 Uitvoerscherm DelWAQ-processen: weergave van uitvoer in Netter

De rekentijd van een morfologische berekening wordt in de gerealiseerde implementatie vooral bepaald door de uitwisseling van gegevens tussen DelWAQ en flow via bestanden. De rekentijd voor een morfologische periode van 1 jaar bedraagt minder dan 2 uur voor het Rijn-Maasmonding model (berekeningen voor een periode van 10 jaar duren tussen de 10 en 12 uur op een normale PC). De verder ontwikkeling van de morfologiemodule in DelWAQ (als onderdeel van het ontwikkelproject van WL en RIZA) voorziet in een versnelling van de berekeningen door gegevensuitwisseling via computergeheugen in plaats van bestanden.

5 Discussie

5.1 Betrouwbaarheid van het 1-D modelinstrumentarium

Gerealiseerd moet worden dat het model eendimensionaal is, een daardoor niet geschikt voor effecten op de schaal van de rivierbreedte (veranderingen in dwarsprofiel e.d.). De processen en resultaten van het model bieden wel inzicht in het gedrag van het systeem over grotere ruimteschalen (minimaal orde enkele kilometers) en tijdschalen in de orde van verscheidene jaren en langer. Het is daarom bedoeld voor het onderzoeken van trends en grootschalige effecten die het gevolg zijn van lokale ingrepen in het systeem.

Tot zover is het model nog maar in beperkte mate gekalibreerd en gevalideerd. Enerzijds speelt hierbij de onnauwkeurigheid van het hydraulische model een rol, anderzijds de beperkte beschikbaarheid van gegevens voor een gedetailleerde morfologische kalibratie (vooral historisch baggerwerk, samenstelling van bedding en ondergrond, en sedimentverdeling over de takken). Voor de betrouwbaarheid van het model is een gedegen kalibratie gewenst, gevolgd door een verificatie, waarbij de maximaal haalbare nauwkeurigheid wordt bepaald door de beschikbare gegevens. Aanbevolen wordt naast de verdere verbetering van modelconcepten (proceskennis) ook aandacht te schenken aan de gegevens en de daarmee uit te voeren kalibratie. Desondanks kan het model reeds worden ingezet voor nadere analyse van de gevoeligheden in het systeem voor de geïmplementeerde elementen (bijvoorbeeld zand-slibinteracties, uitwisselingsprocessen met bedding, etc.).

5.2 Noodzakelijke elementen

De integratie van morfologische processen in de DelWAQ-module in SOBEK-River heeft geleid tot een nieuw instrumentarium dat volledig is afgestemd op morfologische simulaties voor het Rijn-Maasmondinggebied. De berekeningen, technische beschrijving en discussies uit voorgaande hoofdstukken geven aan dat voor een goede beschrijving van de morfologische processen, en een betrouwbare toepassing voor het beheer, de volgende elementen relevant zijn:

- Een goede waterbeweging is een essentiële basis voor een betrouwbare simulatie van transport en morfologie. Voor het Rijn-Maasmondingmodel is het relevant dat dwarsprofielen en taklengtes correct zijn geschematiseerd, hetgeen op dit moment nog niet het geval is. Verder wordt het verval over de Maeslantkering en Haringvlietsluizen nog niet correct berekend, en moeten sprongen in hydraulische ruwheid worden verwijderd (deze leiden namelijk ook tot ongewenste morfologische veranderingen). De optimale aanpak om te komen tot een betere waterbeweging bestaat uit een herziening van de schematisatie gevolgd door een herkalibratie van de waterbeweging op basis van meetdata (passende bij het jaar van opname van de dwarsprofielen).
- De sedimentvoerende (morfologische) breedte is nog niet geheel juist in de simulaties ingevoerd. Voor het laatste mag misschien nog onderscheid worden gemaakt tussen delen van dwarsprofiel waar wel morfologische effecten optreden door aanslibbing van zwevende stof, maar niet door bodemtransport (bijvoorbeeld oeverzones en bergende breedte), en delen waar zowel bodemtransport en zwevende stof bijdragen aan morfologische veranderingen (het zomerbed).

- Opsplitsing van sediment in korrelgrootteklasses, met minimaal afzonderlijke klasses voor grof zand, fijn zand en slib, is essentieel gezien de overgangen in sedimenttypen in het modelgebied.
- Toepassing van een zwevende-stofmodellering is nodig waarbij concentraties zich over grote afstanden aanpassen onder invloed van advectie-diffusieprocessen. Het aanbod van zwevende stof op de instroomranden (vooral tijdens hoogwater), en de verspreiding door de takken, bepaalt sterk waar het fijne sediment zich in het systeem bevindt. Daarbij wordt de zwevende-stofmodellering toegevoegd aan de bodemtransport-modellering voor de grovere fracties (m.b.v. transportformules). De verspreiding van het fijne sediment (spoeltransport) door het model kan niet correct met alleen een transportformule (totaal-transportmodel, zoals Van Rijn) worden gesimuleerd.
- Onderscheid in zand en slib (en combinaties) voor het simuleren van erosie en depositie van de bodem is noodzakelijk. Bij de uitwisseling van sediment aan de bodem spelen ook 'hiding en exposure' van sediment en menging (verticale uitzeving) onder invloed van beddingvormen een rol. Speciale aandacht is nodig voor kalibratie van de zand-slib overgangen, onder andere in de Nieuwe Merwede.
- De numerieke afhandeling van het transport ter plaatse van kunstwerken verdient nadere aandacht in de toegepaste modelconcepten (bijvoorbeeld Haringvlietsluizen). Overwogen kan worden om het sediment (deels) te blokkeren.
- Baggerwerk speelt een dominante rol in waargenomen bodemveranderingen. Vanwege de grote baggervolumes is het gewenst meer details over de locaties, tijdstippen en volumes in het model te brengen voor de kalibratieperiode.
- De niet-erodeerbare laag in de buitenbocht van Sint Andries kan worden gesimuleerd met het concept van Struiksma (1999), onder andere beschreven in Sloff et al. (2006).
- Uitwisseling van sediment tussen waterfase (zwevende stof), bedding (actieve laag) en onderlagen bepaalt het tijdsafhankelijke gedrag van de bodemsamenstelling. Vooral laagdikte speelt hierbij een grote rol. Bijvoorbeeld een dikke actieve laag leidt tot een langzamere gedempte respons van bodemsamenstelling op de afvoerveranderingen. Vanwege onzekerheden in de gebruikte concepten, en het ontbreken van bruikbare gegevens (bijvoorbeeld tijdsafhankelijke ontwikkeling van gemiddelde bodemsamenstelling gedurende een afvoergolf) worden de laagdikte en eventueel gerelateerde parameters beschouwd als kalibratieparameters.
- Achterliggende modelconcepten voor sedimenttransport en entrainment van zand-slibmengsels zijn veelal gebaseerd op kleinschalig procesonderzoek in laboratoriumgoten. In de grootschalige toepassing waarop het model is gebaseerd spelen echter ook middelingen van ruimtelijke variabiliteit een rol. Zo kan middeling van de bodemsamenstelling in een dwarsprofiel, met zand in de buitenbocht en slib in de binnenbocht, ertoe leiden dat een hoge erosiebestendigheid wordt berekend ondanks de aanwezigheid van erodeerbare delen in het dwarsprofiel. In de praktijk leiden dergelijke effecten tot aangepaste kalibratiecoëfficiënten in de gebruikte formules.
- De morfologie in het door de zouttong beïnvloede gebied kan niet met grote betrouwbaarheid worden gesimuleerd in een 1-D model. Aangenomen wordt dat gedetailleerde driedimensionale stromingsprocessen een grote rol spelen bij de sedimentatie en resuspensie van het slib. Voor details van de aanslibbing en slibverspeiding in gebieden met een zouttong moeten daarom andere modellen worden ingezet. Desondanks wordt verwacht dat het grootschalige gedrag (eventueel met iets aangepaste entrainment- en depositietermen) in ruwe vorm kan worden gesimuleerd.

Daarnaast zijn er op dit moment ontwikkelingen gaande waarbij de SOBEK- en Delft3D-rekenmodules worden geïntegreerd met het oog op interactie tussen waterkwaliteitsprocessen, zout en stromingsaspecten. Deze aanpak kan in de toekomst gebruikt worden om het effect van de zouttong in een Delft3D-model te koppelen aan het 1D instrumentarium.

Met de gekozen morfologie-implementatie in DelWAQ en SOBEK-River is een instrument beschikbaar gekomen dat vrijwel alle bovengenoemde elementen bevat, of op zijn minst daardoor de mogelijkheid tot uitbreiding biedt.

5.3 Toepasbaarheid voor beheersvragen

Het modelinstrumentarium zal worden toegepast voor het beantwoorden van beheersvragen in het Rijn-Maasmondinggebied. De belangrijkste vragen zijn in paragraaf 1.1 geïntroduceerd. Daarbij is onderscheid gemaakt in termijn grootschalige veranderingen op lange termijn, en de korte-termijnontwikkelingen. Voor de lange-termijnontwikkeling is vooral van belang dat de water- en sedimentverdeling over de takken correct wordt gesimuleerd (om een accumulatie van fouten en instabiel gedrag te voorkomen). Voor de korte-termijnontwikkelingen zijn ook de tijdsafhankelijke lokale veranderingen van belang. Voor deze effecten is het van belang dat de grootte van de sedimenttransporten (en daarmee de snelheid van morfologische veranderingen) juist wordt gesimuleerd.

In onderstaande tabel is aangegeven op welke wijze het model kan worden ingezet voor de desbetreffende vragen.

Tabel 5.1 Toepassing van het modelinstrumentarium voor beheersvragen in de Rijn-Maasmonding

grootschalige ontwikkelingen op lange termijn (simulaties van tientallen jaren):	
1. effecten aanleg Deltawerken, 'kanteling' van het morfologisch systeem	simulaties zijn te gebruiken voor het vaststellen van gevoeligheden/onzekerheden door variëren van onzekere modelparameters (o.a. splitsingspunten, resuspensie). Vaststellen van effecten van de riviertakken, zonder de variaties binnen de takken te beschouwen.
2.morfologische effecten van klimaatverandering op lange termijn	zelfde als bij punt 1. Tevens kan worden getoetst wat de gevoeligheid is van de uitkomsten voor verschillende randcondities.
3. uitschuren Spui, Dordtse Kil en Oude Maas: hoe ver gaat dit nog door en wat zou dit kunnen betekenen voor o.a. stabiliteit van oevers?	de vragen sluiten aan op punt 1. Het eendimensionale model geeft geen inzicht in veranderingen in de vorm van het dwarsprofiel (bijv. erosie van buitenbochten). De stabiliteit van oevers en kunstwerken vraagt daarom een aanvullende analyse, of een quasi-3D modelaanpak.
4. sedimentverdeling en stabiliteit van de splitsingspunten, met het oog op de debietverdeling en daaraan gerelateerde veiligheidsvraagstukken.	bij voorkeur zou eerst een toetsing van berekende sediment- en waterverdeling aan waarnemingen moeten worden uitgevoerd. De verdeling moet door de gebruiker namelijk vooraf worden gespecificeerd. Het model kan worden gebruikt om het effect van verschillende verdelingsfuncties op de morfologie en de bodemsamenstelling te onderzoeken (bijvoorbeeld hoe de stabiliteit van de splitsingen hierdoor wordt bepaald).

korte termijn ontwikkelingen (simulaties van enkele jaren tot enkele tientallen jaren)	
5. morfologische effecten zandwinning Merwedes	de tijdsafhankelijke respons van de bovenstroomse en benedenstroomse trajecten op de zandwinning kan worden berekend. Omdat tijdsafhankelijk gedrag afhangt van de grootte van het transport, is het noodzakelijk de gevoeligheid hiervoor mee te nemen. Kwantitatieve voorspellingen zijn pas betrouwbaar wanneer het model beter is gekalibreerd.
6. aanslibbing in de (te verdiepen) vaargeul van de Nieuwe Merwede (i.r.t. aanslibbing in de vaargeul naar Moerdijk)	hiervoor gelden de zelfde beperkingen als voor punt 5 (tijdsafhankelijk gedrag wel te simuleren voor inzicht, maar kalibratie noodzakelijk voor kwantitatieve voorspelling). Vaargeul betreft slechts een deel van het dwarsprofiel. Echter een 1D model is alleen geschikt voor breedtegemiddelde bodemveranderingen.
7. morfologie Nieuwe Waterweg, baggerinspanning en verzilting in Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg	omdat de invloed van een zouttong niet in het 1D model kan worden beschouwd is naar verwachting de morfologische activiteit en resulterende baggerinspanning niet voldoende betrouwbaar te kwantificeren. Overwogen kan worden in de toekomst het 1D model te koppelen aan een Delft3D model voor dit traject.
8. verontreinigde waterbodems in Nieuwe Merwede, Hollands Diep en Haringvliet	via het lagenmodel voor de ondergrond zijn sedimentfracties in bodemlagen te schematiseren die representatief zijn voor de verontreinigde bodem. Als deze bodemlagen worden aangesneden kan de verspreiding met behulp van tracers worden gevolgd. Vanwege de relatie met (onzekere) concepten voor uitzeving en resuspensie is het noodzakelijk hiervoor uitvoerig gevoeligheidsonderzoek uit te voeren.

6 Conclusies en aanbevelingen

Voor het simuleren van morfologische processen in het Rijn-Maasmondinggebied zal gebruik worden gemaakt van het eendimensionaal model in SOBEK-River. Hiervoor is in dit project het SOBEK-River-instrumentarium uitgebreid met morfologiefunctionaliteit en is de hydrodynamische schematisatie uitgebreid met zand-slibeigenschappen en morfologie. Het project heeft geleid tot een eerste versie van een instrumentarium dat geschikt is voor het simuleren van grootschalige morfologische veranderingen (schaal minimaal enkele kilometers) op tijdschalen van verscheidene jaren en langer. Het instrumentarium bevat de belangrijkste elementen die de morfologische veranderingen en de bodemsamenstelling in de Rijn-Maasmonding bepalen (multi-fractie berekening van zand/slib, zwevend transport en bodemtransport, etc.). Een dergelijk instrumentarium waarbij al deze elementen zijn gekoppeld en hun interacties kunnen worden gesimuleerd, was tot nu toe niet beschikbaar voor dit gebied.

Conclusies

De belangrijkste conclusies van dit project zijn:

- Met de implementatie van de morfologie via de DelWAQ-waterkwaliteitsmodule beschikt het instrumentarium over de belangrijkste elementen die voor het beschrijven van de ruimtelijk en in tijd variërende morfologie en bodemsamenstelling in de Rijn-Maasmonding van belang zijn. Het morfologische model sluit direct aan op de voor waterbeweging- en waterkwaliteitstudies toegepaste SOBEK-schematisaties.
- Het modelsysteem kan door de uitgebreide mogelijkheden en toepassing van de nieuwste concepten worden beschouwd als één van de meest-geavanceerde eendimensionale modelsystemen voor morfologie die op dit moment wereldwijd verkrijgbaar zijn.
- Simulaties van morfologische effecten hangen sterk af van baggerwerk. Over het algemeen zijn de met het Rijn-Maasmondingmodel berekende trends gering (de bodem is redelijk stabiel). Noemenswaardige veranderingen (in simulatieperiode 1989-2000) zijn vooral het gevolg van de baggerschematisatie, zowel in prototype als in model.
- Zwevende stof afkomstig van de rivieren draagt vooral bij aan de morfologie in de benedenstroomse (getijgedomineerde) takken, en spelen geen grote rol in de bovenstroomse riviertakken. Voor de grove fracties (zand, grind) geldt het omgekeerde. De berekende samenstelling van de fijnste fracties in de bedding is redelijk stabiel, maar is wel gevoelig voor het aanbod op de instroomranden. Een zinvolle simulatie van deze fijne (slib) fracties blijkt alleen mogelijk door het advectie-diffusie gedrag van zwevende stof mee te nemen in de simulatie zoals is gerealiseerd met het DelWAQ-instrument.
- In het SOBEK-systeem wordt het transport van zand en slib met een multi-fractieaanpak (gegradeerd sediment) gemodelleerd in het DelWAQ-instrumentarium. Uitwisseling van deze fracties tussen water, bed en onderlagen wordt bepaald door empirische formules en keuzen van laagdiktes. De desbetreffende parameters zijn moeilijk te voorspellen of af te leiden uit metingen. Het gebeurt indirect op basis van waarnemingen van bodemsamenstelling en bodemveranderingen, en afregelen ervan is daarom onderdeel van de kalibratieprocedure. De rekenresultaten tonen echter vooralsnog aan dat de invloed op de grootschalige bodemveranderingen beperkt is.

- De DelWAQ-module (voor morfologie) en de hydrodynamische module van SOBEK wisselen elke tijdstap gegevens uit via bestanden. De uitwisseling kost relatief veel rekentijd, maar kan aanzienlijk worden versneld door uitwisseling via het computergeheugen.
- Afwijkingen in berekeningsresultaten voor de waterbeweging tussen het oude model in SOBEK-RE en het nieuwe model in SOBEK-River hebben een significant effect op de berekening van sedimenthuishouding en morfologie. De afwijkingen zijn grotendeels toe te schrijven aan verschillen in afhandeling van de stroming bij kunstwerken en verschillen in de lengte van het model. Een hydraulische kalibratieslag en een herziening van de schematisatie is noodzakelijk om dit te verbeteren.
- Testberekeningen zijn gemaakt voor de Rijn-Maasmonding waarbij deze in beperkte mate is gevalideerd. Echter een goede kalibratie en meer uitvoerige validatie is nog niet uitgevoerd. Hiervoor is het noodzakelijk een goede set gegevens te verzamelen. Het is dus vooralsnog niet mogelijk een maat te definiëren voor de nauwkeurigheid van het instrument.

Aanbevelingen

De aanbevelingen van deze studie zijn op te splitsen in aanbevelingen ten aanzien van de toepassing van het instrument voor de Rijn-Maasmonding, aanbevelingen ten aanzien van verbetering ervan en aanbevelingen ten aanzien van uitbreiding van de functionaliteit van het SOBEK-instrumentarium.

Het advies ten aanzien van de toepassing voor de Rijn-Maasmonding is:

- Ondanks dat het model nog niet volledig is gekalibreerd en de nauwkeurigheid nog niet is vastgesteld, kan het reeds worden ingezet voor nadere analyse van de gevoeligheden in het systeem voor de geïmplementeerde elementen (bijvoorbeeld zand-slibinteracties, uitwisselingsprocessen met bedding, baggerhoeveelheden, etc.). Enerzijds kan op basis van gevoeligheden worden vastgesteld welke processen maatgevend zijn bij de ontwikkelingen in het systeem. Anderzijds is het mogelijk een onderlinge vergelijking te maken tussen de effecten van verschillende scenario's of ingrepen.
- Het ontwikkelde modelinstrumentarium is geschikt voor het simuleren van grootschalige en tijdsafhankelijke morfologische veranderingen (schaal minimaal enkele kilometers) en tijdschalen van verscheidene jaren en langer. Hiermee kunnen tijdig problemen gesignaleerd worden en de gevolgen beoordeeld worden van eigen activiteiten en de activiteiten van anderen. Omdat het model eendimensionaal is, is het niet geschikt voor effecten op de schaal van de rivierbreedte (veranderingen in dwarsprofiel, etc.).
- De gekozen lijn voor implementatie van morfologie via de waterkwaliteitsmodule van SOBEK-River, DelWAQ, sluit aan op het migratietraject van rivierenfunctionaliteit van SOBEK-RE (oude versies van SOBEK) naar SOBEK-River (huidige 1D modellenlijn). Het systeem zal daardoor onderdeel worden van regulier SOBEK-beheer en verdere SOBEK-ontwikkeling. Door flexibiliteit van DelWAQ wordt binnen afzienbare tijd ook uitbreiding naar meerdimensionale waterbewegingsmodellen (Delft3D, Sobek-2D, etc.) verwacht. Tevens wordt de mogelijkheid reeds geboden om de morfologieberekeningen te combineren met waterkwaliteitsprocessen, eventueel via eenvoudig door de gebruiker zelf in te brengen procesbeschrijvingen.

De aanbevelingen ten aanzien van verbetering van de toepassing voor de Rijn-Maasmonding zijn:

- Voor betrouwbare langjarige morfologische simulaties is het noodzakelijk tekortkomingen in de hydraulische schematisatie en kalibratie aan te pakken. Deze aanpassing betreft ook de controle en actualisering van dwarsprofielen en schematisaties van takken. Minimaal vereist is een kalibratie op basis van metingen van waterstanden en afvoeren op verschillende takken. Ook de afhandeling van kunstwerken moet worden verbeterd. Bij de hydraulische kalibratie is het van belang dat de getijbeweging en een range van frequent optredende rivierafvoeren goed worden geproduceerd. Van belang is ook de keuze van realistische ruwheidswaarden zonder grote onregelmatigheden.
- Aansluitend op een hydraulische ijking kan een globale herijking worden uitgevoerd voor morfologie. Speciale aandacht is nodig voor de methode om het hydraulische model om te zetten naar een morfologisch model. In eerste instantie kan worden uitgegaan van het transport van zand (fijn en grof). In een tweede stap kan slib worden geïntroduceerd (in eerste instantie volgens eerdere zwevende-stofstudies). Onderzocht kan worden of uitwisseling met kribvakken een rol speelt.
- De baggerhoeveelheden in onder andere de Merwedes en de Nieuwe Waterweg spelen een essentiële rol bij de waargenomen bodemveranderingen. Van belang is dat wordt uitgegaan van goede baggergegevens. Aanbevolen wordt historische baggergegevens boven tafel te krijgen, onder andere met behulp van zandwinners en een onafhankelijke partij die in staat is uit de gegevens het verleden te reconstrueren.
- De zand-slibproblematiek (interacties zand en slib) is slechts in zeer beperkte mate aan de orde gekomen in de simulaties die zijn uitgevoerd in dit project. Nadere analyse van het gedrag van de afzonderlijke fracties en de verspreiding door het systeem wordt aanbevolen.
- Morfologische processen in het door zoutindringing beïnvloed gebied kunnen mogelijk via paramaterisaties worden meegenomen. Nader onderzoek hiernaar wordt aanbevolen. In de toekomst zal gebruik kunnen worden gemaakt van de integratie van meerdimensionale rekenmodules in het SOBEK-rekenhart (er is reeds een ontwikkelversie operationeel voor een toepassing in China, met koppeling van SOBEK, Delft3D en waterkwaliteit via DelWAQ).
- De invloed van de sedimentverdeling op de splitsingspunten speelt een grote rol bij de stabiliteit van benedenstroomse takken. Vooralsnog is uitgegaan van een standaardinstelling voor deze verdelingsfuncties. De rekenresultaten voor de splitsingspunten bij de Merwede en de Oude Maas lijken echter nog te leiden tot teveel erosie in één van de benedenstroomse takken. Aanbevolen wordt om uit gegevens en nadere analyse splitsingspuntrelaties op te stellen die passen bij de plaatselijke omstandigheden.
- De DelWAQ-implementatie biedt de mogelijkheid om gelijktijdig meerdere fracties met dezelfde korrelgroottes in de bodem te definiëren. Dat biedt de mogelijkheid om een kleine hoeveelheid van een bepaalde unieke sedimentfractie lokaal in de bodem te definiëren (in onderlagen, of via een suppletie) en tijdens de berekening de verspreiding van dit materiaal te volgen. Aanbevolen wordt deze traceraanpak te gebruiken voor het afregelen van modelparameters en voor het onderzoek naar erosie van verontreinigde bodems.

Aanbevelingen ten aanzien van de implementatie van functionaliteit in SOBEK zijn:

- Aanbevolen wordt de numerieke optimalisatie van de morfologie (verbetering van het numerieke schema) en de versnelling van het rekenhart onder te brengen in het migratieproject van RIZA.
- De morfologische veranderingen zouden alleen moeten worden toegepast op het sedimentvoerende deel van het dwarsprofiel. Bij voorkeur zou hiervoor een door de gebruiker gedefinieerde sedimenttransporterende breedte moeten worden gebruikt. Aanbevolen wordt de huidige implementatie hiermee uit te breiden op een manier die toelaat dat zwevend sediment over een grotere breedte wordt verdeeld (bijvoorbeeld inclusief uiterwaarden) dan bodemtransport.
- Het gebruik van een morfologische factor ten behoeve van het versnellen van de simulaties heeft slechts beperkte mogelijkheden. Door nieuwe mogelijkheden voor stationair rekenen en door ontkoppeling van waterbeweging en morfologie is het aan te bevelen de aanpak in de toekomst te herzien. Wellicht bieden deze aanpassingen mogelijkheden voor een grotere versnelling.

7 Literatuur

Ashida, K, and M. Michiue (1972) Study on hydraulic resistance and bedload transport rate in alluvial streams. Transactions, Japan Society of Civil Engineers, p.206, p 59-69.

Busnelli, M.M., G.S. Stelling, and Michel Larcher (2001) Numerical morphological modeling of open-check dams. J. Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 127, No.2, p.105-114.

Engelund, F. & E. Hansen (1967), A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen.

Galappatti, R. (1983) A depth-integrated model for suspended sediment transport. Comm. on Hydr., Report No. 83-7, Delft Univ. of Techn., 114 pp.

Galappatti, R. and Vreugdenhil, C.B. (1985) A depth-integrated model for suspended sediment transport. J. Hydr. Res., IAHR, Vol.23, No.4, p.359-377.

Gill, M.A. (1971) Height og sand dunes in open-channel flow, J. Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 12, No.12.

Hirsch, C. (1988) Numerical computation of internal and external flows; Vol. 1, Fundamentals of numerical discretization. Wiley Series in Numerical Methods in Engrg., J. Wiley and Sons, England, 515 pp.

Hirsch, C. (1990) Numerical computation of internal and external flows; Vol. 2, Compuational methods for inviscid and viscous flows. Wiley Series in Numerical Methods in Engrg., J. Wiley and Sons, England, 691 pp.

Kamsteeg, A. (2005) Beheersvragen RWS-Zuid-Holland. Presentatie tijdens de bijeenkomst van de Morfologische Driehoek, 14-9-2005.

Laguzzi, M. (1994) Modelling of sediment mixtures. Rapport Q1660, WL | Delft Hydraulics.

Lax, P.D. (1954) Weak solutions of non-linear hyperbolic equations and their numerical computation. Comm. Pure and Applied Mathematics, Vol. 7, No.1, p.159-193.

Meijers, E. en J. Icke (2006) Zwevend Stof Rijn-Maasmonding. Rapport Q4201, WL | Delft Hydraulics.

Meyer-Peter, E. and R. Müller (1948) Formulas for bed-load transport. Proc. IAHR, Stockholm, Vol.2, paper 2, p.39-64.

Mosselman, E. J. Crebas, J. Icke, K. Sloff & Z.B. Wang (2005) Bouwstenen voor nieuw morfologisch SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding. Rapport Q4082, WL | Delft Hydraulics.

Raudkivi, A.J. (1990) *Loose Boundary Hydraulics* (3rd.ed). Oxford: Pergamon Press.

Ribberink, J.S. (1982) An experimental study of bed-load transport with non-uniform sediment in: 'The Mechanics of Transport' by B.M. Sumer and A. Muller, Euromech 156, Istanbul.

Ribberink, J.S. (1987) Mathematical modelling of one-dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment. Ph.D thesis, Delft University of Technology (also published: Comm. On Hydr. And Geotechnical Engrg., No. 87-2, Delft Univ. of Technology).

Sloff, C.J. (1994) Modelling turbidity currents in reservoirs. Communications on Hydr. and Geotechn. Engrg., Report No.94-5, Delft Univ. of Techn., Delft, 141 pp

Sloff, C.J., E. Mosselman and J. Sieben, Effective use of non-erodible layers for improving navigability. In: Ferreira, R.M.L., E.C.T.L. Alves, J.G.A.B. Leal and A.H. Cardoso (eds.) River Flow 2006, Taylor and Francis/Balkema. Proceedings, p. 1211

Snippen, E., A. Fioole, H. Geelen, A. Kamsteeg, A. van Spijk en T. Visser (2005) Sediment in (be)weging: Sedimentbalans Rijn-Maasmonding periode 1990-2000. Rijkswaterstaat, mei 2005.

Struiksma, N. (1999) Mathematical modelling of bedload transport over non-erodible layers. Proc. IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), Genova, Sept. 1999, p. 89–98.

Van Ledden, M. (2003) Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins. Doctoral thesis, Delft University of Technology.

Van Rijn, L.C. (2007a), A unified view on sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness and bed-load transport. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.133, No.6, p.649-667.

Van Rijn, L.C. (2007b), A unified view on sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.133, No.6, p.668-689.

Van Rijn, L.C. (2007c), A unified view on sediment transport by currents and waves. III: Graded beds. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.133, No.7, p.761-775.

Van Rijn, L.C., D.J.R. Walstra & M. van Ormondt (2007), A unified view on sediment transport by currents and waves. IV: Application of morphodynamic model. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.133, No.7, p.776-793.

Verschelling, E., K. Sloff, en E. Mosselman (2007) Modellering morfologie van Pannerdensche Kop tot Hoek van Holland. Rapport Q4249, WL | Delft Hydraulics.

Wang, Z.B. (1989) Mathematical modelling of morphological processes in estuaries. Communications on Hydr. and Geotechn. Engrg., Report No.89-1, Delft Univ. of Techn., Delft, 208 pp (doctoral thesis).

Wang, Z.B. (1992) Theoretical analysis on depth-integrated modelling of suspended-sediment transport. J. Hydr. Res., IAHR, Vol.30, No.3, p.403-421.

Wang, Z.B. and J.S. Ribberink (1986) The validity of a depth-integrated model for suspended-sediment transport. J. Hydr. Res., IAHR, Vol. 24, No.1, p.53-67.

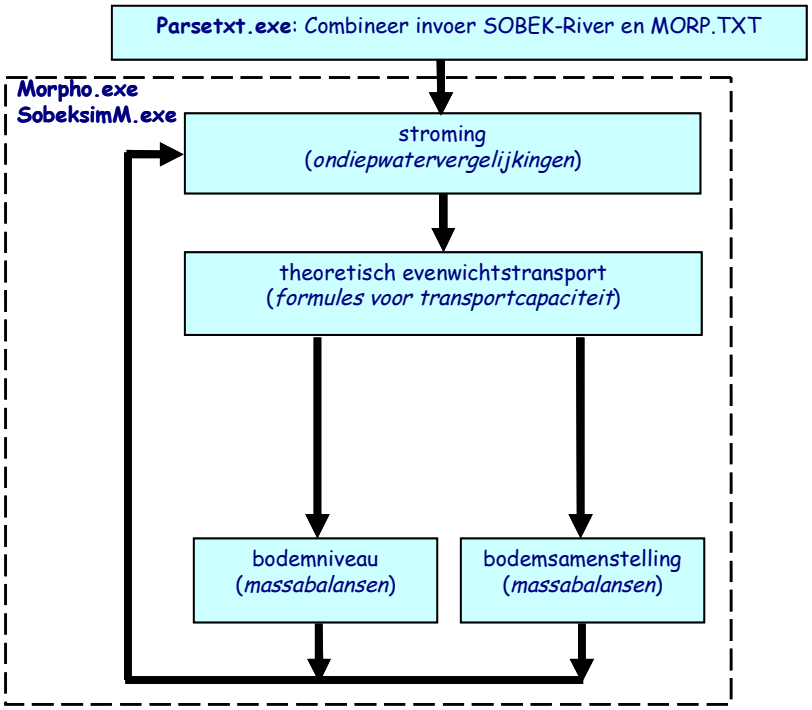
Yalin, M.S. (1964) Geometrical properties of sand waves, J. Hydr. Division, ASCE, No. HY5, sept.

A SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River

A.1 Implementatieaspecten

Voorafgaande aan de implementatie van morfologiefunctionaliteit via de DelWAQ-module, is gebruik gemaakt van de koppeling tussen de morfologie module van SOBEK-RE en de hydrodynamische module van SOBEK-River. Deze morfologiemodule in SOBEK-River kan worden beschouwd als een tussenstap naar een meer generieke en robuuste module op basis van de DelWAQ-module (zie hoofdstuk 4). In deze versie van SOBEK is in een ontwikkelingsproject in 2004 de morfologiemodule van de oude SOBEK-RE lijn gekoppeld aan SOBEK-River. Vanwege het ontwikkelingskarakter van deze integratie biedt het huidige instrumentarium nog niet een volledig in de User Interface opgenomen functionaliteit, en zijn nog niet alle mogelijkheden van SOBEK-RE overgenomen. Ondanks deze beperkingen is het wel zeer zinvol de analyse van het transportmodel met deze versie uit te voeren. In onderstaande Figuur A.1 is schematische aangegeven hoe de rekenmodule is opgebouwd, en op welke wijze afzonderlijke onderdelen met elkaar interacteren. In principe is het rekenhart van deze versie samengesteld uit de volgende componenten:

- Parsetxt.exe: programmaonderdeel (als losse executable) dat de in NEFIS-formaat gecodeerde modelschematisatie van een hydraulisch SOBEK-River model uitbreidt met een morfologieschematisatie afkomstig uit een ASCII file MORP.TXT.
- Morpho.exe en SobeksimM.exe: rekenmodules voor het rekenen van sedimenttransport en bodemveranderingen (Morpho) en voor de waterbeweging (SobeksimM).
- Runm.exe: stuurmodule die zowel Parsetxt, als Morpho en SobeksimM op het juiste moment opstart.



Figuur A.1 Schema van rekenprocedure toegepast voor de implementatie van Van Rijn transportformules

Aandachtspunten:

- De nummering van de takken en knopen is verschillend in Sobeksim (User Interface) en in Morpho. De Ascii-invoer in Morp.txt gaat uit van de nummering zoals in het rekenhart en de uitvoer van Morpho.exe, en de invoer van de User-Interface (Netter) en de uitvoer voor waterbeweging gaat uit van de nummering zoals in Sobeksim.exe.
- De transportformule kan per tak worden voorgeschreven. In principe is het dus mogelijke andere transportformules in andere takken toe te passen.

B Van Rijn transport model

B.1 Transportmodel TR2004

Het sedimenttransportmodel TR2004 van Van Rijn (2007) onderscheidt afzonderlijke relaties voor bodemtransport en voor zwevend transport. Gekozen is de multifractie-aanpak te implementeren, waarbij het transport van afzonderlijke sedimentfracties wordt berekend. In deze paragraaf is het model beschreven zoals het is geïmplementeerd in SOBEK-RE, dus zonder de golf-gerelateerde processen. De tekst is in het Engels in verband met gebruik voor de systeemdocumentatie van SOBEK.

The sediment-transport model TR2004 of Van Rijn (2007a,b,c) distinguishes separate relations for bed-load transport and suspended-load transport capacity. The implemented version is the multi-fraction approach, from which the wave-related processes have been eliminated. The approach is suited for sediment mixtures for which $D_{90}/D_{10} > 4$. It is recommended to split up this type of mixture in at least 6 to 8 fractions. Total transport is computed by:

$$S = S_b + S_s \quad met \quad S_b = \sum_{i=1}^{n} p_i S_{b,i} \; ; S_s = \sum_{i=1}^{n} p_i S_{s,i} \tag{B.1}$$

in which

S = total transport of bed material (m^3/s)
S_b = bed-load transport (m^3/s)
S_s = suspended-load transport (m^3/s)
i = index of sediment fraction (-)
p_i = volume fraction (-)

Bed-load transport per fraction follows from:

$$s_{b,i} = 0,5 \cdot \rho_s f_{silt,i} \left(1 - p_{clay}\right) D_i \left(D_{*,i}\right)^{-0,3} \left[\tau'_{b,cw} / \rho\right]^{1/2} T_i \tag{B.2}$$

with

$f_{silt,i}$ = silt factor = D_{zand}/D_i (with f_{silt}=1 for $D_i > D_{zand}$)
D_i = average grain diameter of fraction i
$D_{*,i}$ = $D_i \cdot [\Delta g/\upsilon^2]^{1/3}$ = dimensionless grain parameter of fraction i (-)
D_{zand} = lower range of sand class, equal to 62 μm
D_{silt} = lower range of coarse silt class, equal to 32 μm
D_{clay} = boundary of clay -class, equal to 8 μm
p_{clay} = fraction of material less than 8 μm (-)
$s_{b,i}$ = bed-load transport per unit of width (in m^3/s bed material, without pores).
T_i = transport parameter or dimensionless bed-shear parameter of fraction i
Δ = relative density of sediment (=$[\rho_s - \rho]/\rho$)
ρ, ρ_s = water, sediment density (kg/m^3)
$\tau'_{b,cw}$ = instantaneous grain-related bed-shear stress

The grain-related bed-shear stress $\tau'_{b,cw}$ can be written as:

$$\tau'_{b,cw} = 0,5 \cdot \rho f'_{cw} \left(0,5 \cdot u\right)^2 = 0,125 \cdot \rho f'_{cw} u^2 \tag{B.3}$$

For the flow-related roughness factor f'_{cw} holds that:

$$f'_{cw} = \frac{8g}{\left[18 \cdot \log\left(12h / k_{s,grain}\right)\right]^2} \tag{B.4}$$

For graded sediment it is preferred to use a grain roughness that is related to individual fractions ($k_s = D_i$). For 2D/3D applications slope effects should be accounted for. The transport parameter is computed as:

$$T_i = \lambda_i \left[\frac{\tau'_b - \xi_i \cdot \left(D_i / D_{50}\right) \cdot \tau_{b,cr,D_{50}}}{\left(D_i / D_{50}\right) \cdot \tau_{b,cr,D_{50}}} \right] \tag{B.5}$$

in which

$\tau_{b,cr,D50}$ = critical bed-shear stress based on D_{50}
λ_i = correction factor for effective shear tension = $(D_i/D_{50})^{0,25}$
ξ_i = 'hiding en exposure' factor according to Egiazaroff = $[\log(19)/\log(19 \cdot D_i/D_{50})]^2$

For critical shear stress for 'initiation of motion of sediment' in the transport parameter, an estimation of Shields values is used as follows:

$$\begin{aligned}
&\theta_{cr} = 0,115 \cdot D_*^{-0,5} && \text{als} \quad D_* < 4 \\
&\theta_{cr} = 0,14 \cdot D_*^{-0,64} && \text{als} \quad 4 < D_* < 10 \\
&\theta_{cr} = 0,04 \cdot D_*^{-1} && \text{als} \quad 10 < D_* < 20 \\
&\theta_{cr} = 0,013 \cdot D_*^{0,29} && \text{als} \quad 20 < D_* < 150 \\
&\theta_{cr} = 0,055 && \text{als} \quad D_* < 150
\end{aligned} \tag{B.6}$$

in which

D_* = $D_{50} \cdot [\Delta g/\upsilon^2]^{1/3}$ = dimensionless grain parameter based on D_{50}
θ_{cr} = dimensionless critical bed-shear stress according to Shields

The critical shear stress is further influenced by cohesive grain-interaction effects and by density effects (porosity) (and eventually biological and organical processes). The value of critical bed-shear stress follows then from:

$$\tau_{b,cr,D_{50}} = CFCBSS \cdot f_{pack} f_{coh} f_{clay} \left(\rho_s - \rho\right) g \cdot D_{50} \theta_{cr} \tag{B.7}$$

in which

$CFCBSS$ = correction factor for critical bed-shear stress (calibration factor) (-)
f_{pack} = density effect = D_{50}/D_{zand} with $0,08 < f_{pack} < 1$ (-)
f_{coh} = $(D_{zand}/D_{50})^{1,5}$ = cohesion effect with $f_{coh} > 1$ (-)

f_{clay} $=(1+p_{clay})^3$ with $1 < f_{clay} < 2$ (-)

For the computation of *suspended-load transport* it is assumed that in the vertical (over the water column) flow velocity and sediment concentration are distributed according to that of steady-uniform flow. For this situation the following relation describes the vertical distribution of sediment in the water-column:

$$c_i(z) \cdot w_{s,i} + \varepsilon_{s,c} \frac{\partial c_i(z)}{\partial z} = 0 \qquad \text{(B.8)}$$

in which

$c_i(z)$ = (volumetric) concentration (time-average) on level z above the bed, for fraction i

$w_{s,i}$ = fall velocity for sediment with grain size D_i

$\varepsilon_{s,c}$ = sediment mixing coefficient, depend on eddy-viscosity of flow

Solution of this equation for $c_i(z)$ requires integration from reference level a (reference level relative to the bed) and water surface. The simplest solution to this equation is the Rouse profile, which follows from a parabolic distribution of the sediment-mixing coefficient and a constant fall velocity. However, as the fall velocity and mixing coefficient are affected by the concentration, only a numerical integration method can be applied.

For the concentration at reference level a the following relation is proposed (which is related to the bed-load transport):

$$c_{a,i} = 0{,}015 \cdot f_{silt,i} \left(D_i / a\right) \left(D_{*,i}\right)^{-0,3} \left(T_i\right)^{1,5} \quad \text{with} \quad c_{a,i} < 0.05 \qquad \text{(B.9)}$$

in which:

a = reference height (relative to the bed)

$c'_{a,i}$ = reference volumetric concentration for fraction i (concentration imposed at level a)

The equivalent mass concentration follows from $c'_{a,i} = c_{a,i} \cdot \rho_s$ in which ρ_s is the density of sediment (e.g., 2650 kg/m^3).

For the reference height we assume that a = 0.5*R_c, in which R_c = roughness height of bed forms (dunes and ripples). The value of R_c follows from the roughness predictor of Van Rijn (2007).

In the solution of equation (B.8), and the Rouse profile, the suspension number Z_i is a rather important parameter. It is defined as:

$$Z = \frac{w_{s,i}}{\kappa u_{*,c}} \qquad \text{(B.10)}$$

in which:

$u_{*,c}$ = (bed-)shear stress velocity by flow

Z_i = suspension number of Rouse number (for fraction i)
κ = Von Karmann number (= 0,4)

In situations with rather coarse bed material (or near initiation of motion) the value of Z_i is rather large (cq. Z_i>1). In this situation suspended sediment only occurs in the lowest part of the water column, and vertical gradients in c_i are rather strong. In situations with low values of Z_i (cq. Z_i<1), particularly for fine sediment and high Shields values, suspended sediment is distributed more evenly of the depth of the water column, and vertical gradients in c_i are small.

Furthermore, for the fall velocity and sediment mixing coefficients the following relations can be applied (in which they are a function of concentration), for fraction i:

$$w_{s,i} = \varphi_{floc} \cdot \varphi_{hs} \cdot w_{s,0i} \tag{B.11}$$

$$\varepsilon_{s,ci} = \varphi_d \cdot \beta_{c,i} \cdot \varepsilon_{f,c} \tag{B.12}$$

in which

$w_{s,0i}$ = fall velocity of a single grain in stagnant water
$\beta_{c,i}$ = factor for effect of sediment on mixing of momentum in flow
$\varphi_{d,i}$ = damping factor
$\varphi_{floc,i}$ = flocculation factor (only relevant if salinity > 5 ‰)
$\varphi_{hs,i}$ = 'hindered settling" factor
$\varepsilon_{f,c}$ = turbulent exchange coefficient or mixing coefficient for momentum

The relations for the parameters in these equations are:

$$\beta_{c,i} = 1 + 2\left(\frac{w_{s,i}}{u_{*,c}}\right)^2 \quad \text{with} \quad \beta_{c,i} \le 1{,}5 \tag{B.13}$$

$$\varphi_d = \varphi_{fs}\left[1 + \left(\frac{c_{total}}{c_{gel,s}}\right)^{0.8} - 2\left(\frac{c_{total}}{c_{gel,s}}\right)^{0.4}\right] \quad \text{with} \quad \varphi_d > 0.01 \tag{B.14}$$

$$\varphi_{fs} = D_{50}/1{,}5D_{sand} \quad \text{with} \quad 0.3 < \varphi_{fs} < 1 \tag{B.15}$$

$$\varphi_{floc,i} = \left[4 + \log\left(\frac{2c_{total}}{c_{gel,s}}\right)\right]^{\alpha} \quad \text{with} \quad \alpha = \frac{D_{sand}}{D_{50}} - 1 \quad (0 \le \alpha \le 3) \tag{B.16}$$

$$\varphi_{hs} = \left(1 - 0{,}65\frac{c_{total}}{c_{gel,s}}\right)^5 \quad \text{with} \quad \varphi_{hs} > 0.01 \tag{B.17}$$

in which:

$c_{gel,s}$ = 1-porosity = 0,65 (dry substance density per unit of volume in a sand bed)

c_{total} = sum of volumetric concentrations of all fractions (total volumetric concentration follows from mass concentration by c=)
D_{zand} = 62 µm, smallest grain size of fraction non-cohesive sand

For numerical integration the Runga-Kutta integration method is applied for a 10 layer discretisation of the vertical, in which hindered settling, damping en flocculation factors are determined using an estimated concentration c_{0i} obtained from the standard Rouse concentration profile, which is defined as:

$$\frac{c_i(z)}{c_{a,i}} = \left[\left(\frac{h-z}{z}\right)\left(\frac{a}{h-a}\right)\right]^{z_i} \tag{B.18}$$

The Runga-Kutta method can be applied after rewriting the equation (B.8) as follows:

$$\frac{\partial c_i(z)}{\partial z} = -\frac{c_i(z)\cdot w_{s,i}(z)}{\varepsilon_{s,ci}(z)} = \mathrm{f}(z, c_i) \tag{B.19}$$

The solution of $c_i(z)$ for each level z_j (relative to the bed, and starting from reference height a at level $z_{j=1}$), with a step height of Δh between the 2 levels j and j+1, follows from:

$$\begin{aligned} RK_1 &= \Delta h \cdot \mathrm{f}(z_j, c_{i,j}) \\ RK_2 &= \Delta h \cdot \mathrm{f}(z_j + \tfrac{1}{2}\Delta h, c_{i,j} + \tfrac{1}{2}RK_1) \\ RK_3 &= \Delta h \cdot \mathrm{f}(z_j + \tfrac{1}{2}\Delta h, c_{i,j} + \tfrac{1}{2}RK_2) \\ RK_4 &= \Delta h \cdot \mathrm{f}(z_j + \Delta h, c_{i,j} + RK_3) \\ c_{i,j+1} &= c_{i,j} + \frac{1}{6}(RK_1 + 2\cdot RK_2 + 2\cdot RK_3 + RK_4) \end{aligned} \tag{B.20}$$

An accurate and fast solution is obtained when the vertical grid for this integration is based on the following characteristics:

- a logarithmic distribution of later thickness is used in the vertical, such that layers close to the bed are thinnest (because there the largest concentration gradients are found). Assuming a subdivision of the water column into n-layers (between level a and water depth h) the jth-level in the grid is defined as:

$$z_j = a\left(\frac{h}{a}\right)^{\frac{j-1}{n-1}} \tag{B.21}$$

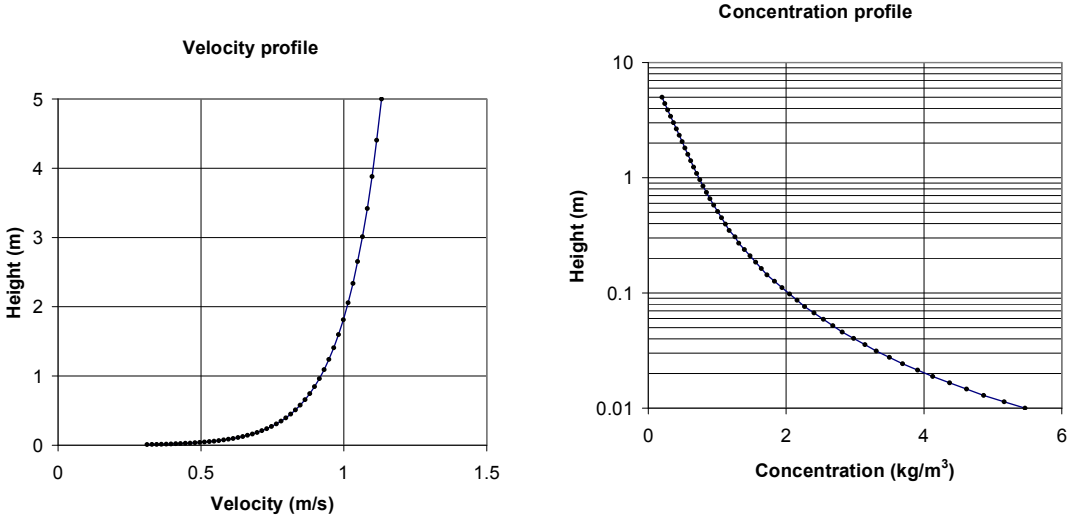
- the number of layers used (value of n) is related to the expected steepness of concentration gradients in the profile. As previously mentioned the largest vertical gradients occur at large vales of the suspension number Z_i. Based on numerical tests the following rules of thumb have been defined:

- if $Z_i < 1$ then $n = 10$;
- If $1 < Z_i < 4$ then $n = 20$;
- if $4 < Z_i > 5 \cdot (h\text{-}a)/h$ then $n = 40$;
- if $Z_i > 5 \cdot (h\text{-}a)/h$ then only bed-load transport.

On the same grid we define a flow-velocity profile $u(z)$. Therefore a logarithmic/parabolic velocity profile is assumed. Its shape is defined by the roughness height R_c (and therefore also by the value for reference height a).

$$u(z) = \overline{u} \frac{\ln\left(30\, z/R_c\right)}{-1 + \ln\left(30\, h/R_c\right)} \tag{B.22}$$

Examples of computed flow velocity and concentration profile are given in Figuur B.1.



Figuur B.1 Example of numerically determined vertical profiles (water depth 5 m, average velocity 1 m/s, D_{50} = 0.1 mm, pclay = 0.1)

The transport rate of suspended sediment is obtained by integration of the product of both profiles as follows:

$$s_s = \int_a^h u(z) \cdot c(z)\, \mathrm{d}z \tag{B.23}$$

in which:

s_s = depth-average suspended-load transport per unit of width (m^2/s)

B.2 Implementatie Van Rijn in SOBEK-RE-morfologie module in SOBEK-River

In eerste instantie is de nieuwe transportformule van Van Rijn geïmplementeerd in de morfologiemodule van SOBEK-RE die is gekoppeld aan SOBEK-River. Ten behoeve van deze implementatie zijn de volgende aanpassingen aan de afzonderlijke programmaonderdelen ingebracht:

Programma Parsetxt

- Ten behoeve van het inlezen van de parameters voor de transportformule van Van Rijn voor gegradeerd sediment is in het programma *Parsetxt* subroutine *ptrfrm.for* aangepast. In deze routine worden in het geval het stuurwoord gelijk is aan *RIJ*, de array variabele voor type transportformule *trform(1,*)* = 4, de coëfficiënten 1 (kalibratiefactor) en 2 (correctiefactor critical bed shear stress, keyword CFCBSS, default = 1) ingelezen. De waarde voor coëfficiënt 1 wordt opgeslagen in array variabele *trform(3,*)*, de waarde voor coëfficiënt 2 wordt opgeslagen in array variabele *coef(1)*.

Programma Morpho

- In het programma Morpho is een gestripte versie van de door Van Rijn ontwikkelde routine met de transportformule voor gegradeerd sediment, *TR2004*, opgenomen onder de naam *gstfvrsm.for*, aangeroepen door subroutine *gstfro.for*. Deze is in grote lijnen gelijk aan de code die is geïmplementeerd in het Delft3D model. Alle code die te maken heeft met golven is uit de TR2004 routines verwijderd. Verder is in verband met rekenefficiëntie de methode voor het integreren van het concentratie- /snelheidsprofiel vervangen door de Runga Kutta, aangegeven in vergelijking (B.20).

De aanroep van de nieuwe transportformule (per tak) in de Ascii-file Morp.txt is alsvolgt:

$TRFORM BRANCH [i] RIJ [cal-factor] CFCBSS [cfcbss]

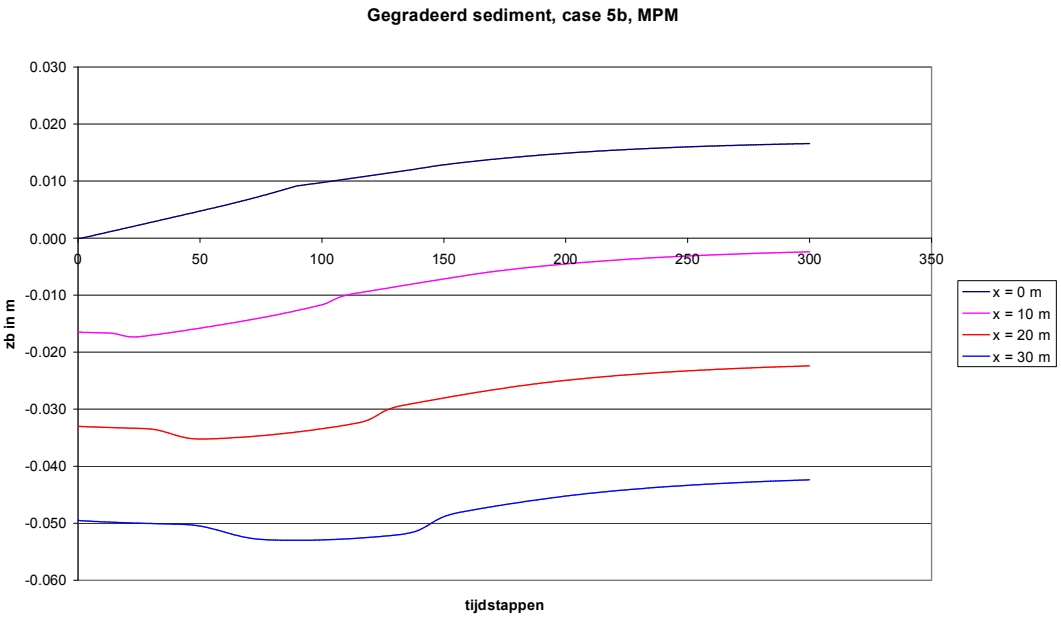
met (tussen haken aangegeven) in te voeren parameters:

i	= Taknummer
cal-factor	= Kalibratie factor voor transport formule (vermenigvuldingsfactor)
CFCBSS	= als ‘keyword’ aanwezig is dan is correctiefactor “critical bed shear stress “ door gebruiker te definiëren (default = 1)
cfcbss	= correctiefactor “critical bed shear stress” (kritieke bodemschuifspanning)

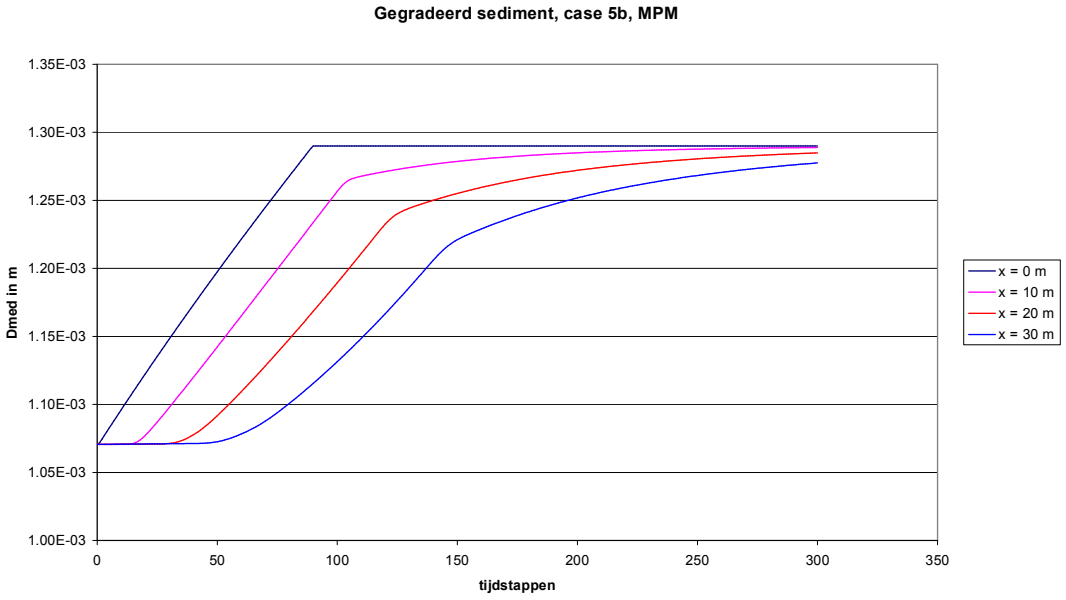
B.3 Testberekeningen

Voor het testen van de functionaliteit zijn berekeningen gemaakt met relatief eenvoudige modellen. Het eerste model betreft een berekening van een experiment met gegradeerd sediment uitgevoerd door Ribberink (1987). Het betreft een experiment (Case 5B) in een laboratoriumgoot met een lengte van 30 m. Gewerkt is met een bimodaal sediment mengsel, waarbij de eerste fractie een gemiddelde diameter heeft van $D_1 = 0{,}78$ mm, en de tweede fractie $D_2 = 1{,}29$ mm. In het experiment is het totale transport op de bovenrand gelijk gehouden aan $9{,}4 \cdot 10^{-5}$ m^3/s, maar is het aanbod van sedimentfractie 1 geleidelijk gereduceerd van 50% naar 0% (en dus het aanbod van fractie 2 evenredig toegenomen).

Door deze randconditie neemt diameter geleidelijk toe langs het model (via een stroomafwaarts verplaatsende storing). In samenhang hiermee neemt de bodemhelling eveneens toe, en neemt de gemiddelde waterdiepte af (immers snelheden moeten toenemen om het grovere materiaal met dezelfde hoeveelheid te kunnen transporteren). In Figuur B.2 en Figuur B.3 is getoond hoe de oorspronkelijk gekalibreerde resultaten (uit eerdere SOBEK-RE validatiestudies) met behulp van de Meyer-Peter en Müller formule worden gereproduceerd met de nieuw geïmplementeerde functionaliteit. De resultaten stemmen overeen met de modeluitkomsten uit SOBEK-RE en met de waarnemingen van Ribberink (1987). Gerekend is met een tijdstap van 20 minuten.

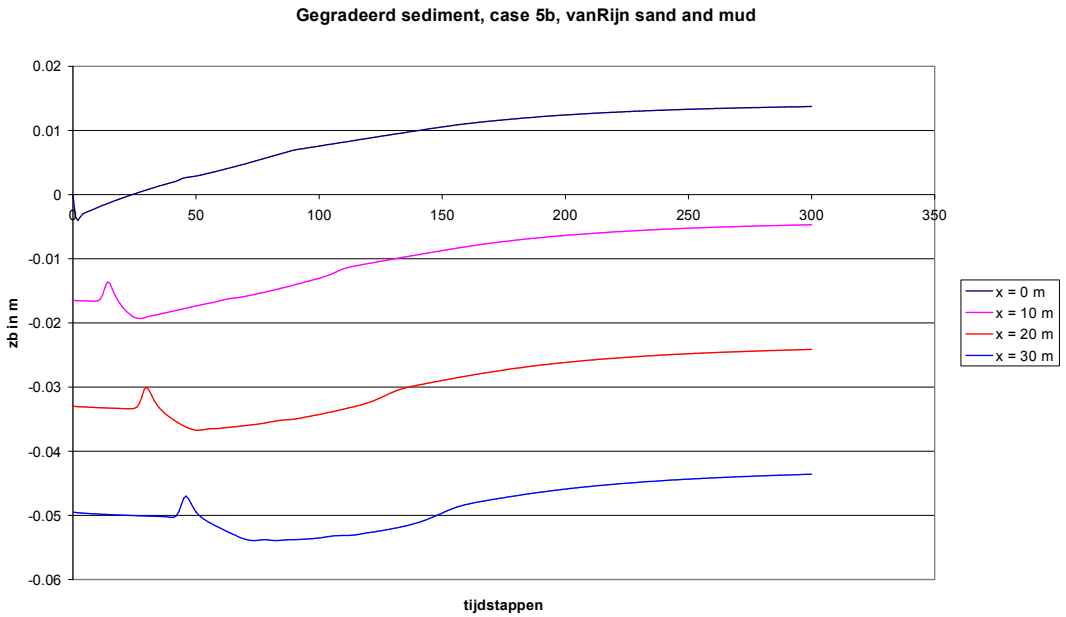


Figuur B.2 Berekende bodemverandering als functie van de tijd voor experiment 5b van Ribberink: bodemligging berekend met Meyer-Peter en Müller formule.

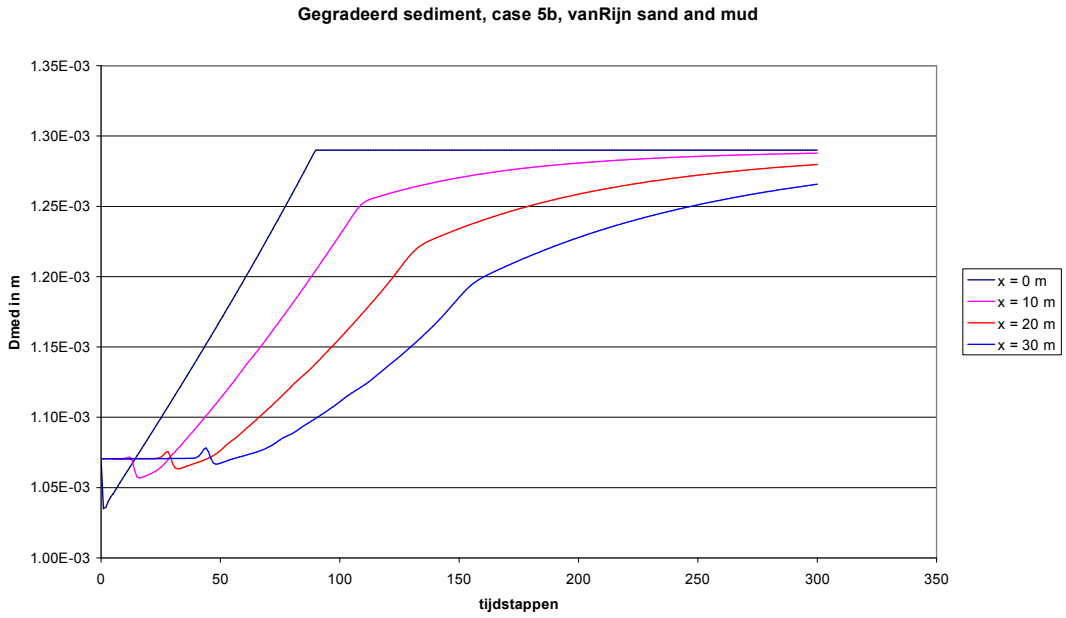


Figuur B.3 Berekende diameterverandering als functie van de tijd voor experiment 5b van Ribberink: gemiddelde diameter berekend met Meyer-Peter en Müller formule.

Dezelfde berekening is herhaald met de nieuwe transportformule van Van Rijn. Omdat het model geen slib bevat, en vooral bodemtransport betreft, is deze test vooral relevant voor een algemene test van de nieuwe functionaliteit, en niet voor verkrijgen van begrip in de zand-slib processen.



Figuur B.4 Berekende bodemverandering als functie van de tijd voor experiment 5b van Ribberink: bodemligging berekend met Van Rijn formule.



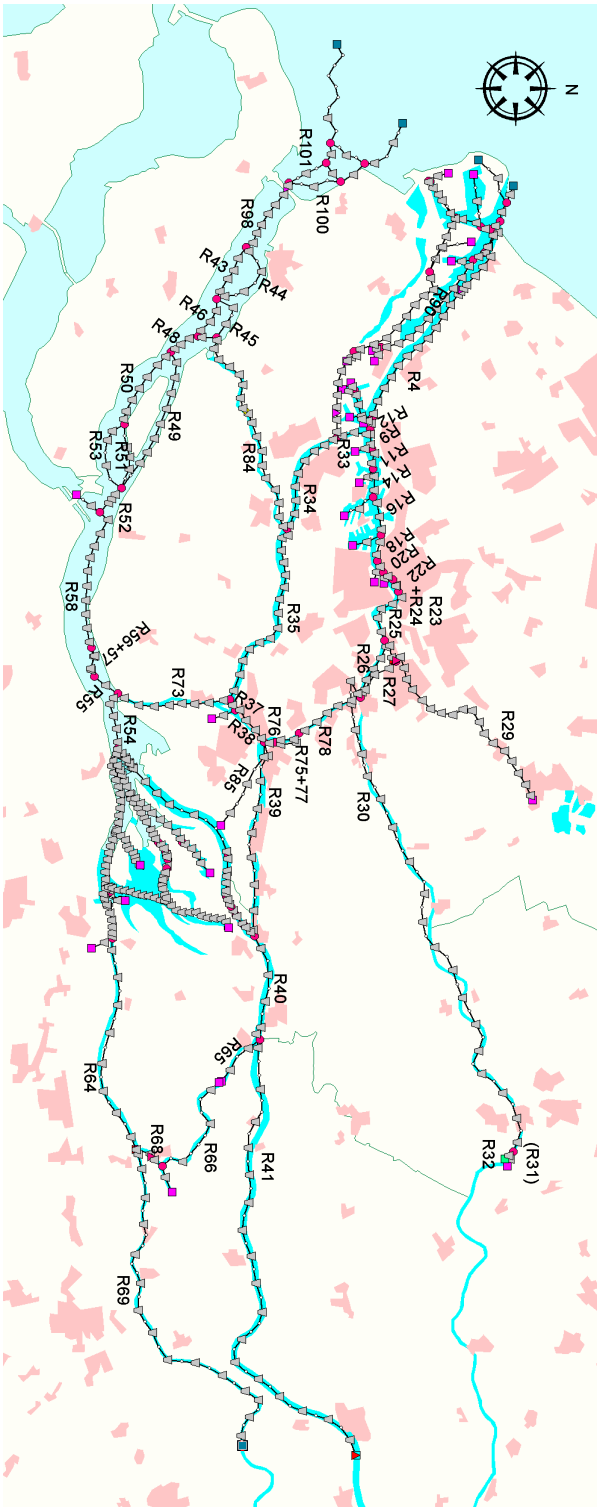
Figuur B.5 Berekende diameterverandering als functie van de tijd voor experiment 5b van Ribberink: gemiddelde diameter berekend met Van Rijn formule.

In Figuur B.4 en Figuur B.5 zijn de resultaten gepresenteerd van de berekeningen met Van Rijn. De resultaten stemmen goed overeen met die van Meyer-Peter en Müller. Wel wordt met Van Rijn de verandering in bodemligging voorafgegaan door een klein aanzandingsgolfje dat samengaat met een golfje in korreldiameter. Dit gedrag wordt niet veroorzaakt door numerieke effecten, maar is het gevolg van kleine verschillen in de interacties in bodemsamenstelling, transport en bodemverandering tussen de twee transportformules.

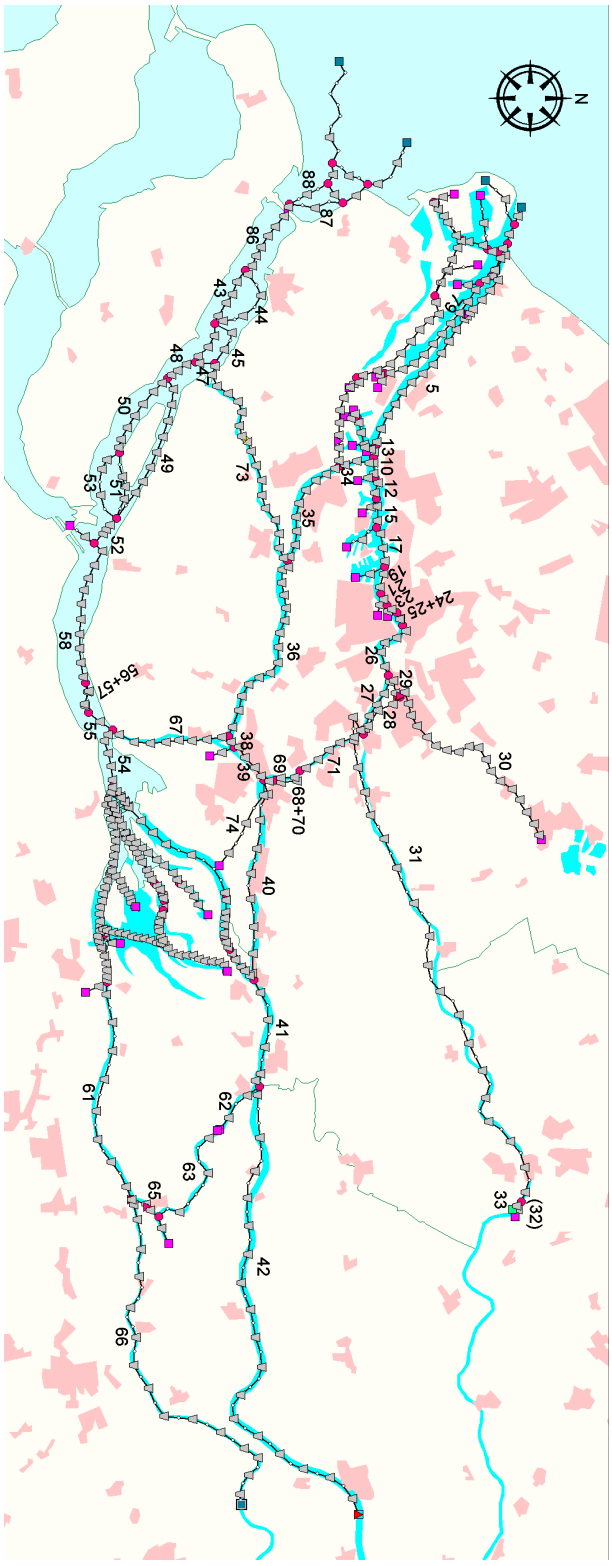
Eveneens zijn testen uitgevoerd voor een model dat is gebaseerd op de Adige Rivier in Noord Italië. De testen zijn eveneens vooral bedoeld voor het testen van de programmacode. Omdat het een model met relatief grof sediment betreft is het noodzakelijk de specifieke testen voor functioneren van de Van Rijn transportformule uit te voeren met het Rijn-Maasmonding model.

C Simulaties Rijn-Maasmonding

C.1 Schematisatie



Figuur C.1 Taknummering (hoofdtakken) in waterbewegingsschematisatie



Figuur C.2 Nummering “branches” in morfologie uitvoer (alleen hoofdtakken) (in SOBEK-RE-morfologie)

C.2 Simulaties Rijn-Maasmonding met uniform sediment (zand)

Voor de morfologische berekeningen met uniform sediment is de invoer voor de morfologiemodule van het Sobek-RE model van Mol (2003) geconverteerd naar de knopen en takken van het Sobek-River model (inclusief de baggerhoeveelheden van Mol). De schematisatie is gemaakt voor de SOBEK-River versie met SOBEK-RE morfologie koppeling. Een deel van deze omzetting had reeds plaatsgevonden in het voorgaande project gerapporteerd in Mosselman et al (2005). Dit had echter nog niet geleid tot een functionerende versie van de software. Voor het functioneren van het model bleek een verdere uitbreiding en omzetting en de volgende aanpassingen noodzakelijk gebleken:

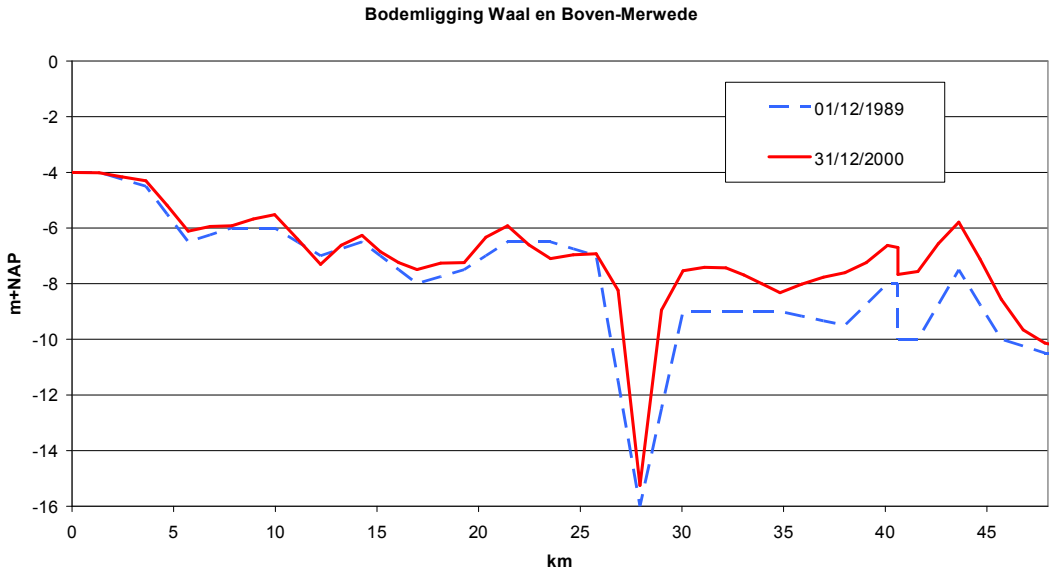
- In tak 28 (R_27, Nieuwe Maas bij Krimpen) is op cs-locatie P_71691 (x=2132) profiel BAKI_54 vervangen door profiel Baki_51 (afwijkend profiel veroorzaakte problemen)
- Compound structures zijn omgezet in enkelvoudige structures met,
  - Haringvliet, indien open: enkelvoudige structure voor de volle breedte;
  - Nieuwe Waterweg: alleen SVKW_schuif gehandhaafd;
  - Hartelkanaal: alleen SVKH_breed_schuif gehandhaafd.
- De door Netter gegenereerde rekenpunten op 0.5 m boven en benedenstrooms van een structure zijn verwijderd. De rekenpunten zijn bedoeld voor de berekening van de waterbeweging rond het kunstwerk, maar worden door de morfologiemodule niet als speciale situatie herkend. Vanuit het oogpunt van stabiliteit van de morfologieberekening (zonder enorme reducties in tijdstap) zijn dergelijke kleine rekencellen daarom ongewenst. Voor de nauwkeurigheid van de waterbewegingssimulatie is deze tijdelijke aanpassing slechts van geringe invloed.
- De bodemhoogte dwarsprofielen boven- en benedenstrooms Haringvlietsluizen is op NAP-27 m gelegd om vrij forse morfologische veranderingen rond het kunstwerk op te kunnen vangen.
- In tak 112 (R_P_P_P_5582700, BEMA_A, Bergsche Maas) zijn enkele dwarsprofielen aangepast: dwarsprofiel BEMA_222 van bovenstrooms knoop N_57 is tevens opgelegd op de eerste 2 dwarsprofiellocaties benedenstrooms van knoop N_57 in tak 112, t.w. dwarsprofiellocaties P_P_P_P_5586802 en P_P_P_P_5586803.
- De bodemhoogte van dwarsprofiel in tak 105 (R_P_5586720) is op NAP-6 m gelegd i.p.v. NAP-8 m. Tevens is de breedte van de “weir” aan het eind van tak 105 gewijzigd van 1350 in 1300 m (gelijk aan profielbreedte).

Enkele belangrijke karakteristieken van het rekenmodel zijn:

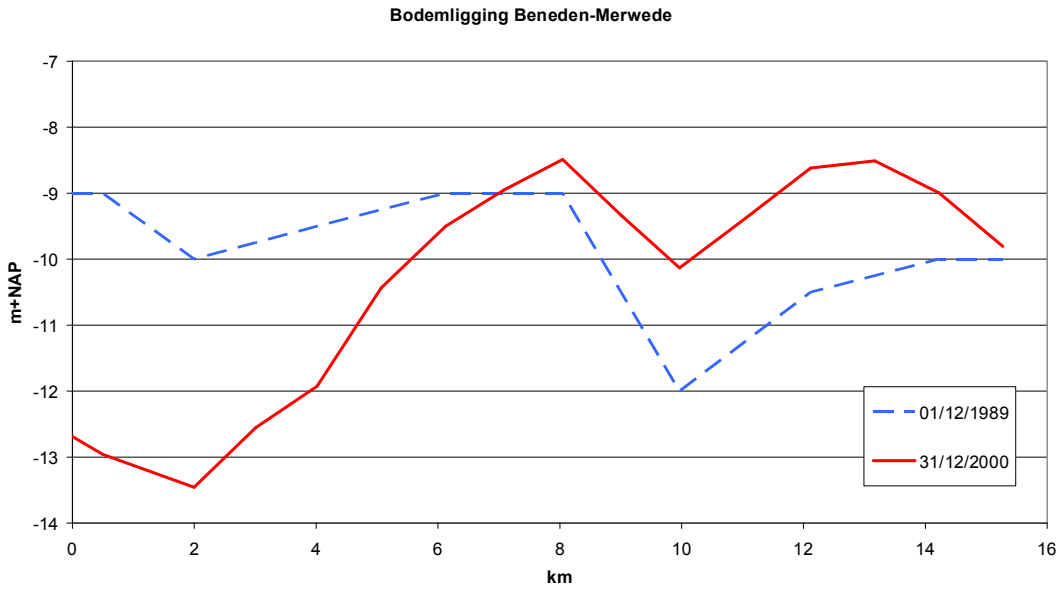
- simulatieperiode betreft 1/12/1989 – 1/1/2001.
- hydraulische tijdstap ½ uur
- Transportformule Engelund en Hansen voor alle takken. Voor Merwedes en Waal wordt deze vermenigvuldigd met een kalibratiefactor van 0,8, in de overige takken een factor 1,0.
- Getabuleerde dwarsprofielen.

Met het hydraulisch en morfologisch model is met succes een periode van 10 jaar doorgerekend met uniform sediment en de transportformule van Engelund Hansen. Enkele resultaten zijn weergegeven in onderstaande figuren.

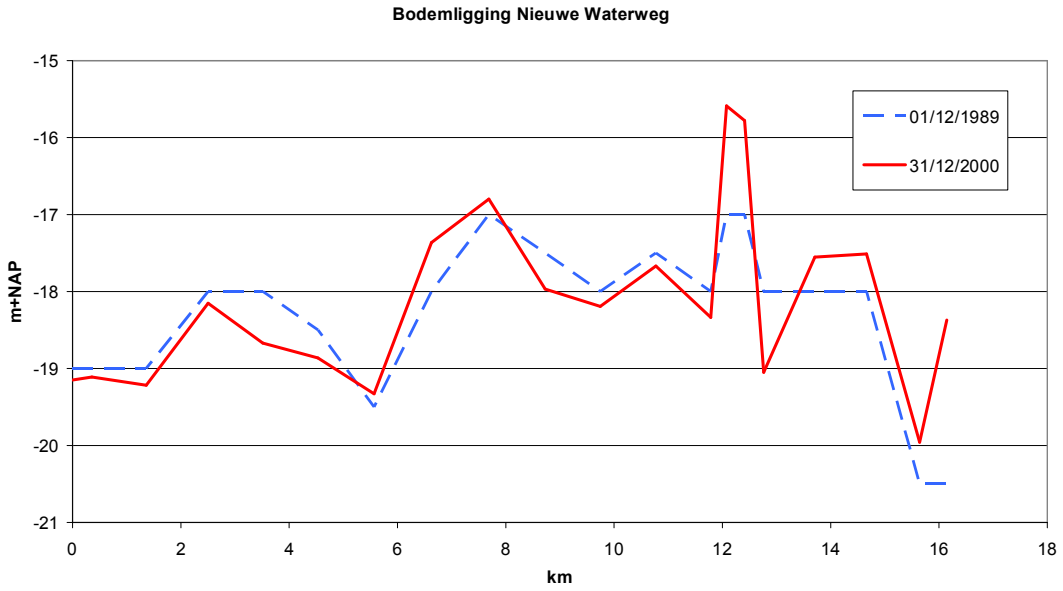
De resultaten bleken goed overeen te stemmen met die van Arjan Mol (2003) berekend met behulp van het SOBEK-RE instrumentarium..



Figuur C.3 Bodemligging (diepste punt) berekend met uniform sediment: Waal en Boven-Merwede, gemeten vanaf Tiel



Figuur C.4 Bodemligging (diepste punt) berekend met uniform sediment: Beneden-Merwede, gemeten vanaf Merwede Kop



Figuur C.5 Bodemligging (diepste punt) berekend met uniform sediment: Nieuwe Waterweg

C.3 Schematisatie voor multi-fractie aanpak

Omdat de simulaties met Van Rijn zijn uitgevoerd met een multi-fractie aanpak is in eerste instantie de morfologische invoer uitgebreid met gegradeerd-sediment informatie. Uitgegaan wordt van de in paragraaf C.2 beschreven schematisatie voor morfologische berekeningen met uniform sediment voor de periode 1/12/1989 – 1/1/2001. De volgende uitbreidingen zijn daarvoor opgenomen:

Sedimentfracties

- Uitgebreid naar niet-uniform sediment met de volgende fracties:

Tabel C.1 Gehanteerde korrelfractieverdeling met grove opdeling (5 fracties)

i	Dmin (mm)	Dmax (mm)	Naam
1	0,001	0,008	klei
2	0,008	0,063	silt
3	0,063	0,5	fijn zand
4	0,500	8,0	grof zand/grind
5		>8,0	overig

Tabel C.2 Gehanteerde korrelfractieverdeling met grove opdeling voor DelWAQ (4 fracties)

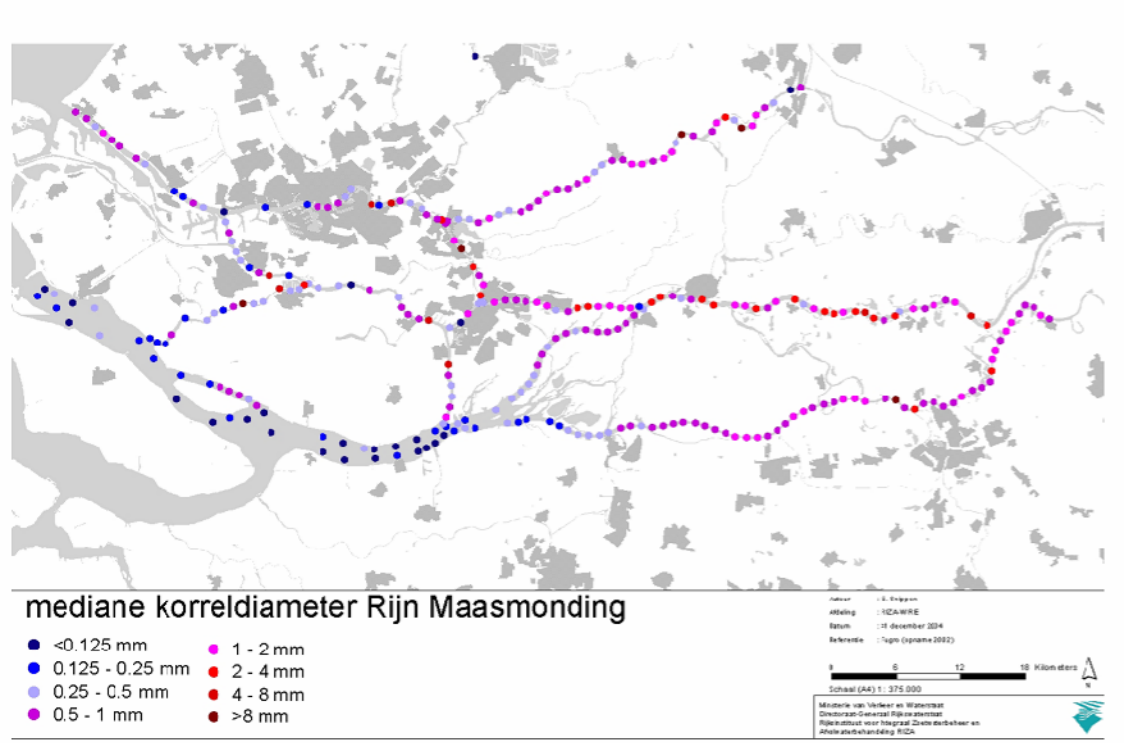
i	Dmin (mm)	Dmax (mm)	Naam
1	0,001	0,008	klei
2	0,008	0,18	silt en fijn zand
3	0,18	1,0	medium zand
4	1,0	8,0	grof zand/grind

Tabel C.3 Gehanteerde korrelfractieverdeling met fijnere opdeling (8 fracties)

i	Dmin (mm)	Dmax (mm)	Naam
1	0,001	0,008	klei
2	0.008	0,0224	fijn silt
3	0,0224	0,063	silt
4	0,063	0,1775	fijn zand
5	0,1775	0,5	medium zand
6	0,5	2,0	grof zand
7	2,0	8,0	fijn grind
8	>8,0		overig (grind)

Motivatie:

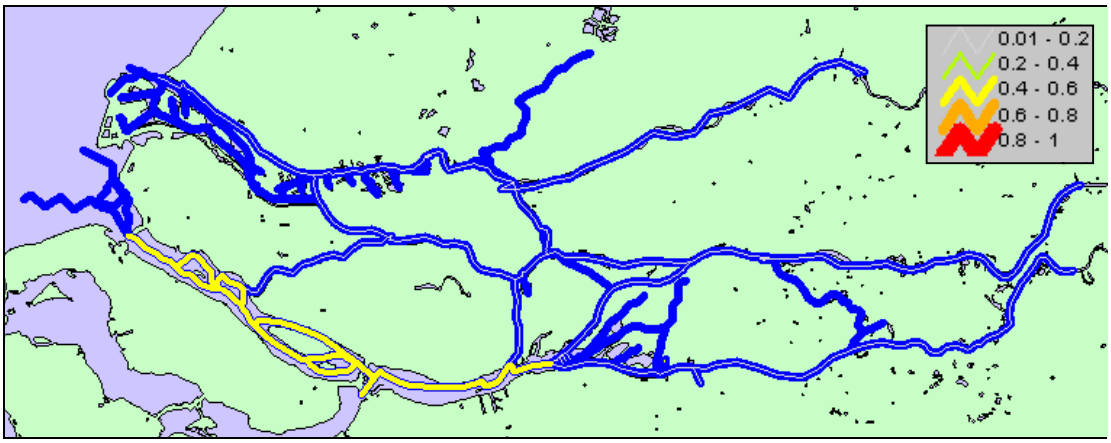
- Het modelconcept vraagt geen fijnere opdeling (voldoende om beoogde effecten te simuleren). Ook is het vanuit het oogpunt van beschikbare data niet gepast hier een verder opdeling in klasses te maken.
- Door Fugro is voor het gehele gebied in 2002 de korrelgrootteverdeling (zeefkromme) bepaald op basis van bodemmonsters van de bovenste laag. Een bewerkte versie van deze gegevens is gebruikt als basis voor indeling in fracties en de initiële bodemsamenstelling (zie volgende alinea). Fugro hanteerde de slibfractie (0-63mu) als kleinste fractie. Aangezien in het deltagebied juist de kleifractie (<8mu) een belangrijke rol speelt, is besloten om de slibfractie verder onder te verdelen in een klei- en een siltfractie.



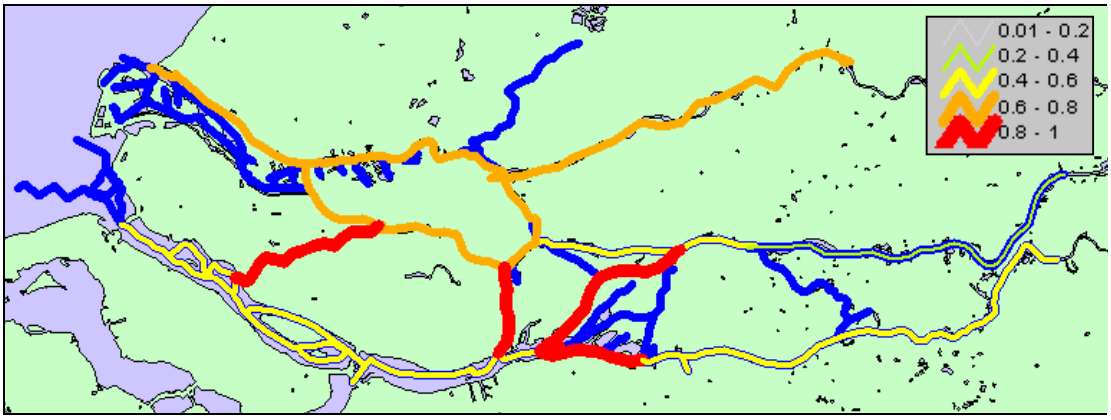
Figuur C.6 Mediane korreldiameter afgeleid uit bemonstering van de rivierbodem (Snippen et al., 2005)

Initiële bodemsamenstelling

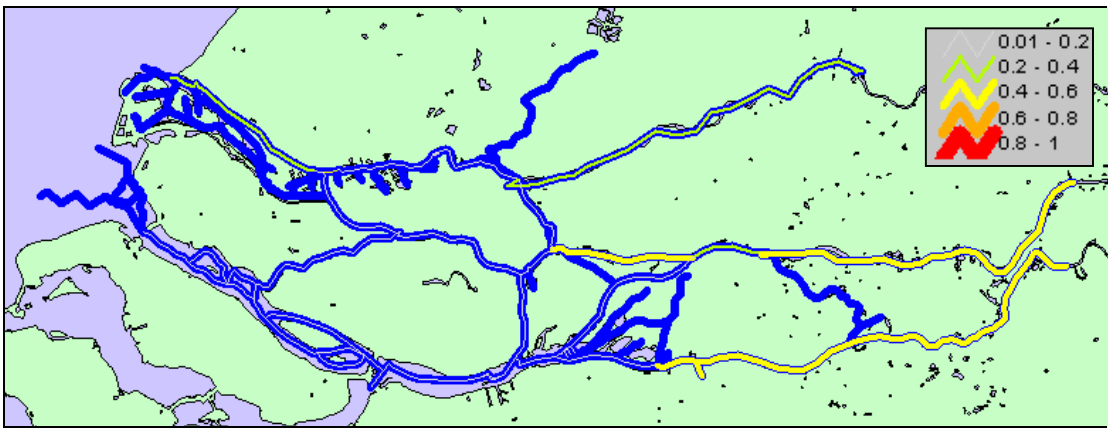
Fugro heeft op een groot aantal locaties in het gebied bodemmonsters genomen in het midden van de rivier (Figuur C.6). Vervolgens is op basis van laboratoriumonderzoek bepaald hoeveel van een aantal fracties in het monster werd aangetroffen. Voor de modelschematisatie zijn deze gegevens gemiddeld over lengte van de tak zoals gedefinieerd in het SOBEK model. Figuur C.7 tot Figuur C.9 tonen het resultaat van deze exercitie voor de fracties slib, fijn zand en overig materiaal. De fractie slib (<63 mu) is in het model verder onderverdeeld in klei en silt op basis van onderzoek van Van Ledden (2003), waaruit is gebleken dat de klei-silt verhouding voor de deltagebieden/estuaria in Nederland in de orde 0.16-0.28 ligt. Op basis hiervan is besloten voor deze studie uit te gaan van een vaste %klei/%silt verhouding van 0.25.



Figuur C.7 Fractie slib (<63µm)



Figuur C.8 Fractie fijn zand (63-500µm)



Figuur C.9 Fractie overig materiaal (500-8000µm)

In de periode 1999-2002 is in de Medusa meetcampagne voor een beperkt aantal takken het zand-slib gehalte van de toplaag bepaald op basis van radiometrische metingen. Deze gegevens waren slechts voor enkele takken beschikbaar, en voegen voor deze studie weinig toe aan hetgeen reeds beschikbaar was uit de Fugro dataset. Er is daarom besloten voorlopig geen gebruik te maken van deze gegevens.

Transportformule

Conform de opdracht is gebruik gemaakt van de Van Rijn sedimenttransportformule, versie 2007. De correctiefactor voor Critical Bed Shear Stress is uniform op 0,9 gezet. Dit zorgt ervoor dat ook op de grover trajecten ook bij gemiddelde afvoeren nog voldoende sediment wordt getransporteerd.

Splitsingspunten

Voor de zandverdeling op splitsingspunten (bijvoorbeeld de Merwedekop) is het noodzakelijk een verdelingsfunctie te kiezen waarmee het totaaltransport wordt verdeeld als functie van de afvoerverdeling over de twee afstromende takken. Conform het SOBEK-RE model van Mol (2003) is gekozen voor een verdelingsfunctie volgens een machtswet in de vorm:

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{-1} \qquad \text{(C.1)}$$

Voor alle fracties wordt deze verdelingsfunctie gehanteerd (geen uitzeving):

$MCNODE NODE 1 POW 2 -1 2 -1 2 -1 2 -1 2 -1

In de DelWAQ-berekeningen is geconstateerd dat de macht 2 in bovengenoemde relatie mogelijk kan leiden tot instabiel gedrag van de splitsingspunten. Voor deze berekeningen is daarom gerekend met een macht 3. Voor de splitsing van de Merwedes is ook onderzocht of een verhoging van de macht -1 naar -2 (of -3) een beter resultaat oplevert op de Beneden-Merwede.

Menglaag en onderlagen

Gebruik wordt gemaakt van de aanpak waarbij de menglaag een constante dikte krijgt, welke door de gebruiker is te kiezen. De laagdikte is gerelateerd aan de gemiddelde hoogte van beddingvormen, en daardoor moeilijk te definiëren (hiervoor is een betrouwbare duinhoogtevoorspeller nodig). Uitgegaan is van een dikte van 0,5 m op basis van ervaringen uit eerdere modeltoepassingen. In de volgende subparagraaf is getoond wat de invloed is van de laagdikte op het gedrag van het model

Baggerwerk

Het baggerwerk in de simulatieperiode 1990-2000 is overgenomen uit het basismodel met uniform sediment (Mol, 2003), en naar rato verdeeld over de sedimentfracties. In de aanpak van Mol wordt in de eerste tijdstap op een groot aantal locaties gebaggerd met het doel het dwarsprofiel aan te passen aan de beginsituatie van 1990. Daarna resteert een beperkt aantal locaties waar wordt gebaggerd en gestort. Voor de DelWAQ-module zijn bovengenoemde baggerhoeveelheden vereenvoudigd tot constante onttrekkingen over de beschouwde trajecten. Daarbij zijn de baggerwerkzaamheden ten behoeve van de profielaanpassing naar 1990 verwijderd.

Morfologische factor

Voor het versnellen van de berekeningen is gebruik gemaakt van een morfologische factor. In het model zijn de berekende sedimenttransporten vermenigvuldigd met deze factor zodat daarmee de morfologische veranderingen aanzienlijk worden versneld (bijvoorbeeld Mol, 2003). Voorwaarde voor deze aanpak is dat voor de waterbeweging de getijranden onveranderd worden gehandhaafd, maar dat de hydrograaf (afvoertijdsreeks) op de instroomranden evenredig met de factor wordt ingedrukt in de tijd. Gerekend is met de volgende instelling:

- Factor 1: begintijd = 1/12/1989, 00:00:00; eindtijd = 1/1/2001, 00:00 u
- Factor 6: begintijd = 1/12/1989, 00:00:00; eindtijd = 6/10/1991, 20:00 u
- Factor 12: begintijd = 1/12/1989, 00:00:00; eindtijd = 3/11/1990, 10:00 u

Om stabiliteitsproblemen te vermijden is grotendeels gerekend met een morfologische factor 6. Vergelijkingen gemaakt van resultaten tussen berekeningen met factor 6 en factor 12 tonen dat er nagenoeg geen verschillen zijn in de eindresultaten van deze berekeningen.

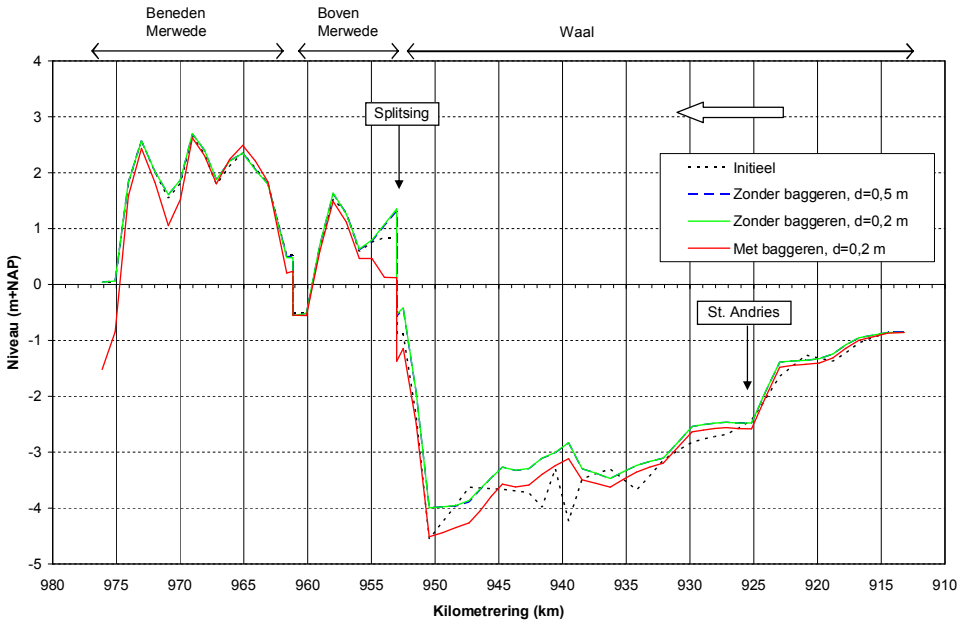
Overige aspecten

- Problemen traden op tijdens afvoerpiek 1995 op de Rijn (Waal en Lek). Om die reden is het afvoerverloop van 1995 vervangen door het afvoerverloop van 1994.
- Een simulatie met een menglaagdikte van 0,1 m bleek een foutmelding op te leveren voor de simulaties met de SOBEK-RE morfologie module. Met de gekozen instellingen werd op een aantal locaties teveel sediment uit de toplaag te worden onttrokken per tijdstap (voor een aantal fracties). Dat wil zeggen, er wordt meer sediment uit de toplaag onttrokken dan dat er beschikbaar is, en er ontstaan “negatieve” fracties. Oplossing met behulp van een kleinere tijdstap of aanpassing van de baggersnelheid is niet verder onderzocht. Bij een laagdikte van 0,2 m bleek het probleem niet meer op te treden.

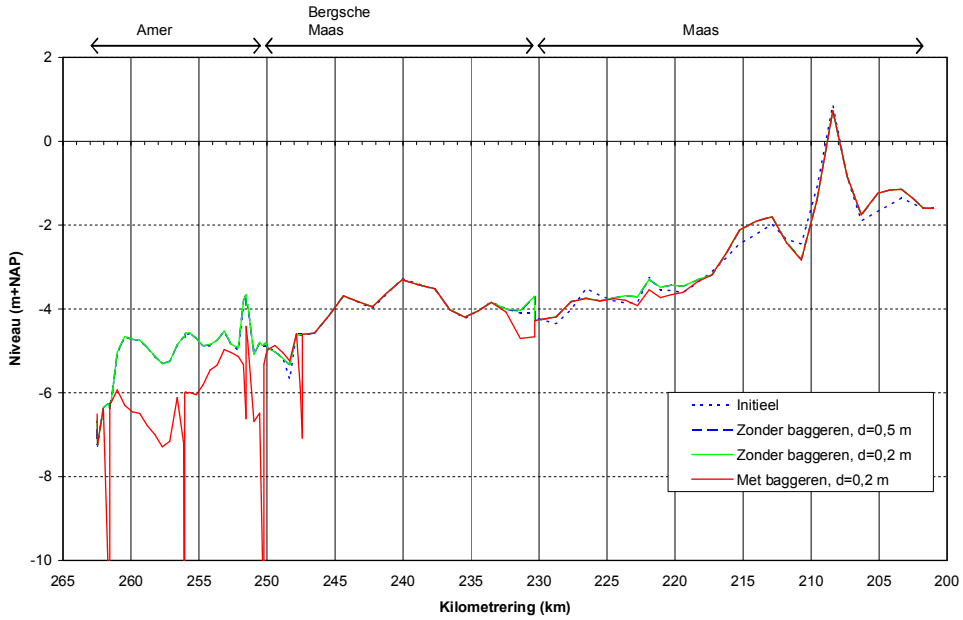
C.4 Simulatieresultaten met SOBEK-RE morfologie module in SOBEK-River

C.4.1 Bodemligging, 8 fracties

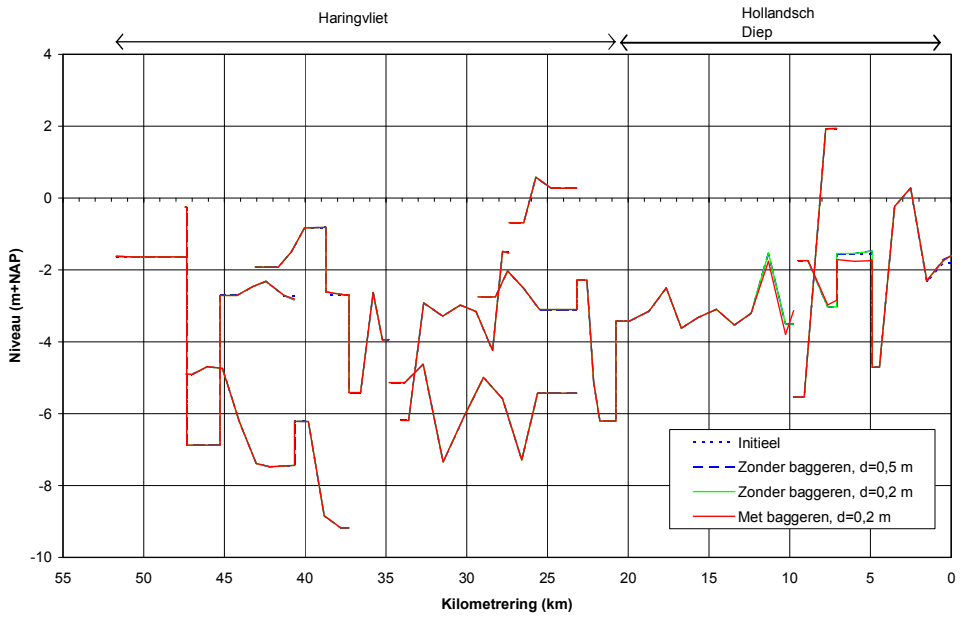
In onderstaande figuren staan voor verschillende takken de berekende breedtegemiddelde bodemligging. De berekeningen zijn uitgevoerd met 8 fracties voor de periode 1989-2000, met een menglaagdikte van 0,2 m en 0,5 m. De morfologische factor is gelijk aan 6.



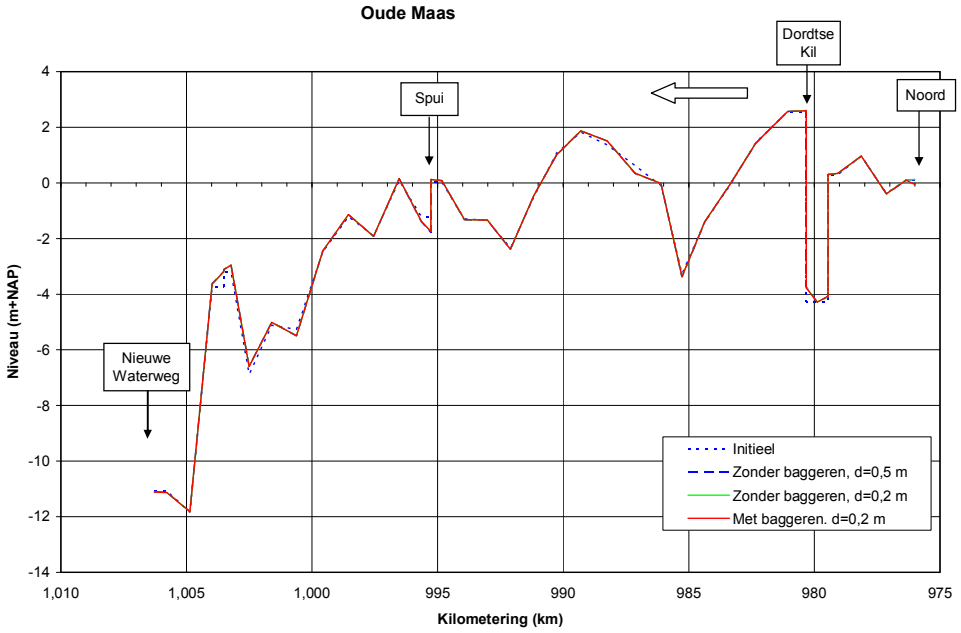
Figuur C.10 Berekende bodemligging initieel (december 1989) en aan eind van de berekening (januari 2000) voor Waal en Merwedes ("d"=menglaagdikte) (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



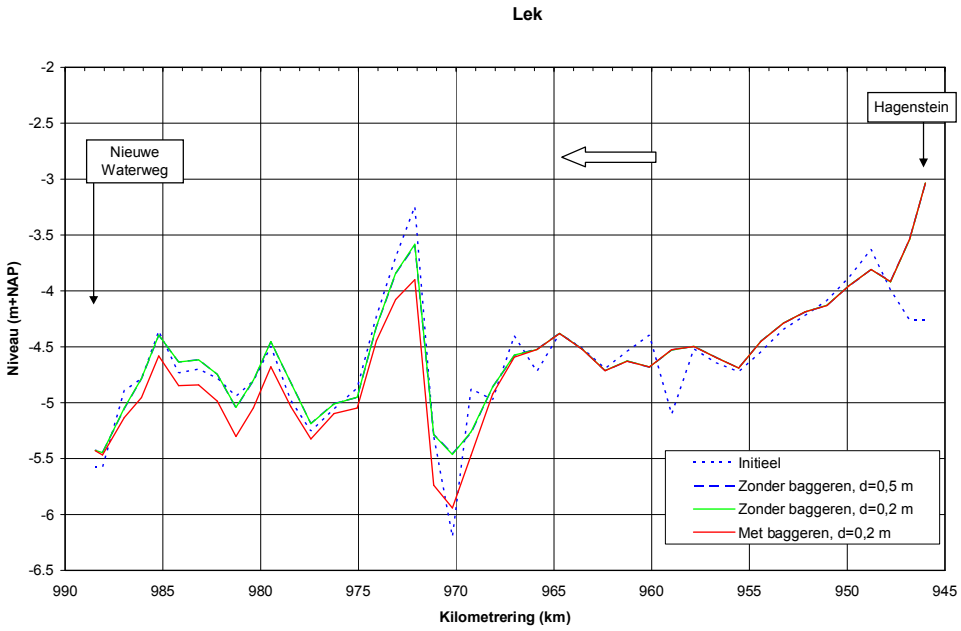
Figuur C.11 Berekende bodemligging initieel (december 1989) en aan eind van de berekening (januari 2000) voor Maas t/m Amer. (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



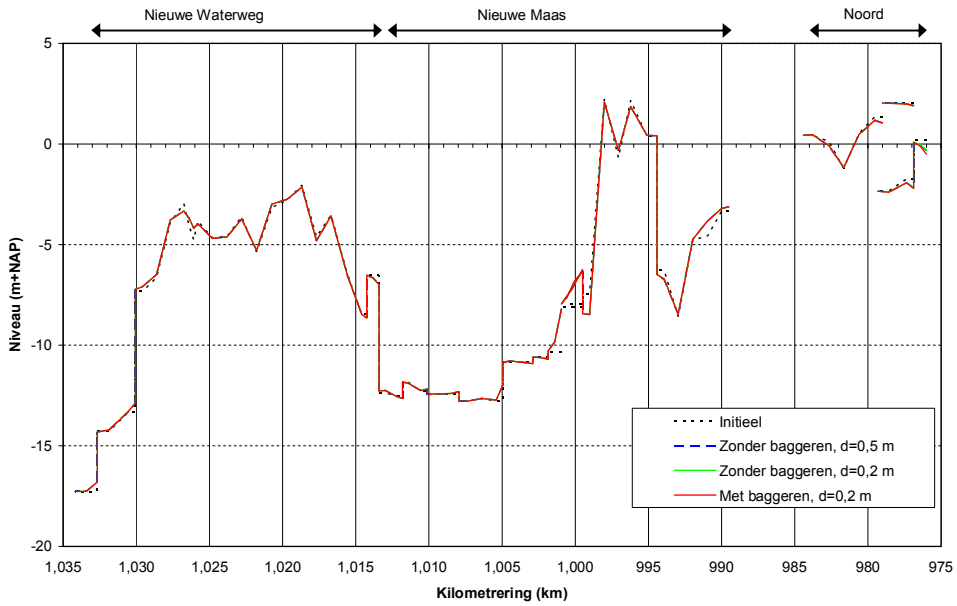
Figuur C.12 Berekende bodemligging initieel (december 1989) en aan eind van de berekening (januari 2000) voor Hollandsch Diep en Haringvliet ("d"=menglaagdikte). In het Hollandsch Diep en Haringvliet is sprake van parallelle takken: in het rechter deel van deze figuur zijn de bodemliggingen van alle parallelle takken weergegeven (d.w.z, meerdere niveaus per locatie) (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



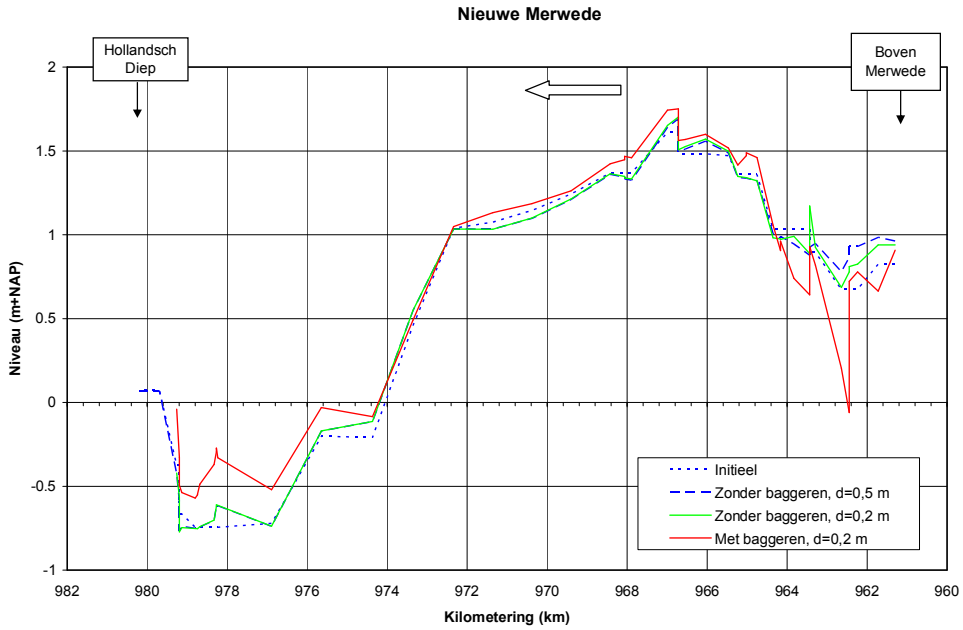
Figuur C.13 Berekende bodemligging initieel (december 1989) en aan eind van de berekening (januari 2000) voor de Oude Maas (“d”=menglaagdikte)) (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



Figuur C.14 Berekende bodemligging initieel (december 1989) en aan eind van de berekening (januari 2000) voor de Lek (“d”=menglaagdikte) (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)

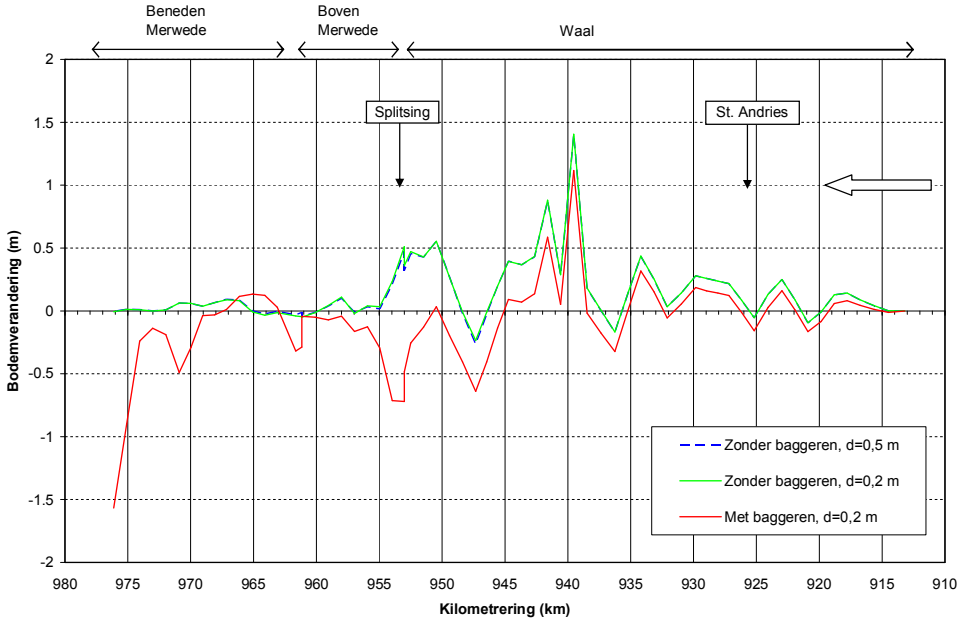


Figuur C.15 Berekende bodemligging initieel (december 1989) en aan eind van de berekening (januari 2000) voor de Noord, Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg ("d"=menglaagdikte) (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)

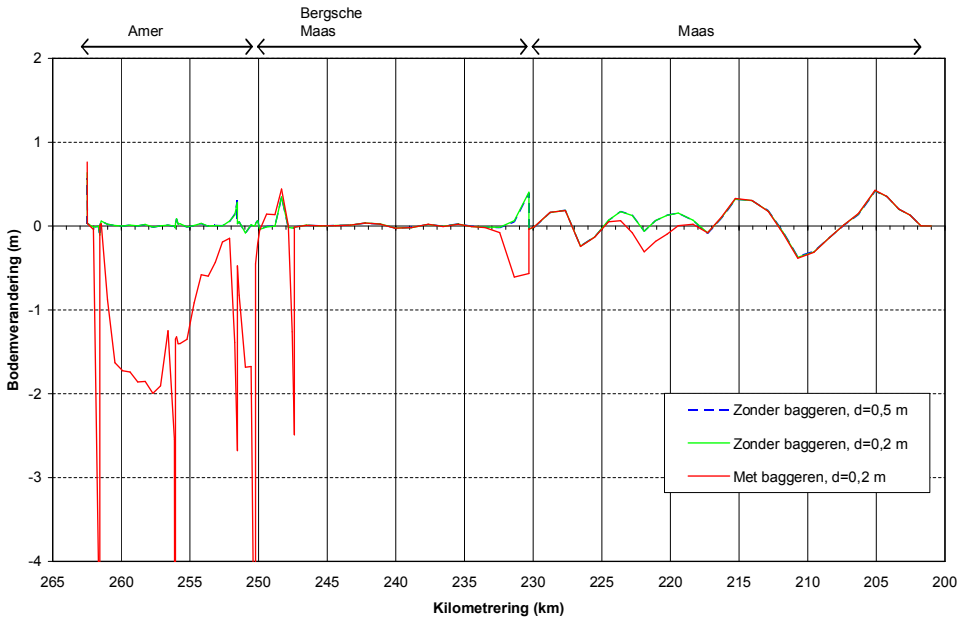


Figuur C.16 Berekende bodemligging initieel (december 1989) en aan eind van de berekening (januari 2000) voor de Nieuwe Merwede ("d"=menglaagdikte) (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)

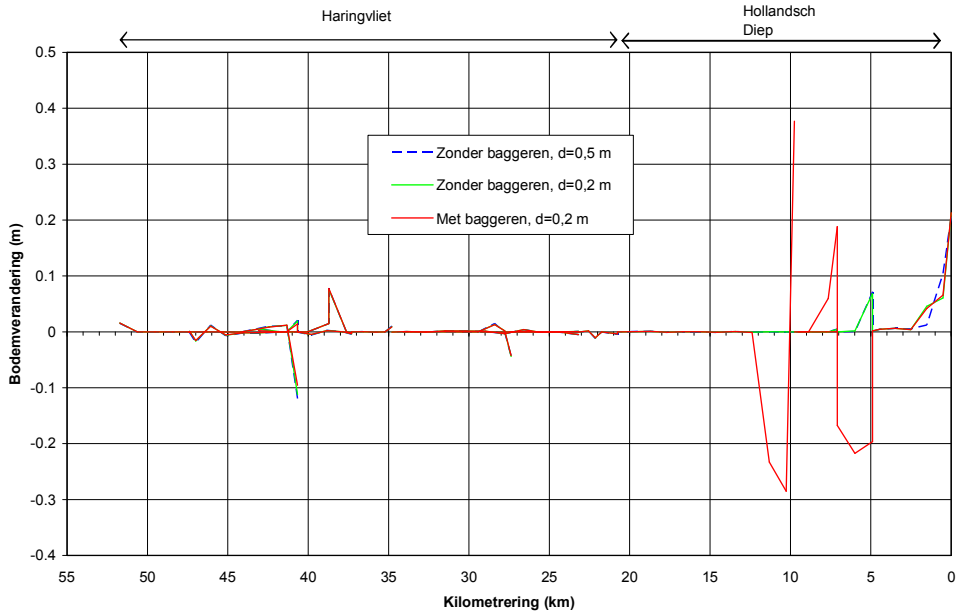
In de hieronder gepresenteerde figuren is de verandering van de breedtegemiddelde bodemligging over de periode 1989 – 2000 getoond.



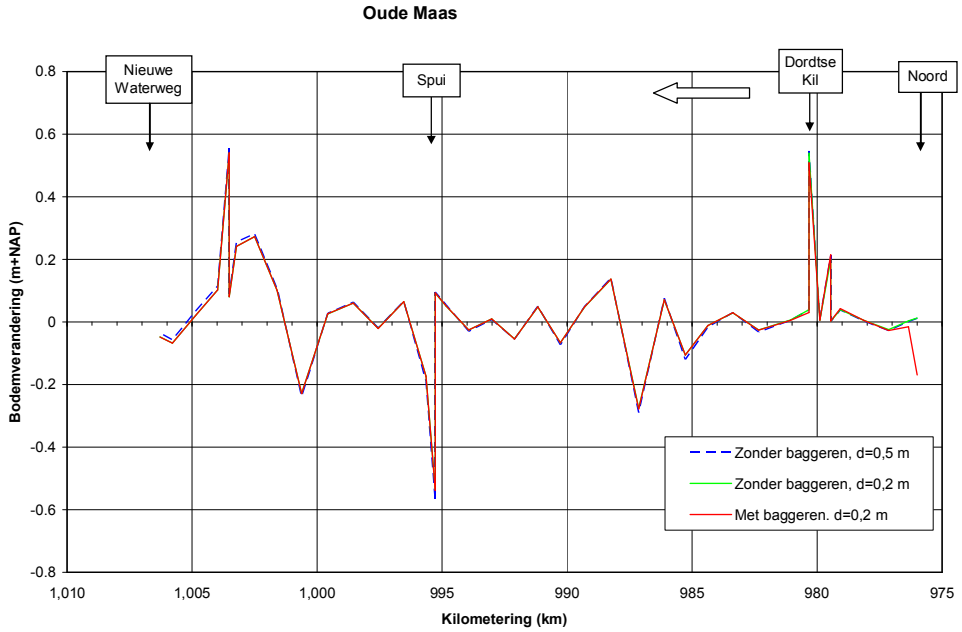
Figuur C.17 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Waal en Merwedes (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



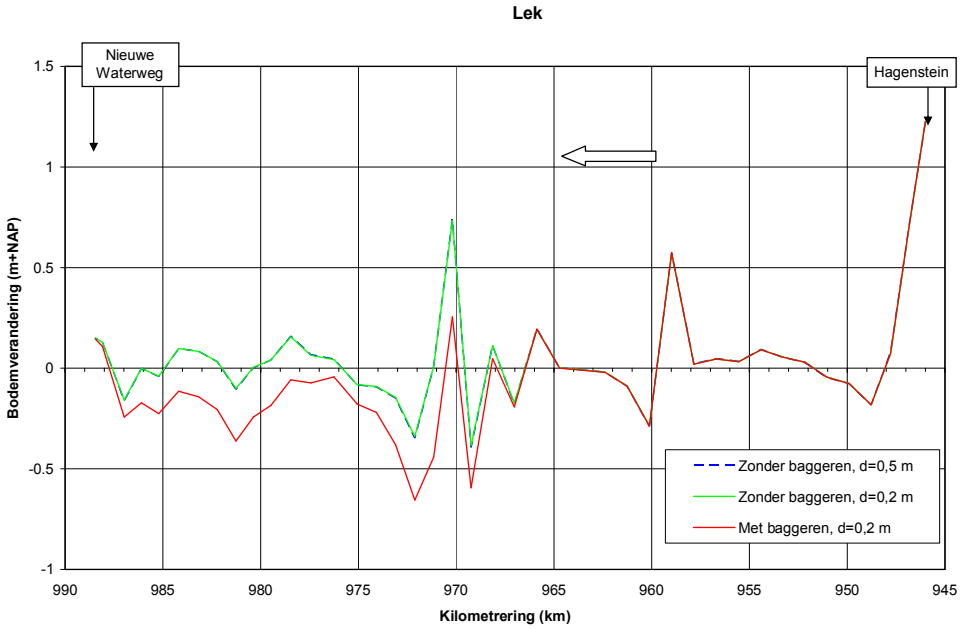
Figuur C.18 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Maas – Amer. De forse bodemdaling op de Amer is volledig het gevolg van baggerwerk. (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



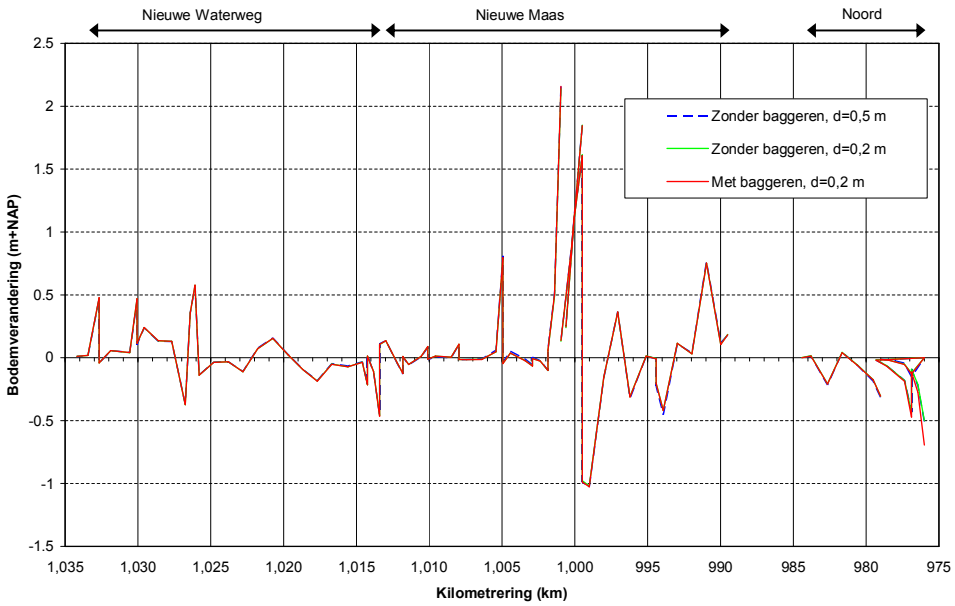
Figuur C.19 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Hollandsch Diep – Haringvliet. (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



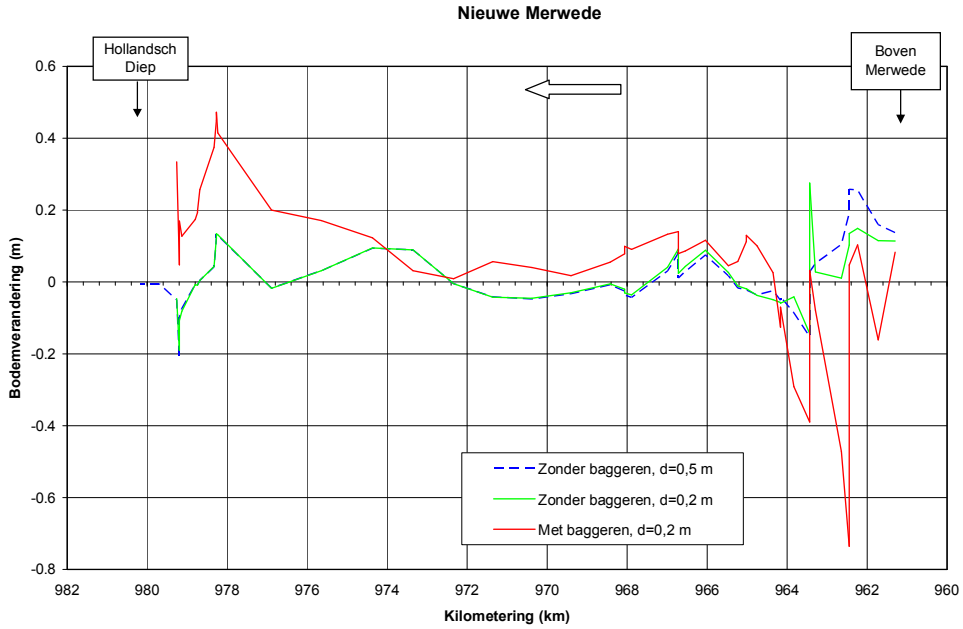
Figuur C.20 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Oude Maas (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



Figuur C.21 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Lek (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



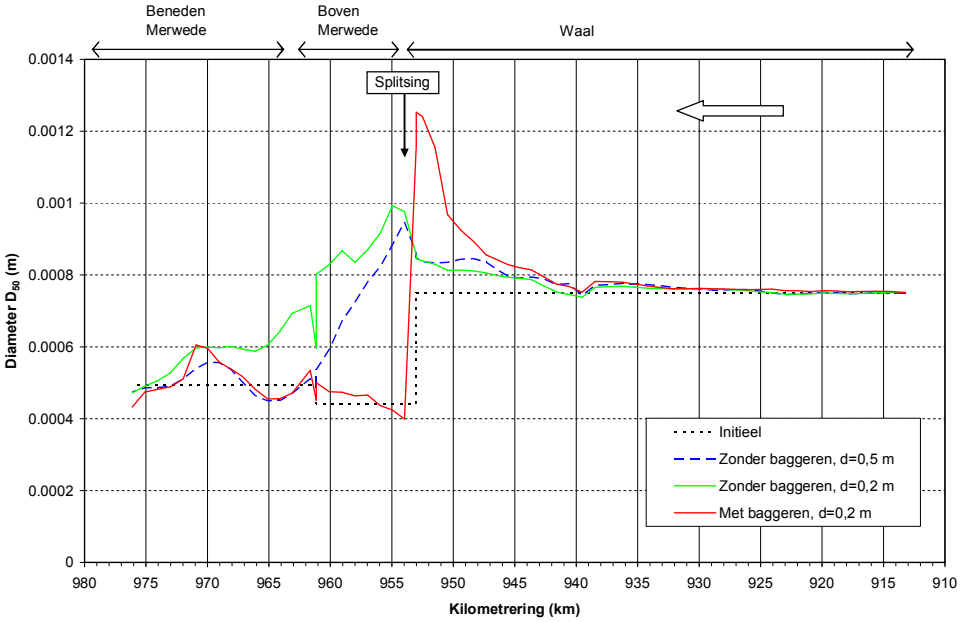
Figuur C.22 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Noord – Nieuwe Waterweg (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



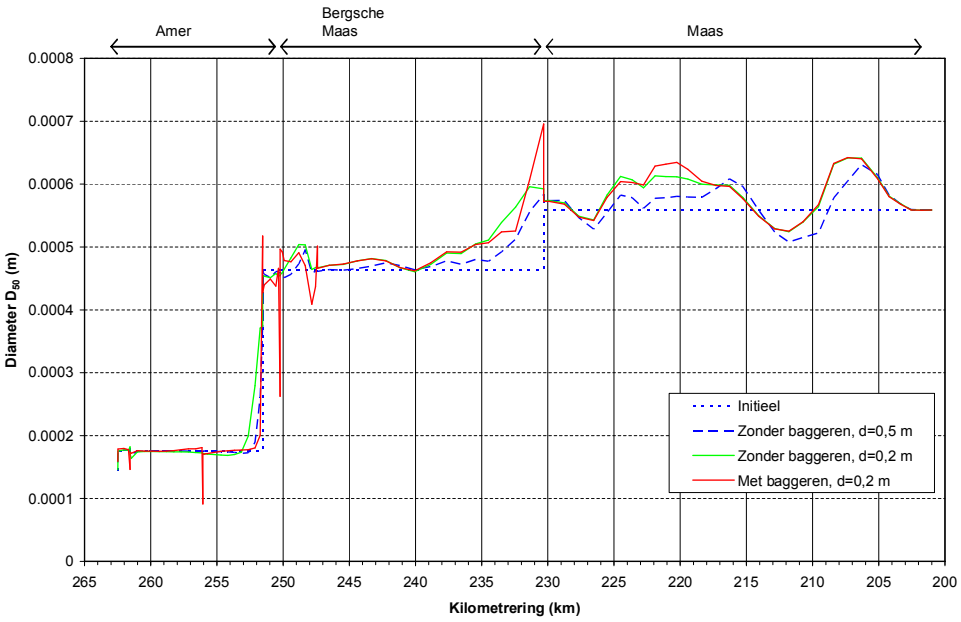
Figuur C.23 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Nieuwe Merwede (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)

C.4.2 Bodemsamenstelling, 8 fracties

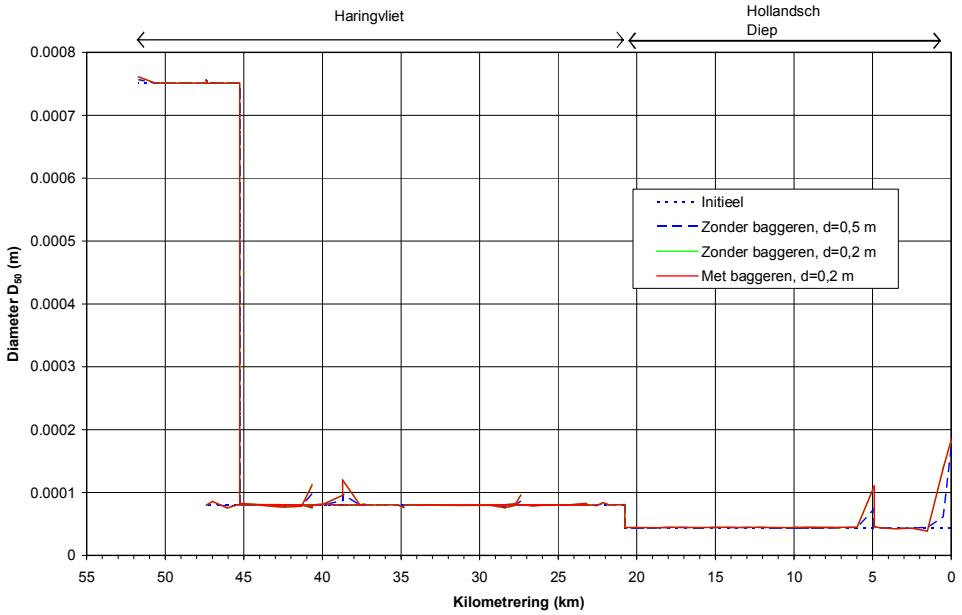
In onderstaande figuren staan voor verschillende takken de berekende breedte-gemiddelde mediane korreldiameter. De berekeningen zijn uitgevoerd met 8 fracties voor de periode 1989-2000, met een menglaagdikte van 0,2 m en een laagdikte van 0,5 m. De morfologische factor is gelijk aan 6. In de figuur is ook het effect van de laagdikte zichtbaar. In de eerste serie figuren is de ontwikkeling van de mediane korreldiameter D50 weergegeven. In de tweede serie is de ontwikkeling van de fractie slib (D<8 µm) weergegeven.



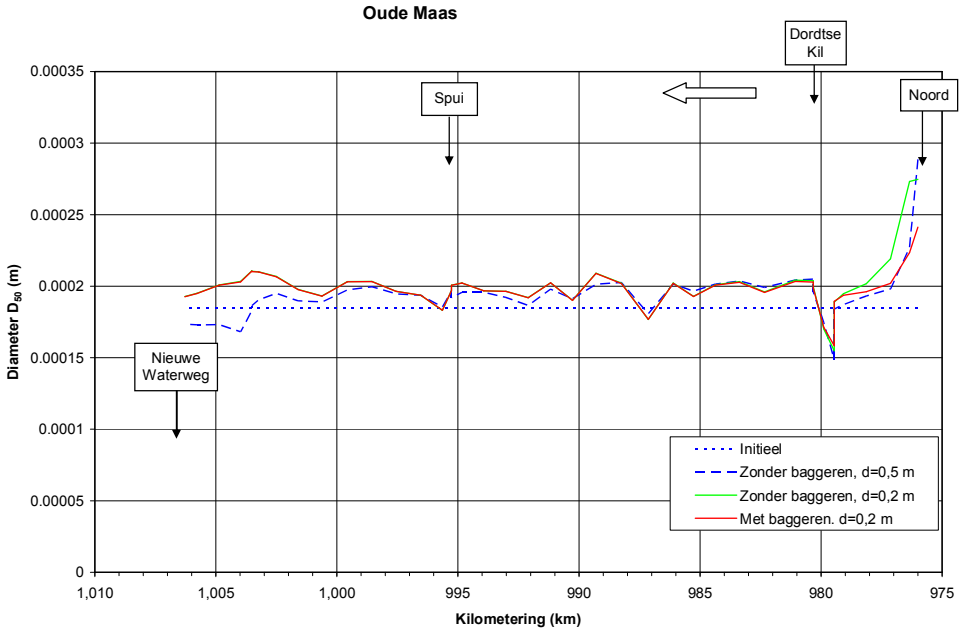
Figuur C.24 Berekende D_{50} (jan. 2000 – dec. 1989): Waal en Merwedes, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



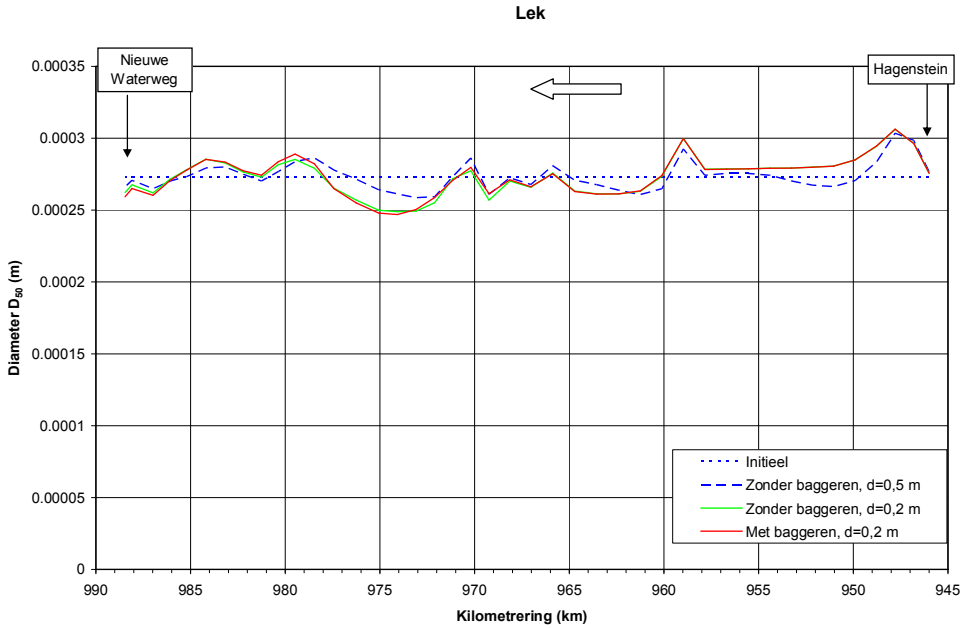
Figuur C.25 Berekende D_{50} (jan. 2000 – dec. 1989): Maas-Amer, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



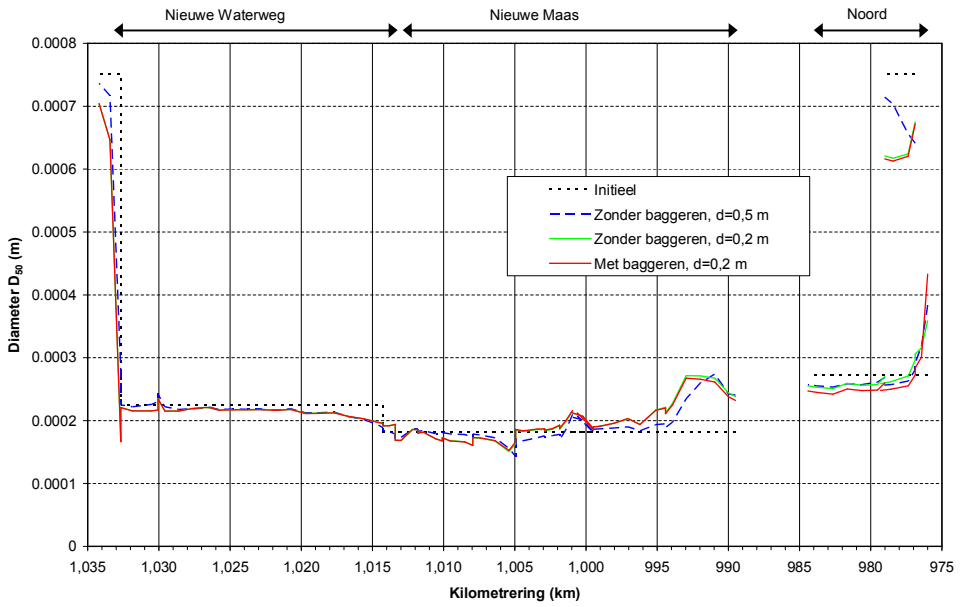
Figuur C.26 Berekende D_{50} (jan. 2000 – dec. 1989): Hollandsch Diep-Haringvliet, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



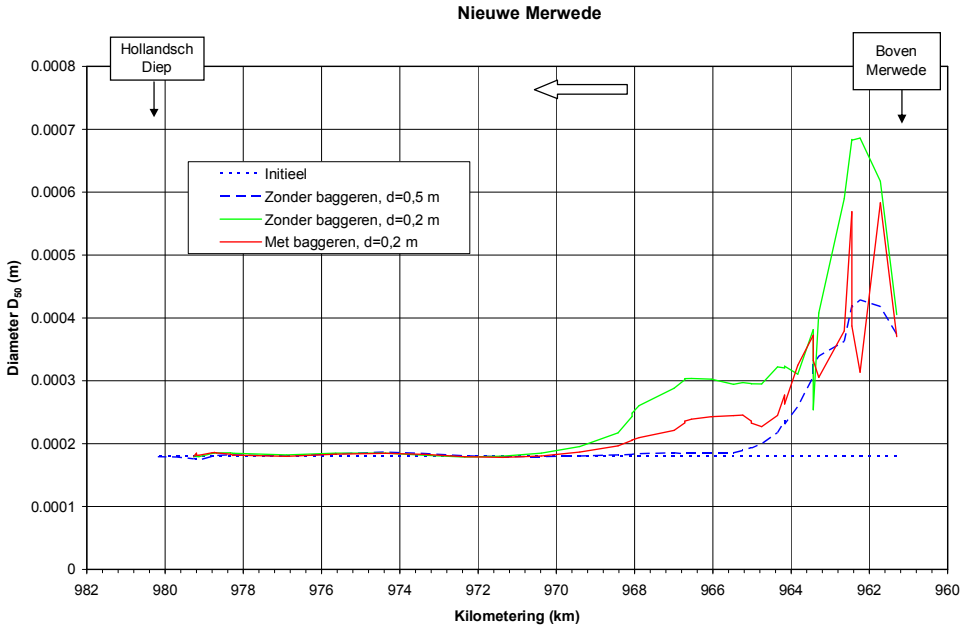
Figuur C.27 Berekende D_{50} (jan. 2000 – dec. 1989): Oude Maas, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



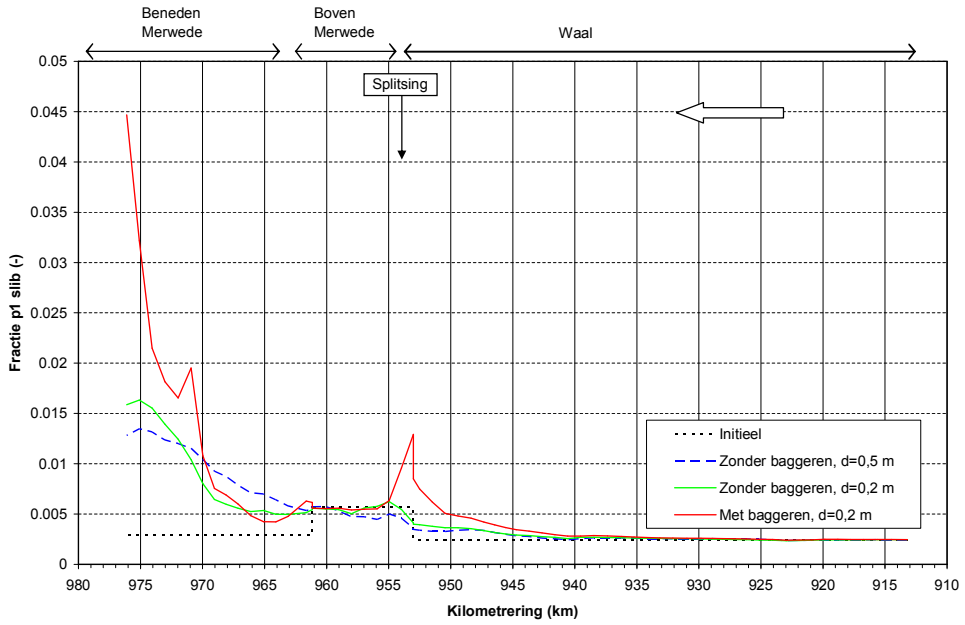
Figuur C.28 Berekende D_{50} (jan. 2000 – dec. 1989): Lek, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



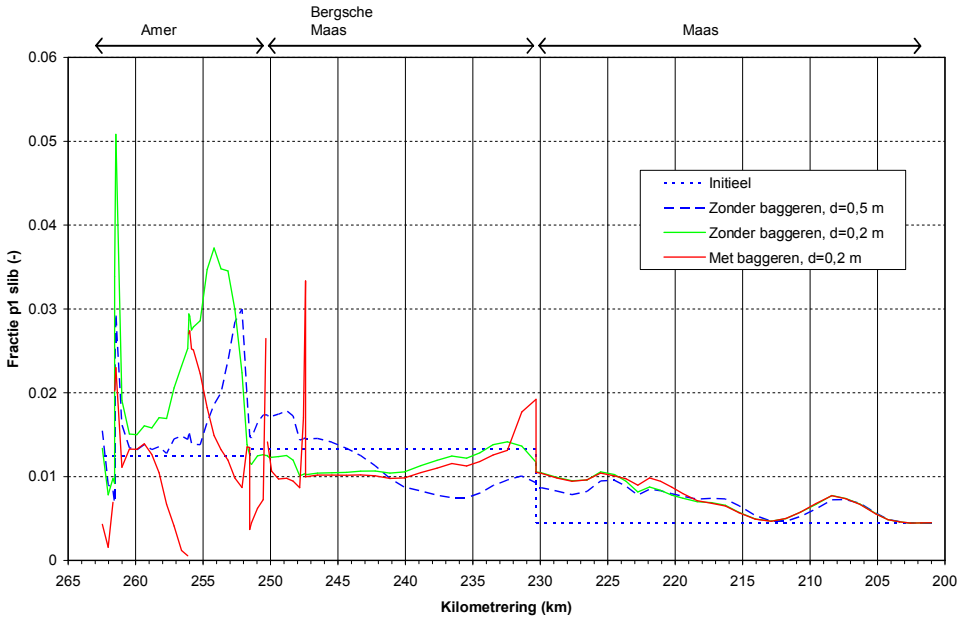
Figuur C.29 Berekende D_{50} (jan. 2000 – dec. 1989): Noord-Nieuwe Waterweg, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



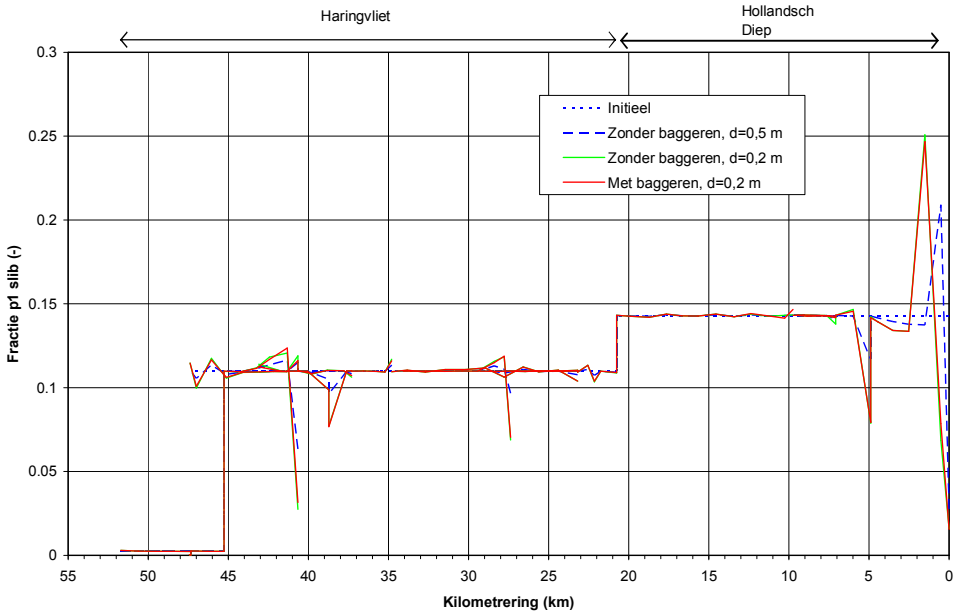
Figuur C.30 Berekende D_{50} (jan. 2000 – dec. 1989): Nieuwe Merwede, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



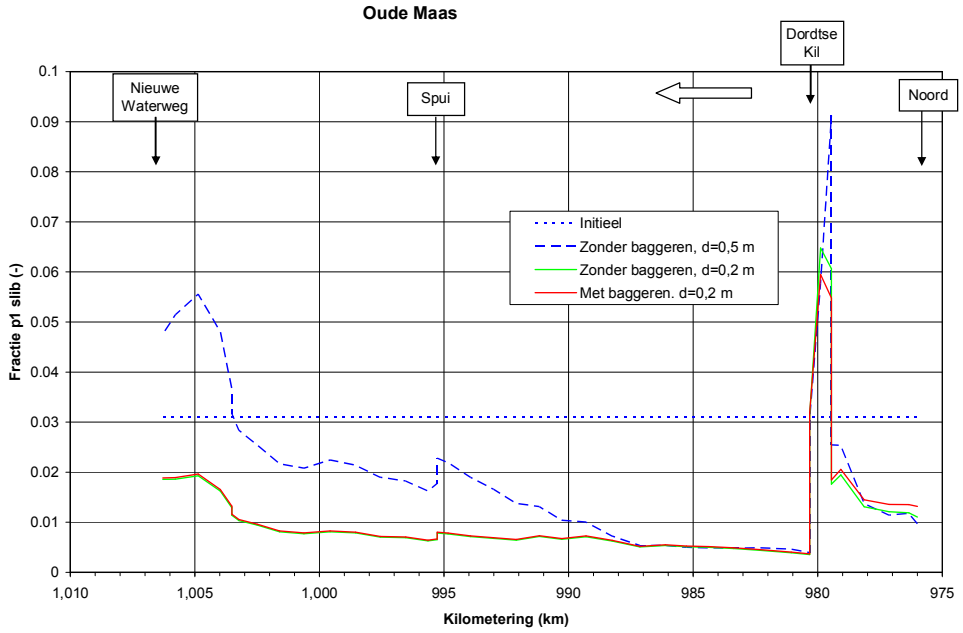
Figuur C.31 Berekende fractie p_1 (slib, jan. 2000 – dec. 1989): Waal en Merwedes, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



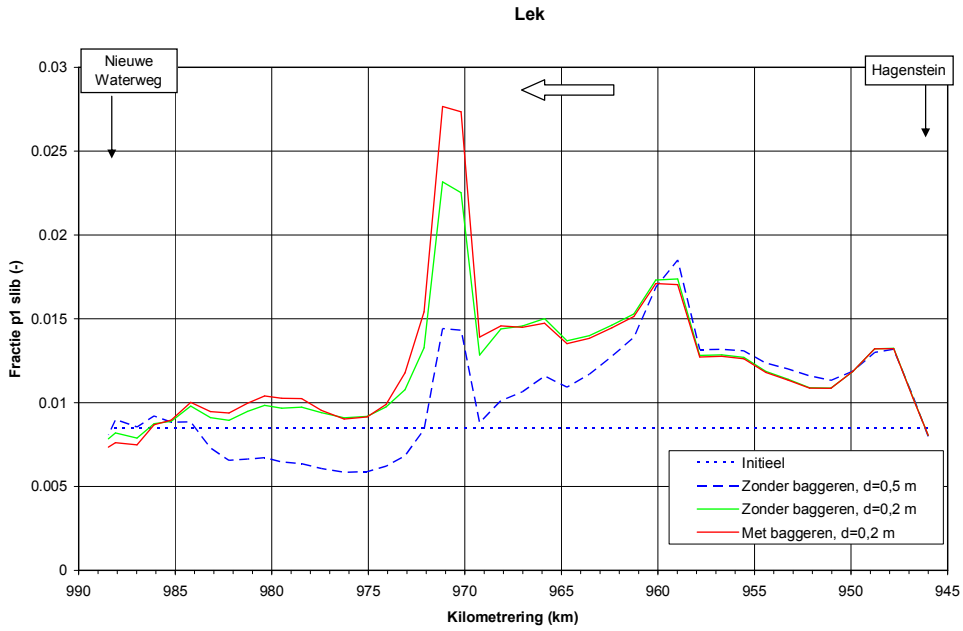
Figuur C.32 Berekende fractie p_1 (<8µm, jan. 2000 – dec. 1989): Maas – Amer, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



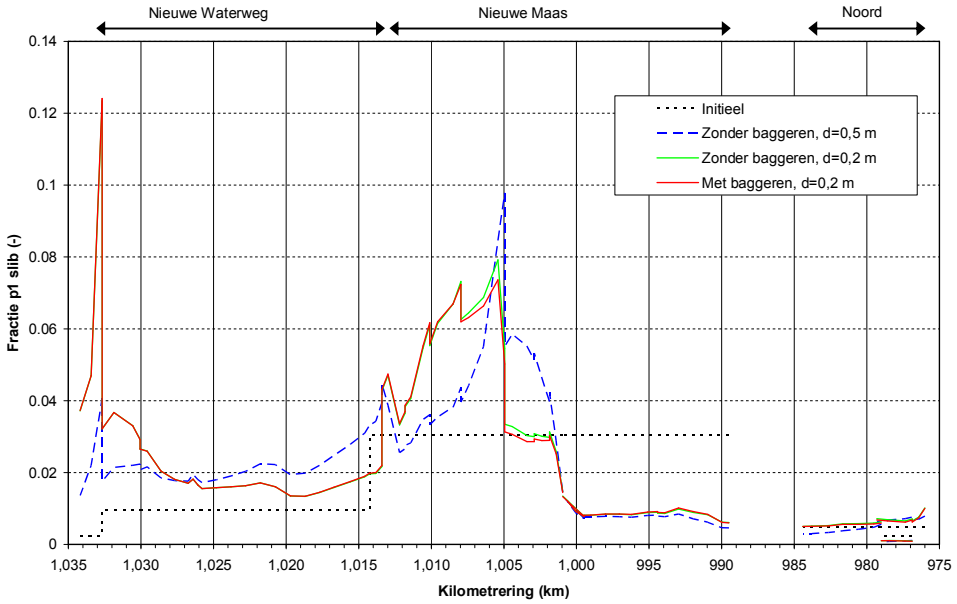
Figuur C.33 Berekende fractie p_1 (<8µm, jan. 2000 – dec. 1989): Hollandsch Diep – Haringvliet, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



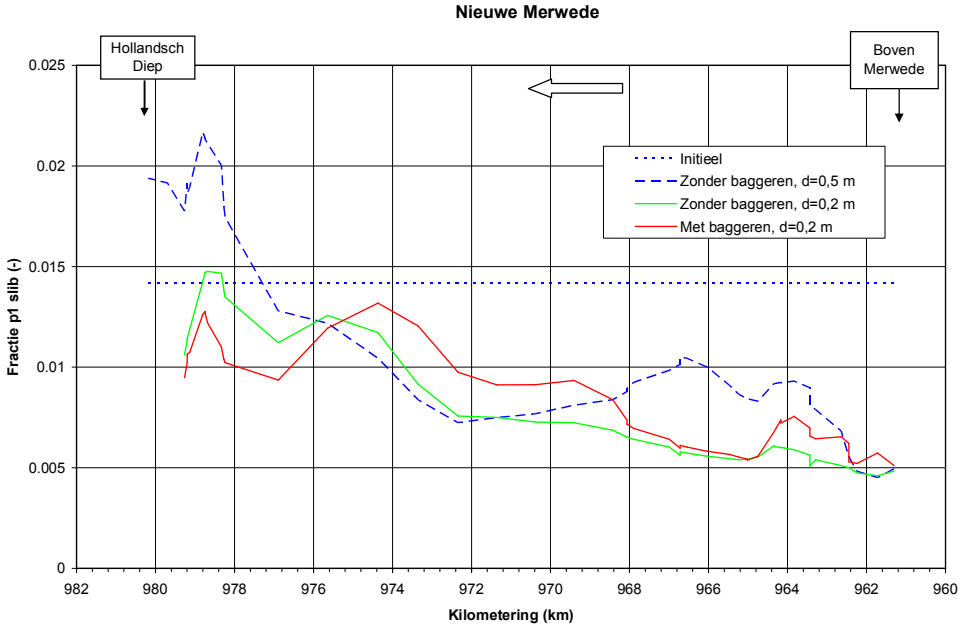
Figuur C.34 Berekende fractie p_1 (<8µm, jan. 2000 – dec. 1989): Oude Maas, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



Figuur C.35 Berekende fractie p_1 (<8µm, jan. 2000 – dec. 1989): Lek, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



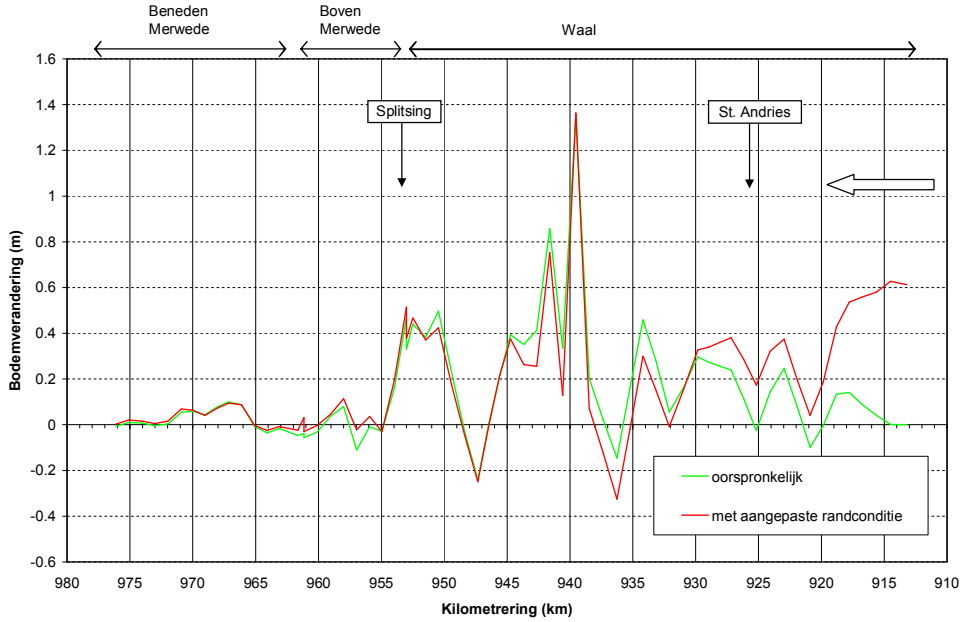
Figuur C.36 Berekende fractie p_1 (<8µm, jan. 2000 – dec. 1989): Noord - Nieuwe Waterweg, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)



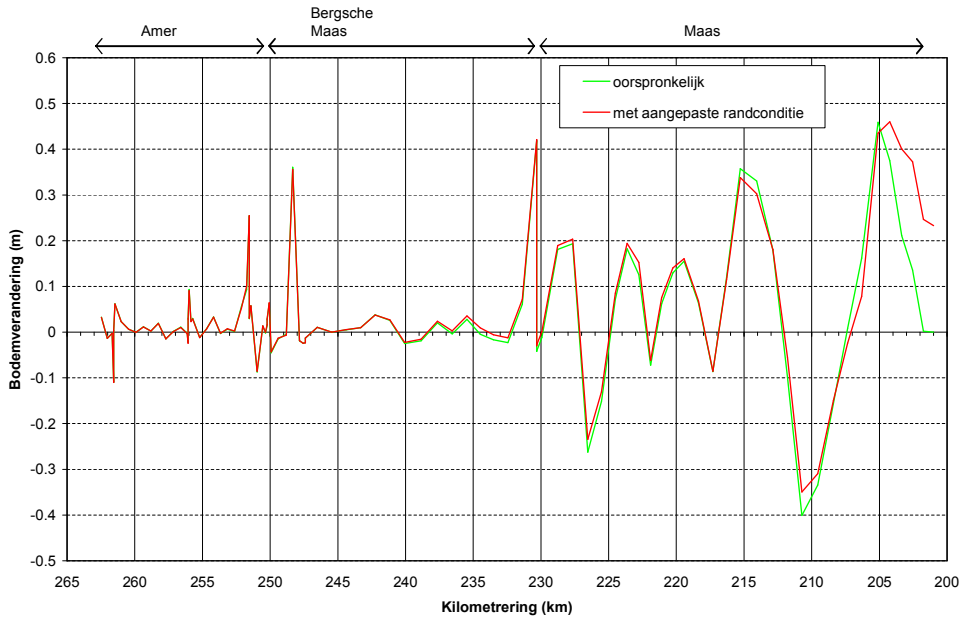
Figuur C.37 Berekende fractie p_1 (<8µm, jan. 2000 – dec. 1989): Nieuwe Merwede, met "d"=menglaagdikte (SOBEK-RE morfologie in SOBEK-River)

C.4.3 Bodemligging, 6 fracties, verhoogd aanbod slib

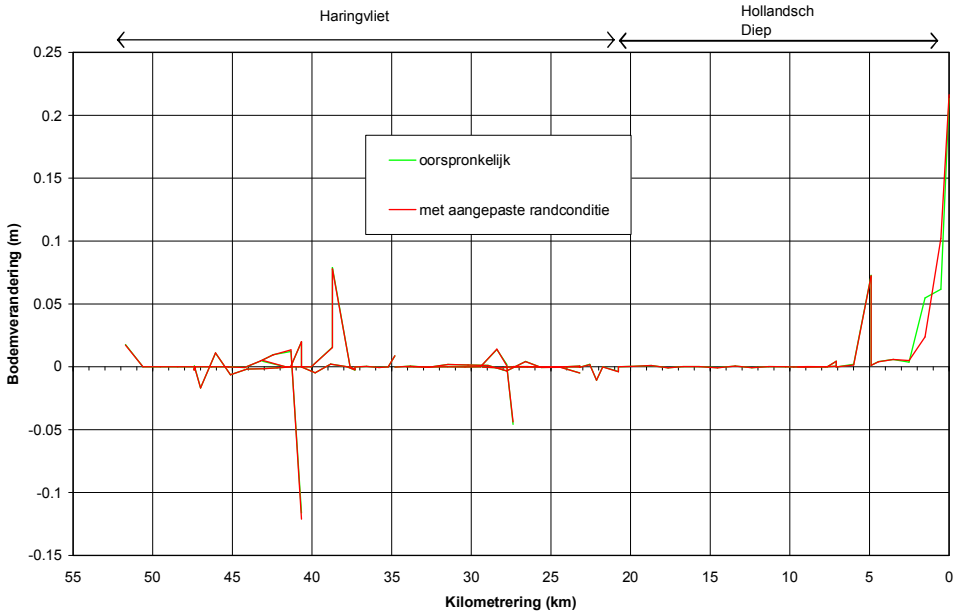
In onderstaande figuren staan de resultaten van berekeningen met een verhoogd aanbod van slib op de bovenrand ("met aangepaste randconditie") en de berekening met oorspronkelijke randcondities ("oorspronkelijk"). De berekeningen zijn gemaakt zonder baggeren/storten en met 6 sedimentfracties.



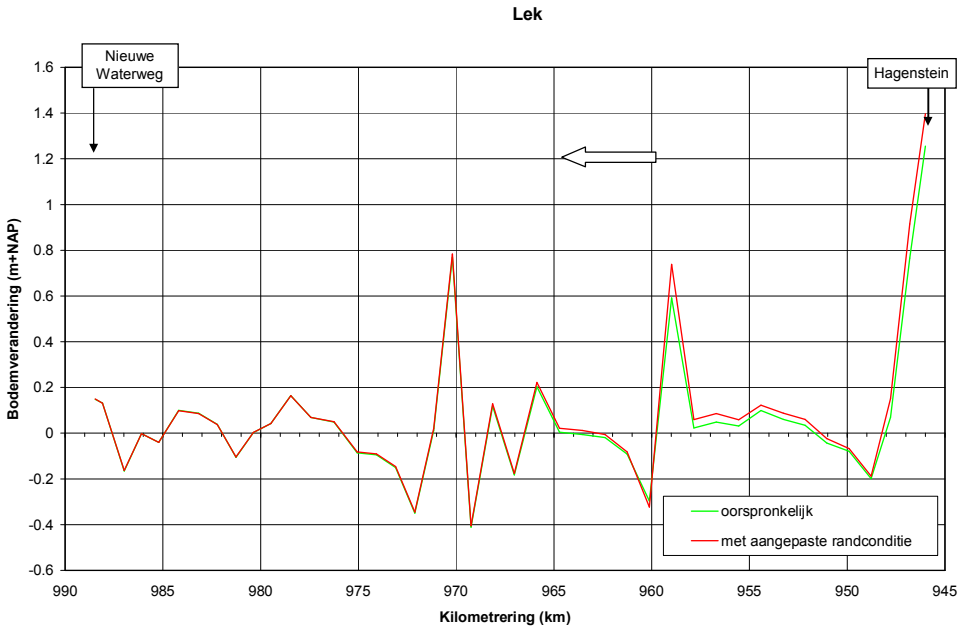
Figuur C.38 Berekende bodemverandering Waal en Merwedes met en zonder extra aanbod van slib op rand



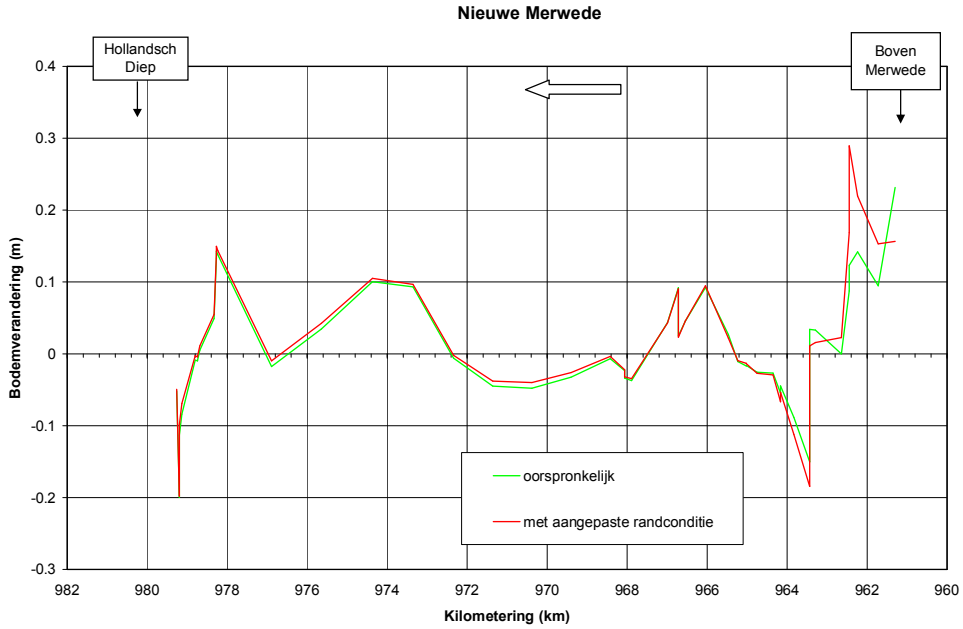
Figuur C.39 Berekende bodemverandering Maas t/m Amer met en zonder extra aanbod van slib op rand



Figuur C.40 Berekende bodemverandering Hollandsch Diep t/m Haringvliet met en zonder extra aanbod van slib op rand

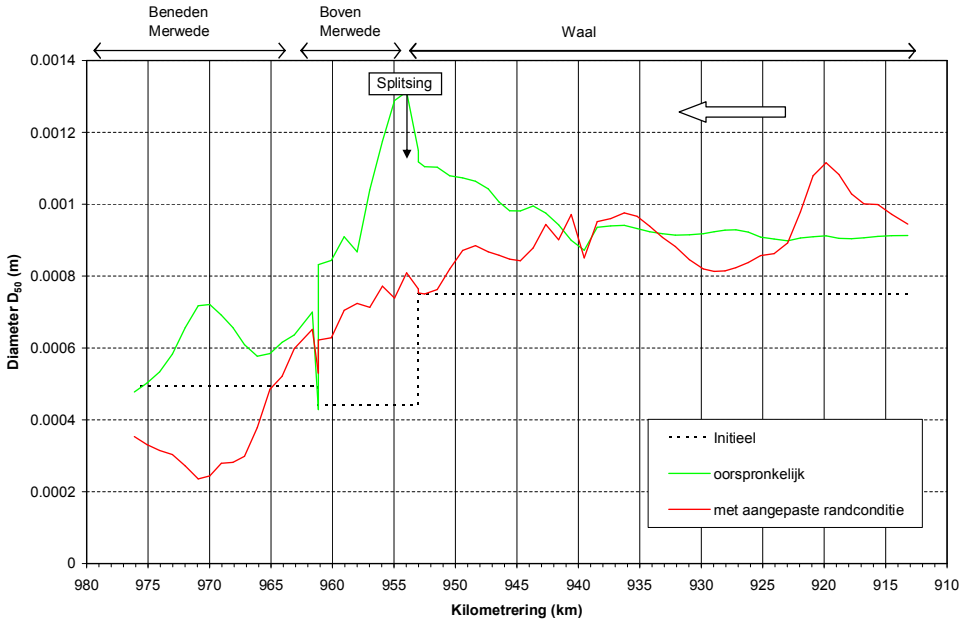


Figuur C.41 Berekende bodemverandering Lek met en zonder extra aanbod van slib op rand

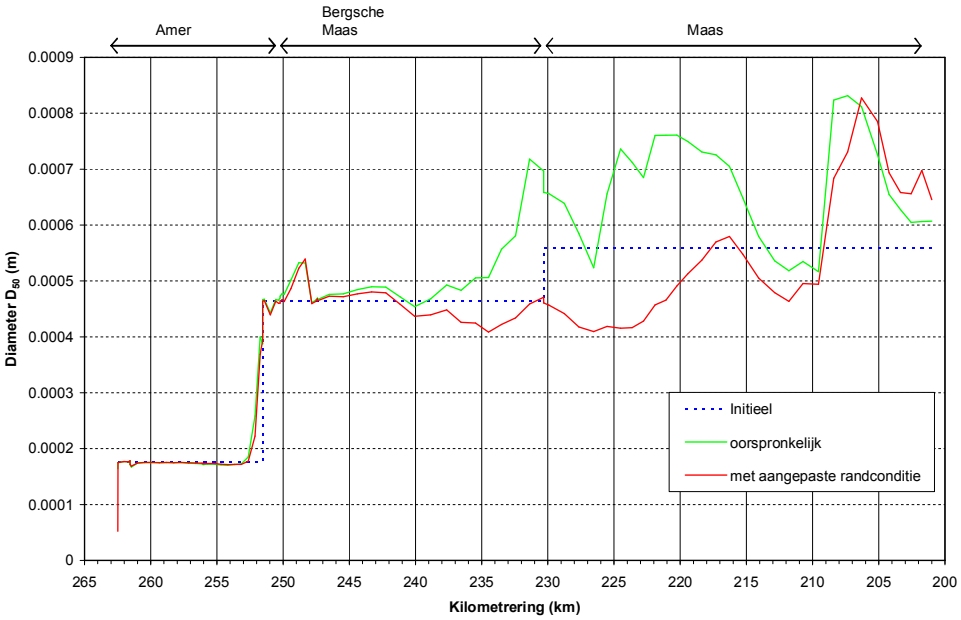


Figuur C.42 Berekende bodemverandering Nieuwe Merwede met en zonder extra aanbod van slib op rand

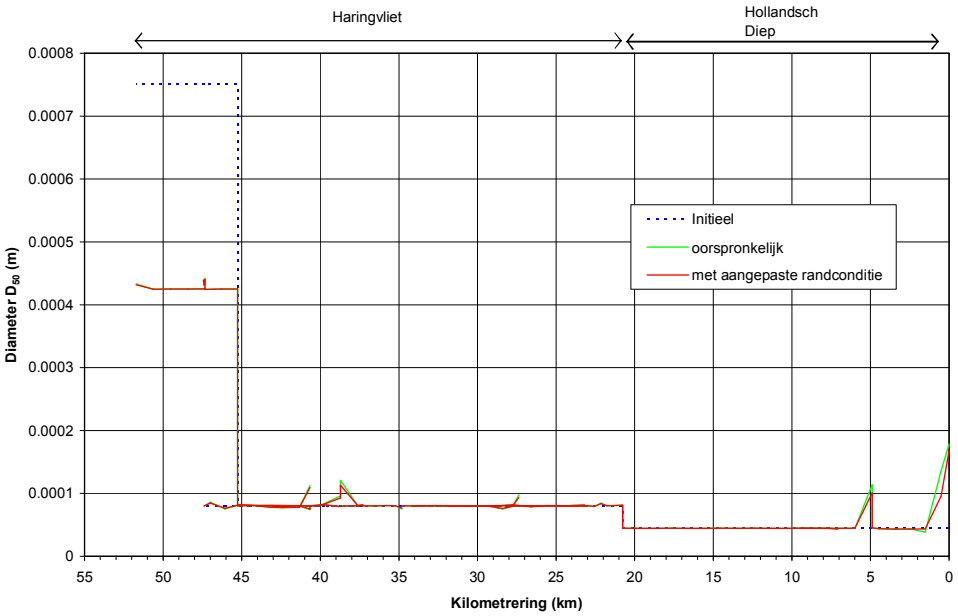
Figuren mediane diameter D_{50}



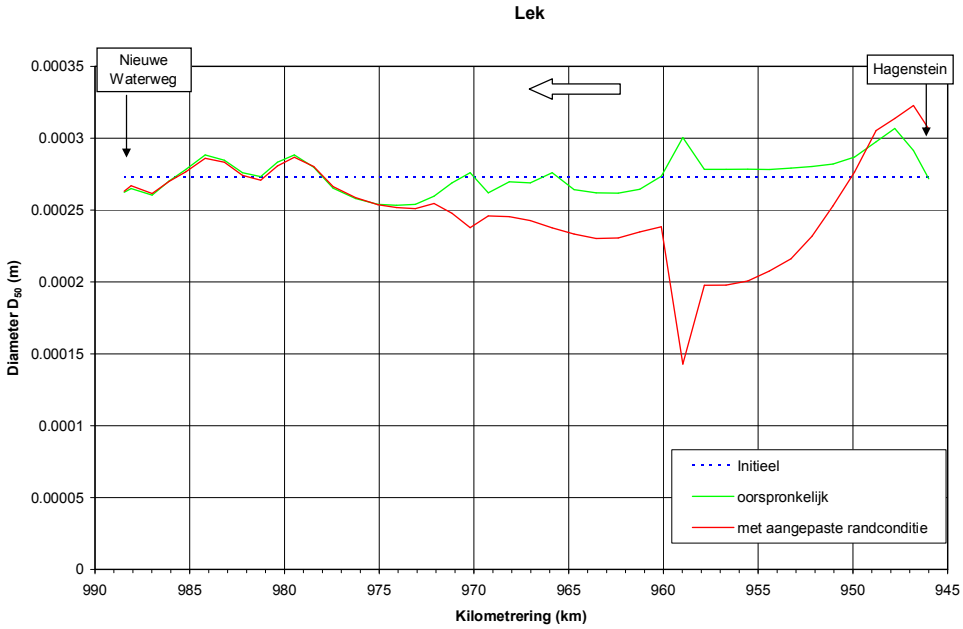
Figuur C.43 Berekende diameter Waal en Merwedes met en zonder extra aanbod van slib op rand



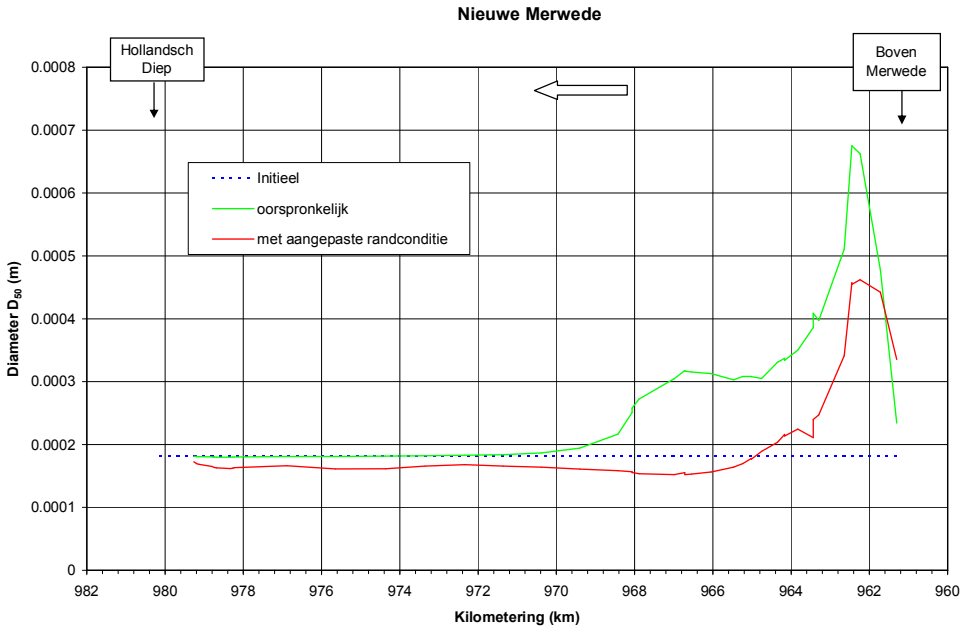
Figuur C.44 Berekende diameter Maas t/m Amer met en zonder extra aanbod van slib op rand



Figuur C.45 Berekende diameter Hollandsch Diep t/m Haringvliet met en zonder extra aanbod van slib op rand

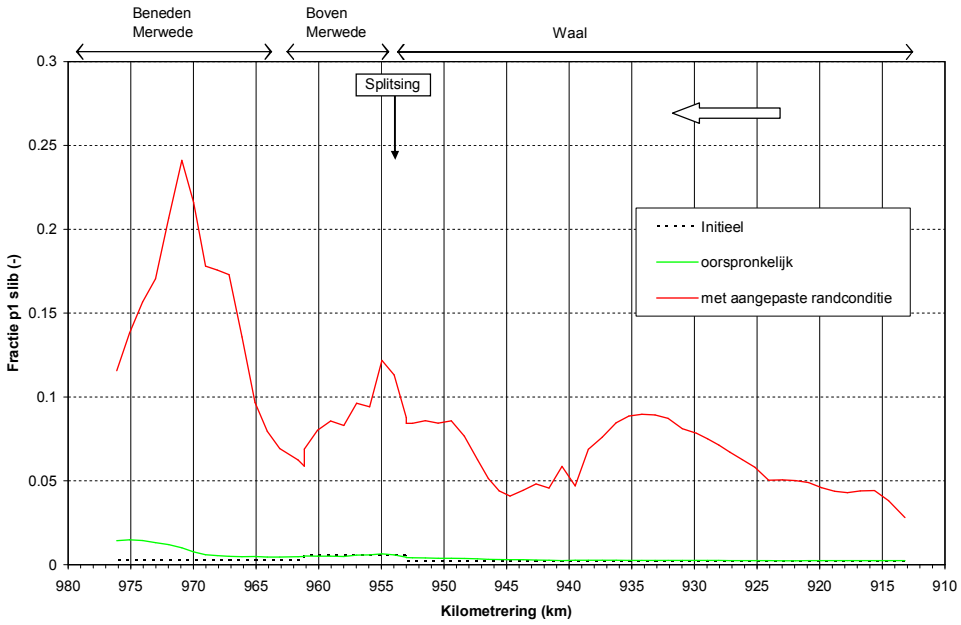


Figuur C.46 Berekende diameter Lek met en zonder extra aanbod van slib op rand

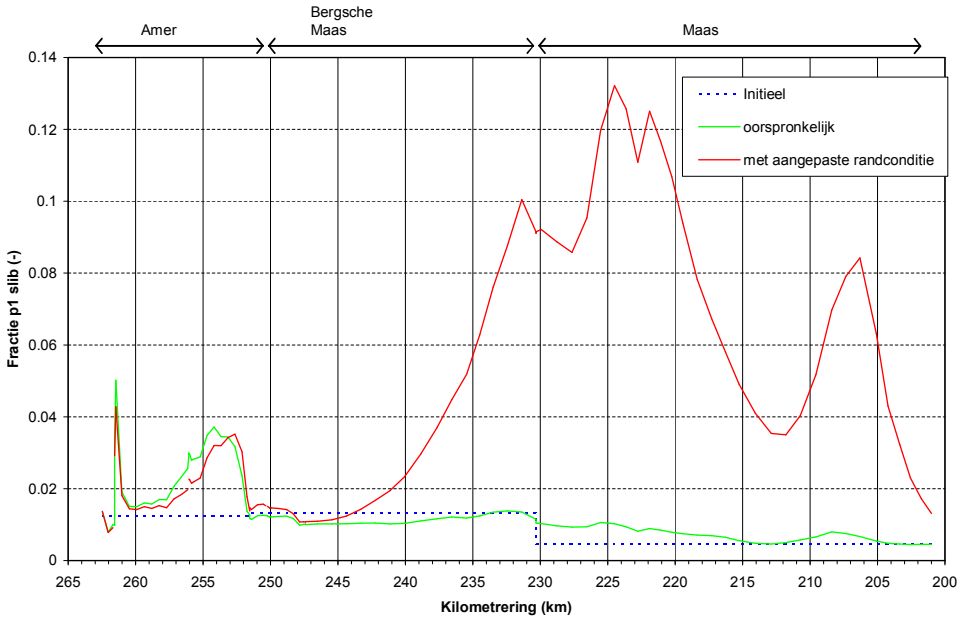


Figuur C.47 Berekende diameter Nieuwe Merwede met en zonder extra aanbod van slib op rand

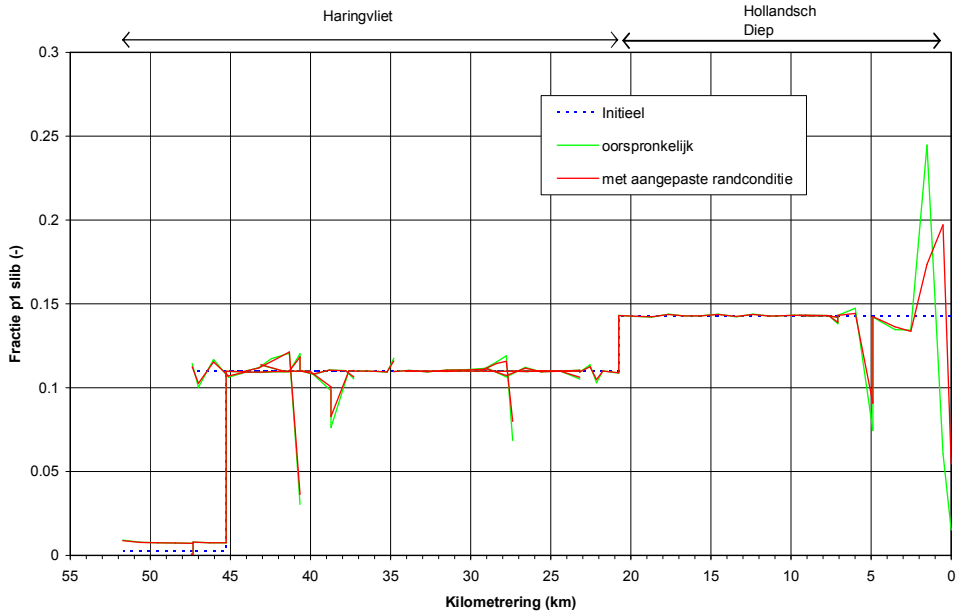
Figuren sediment fractie 1 (< 8 µm)



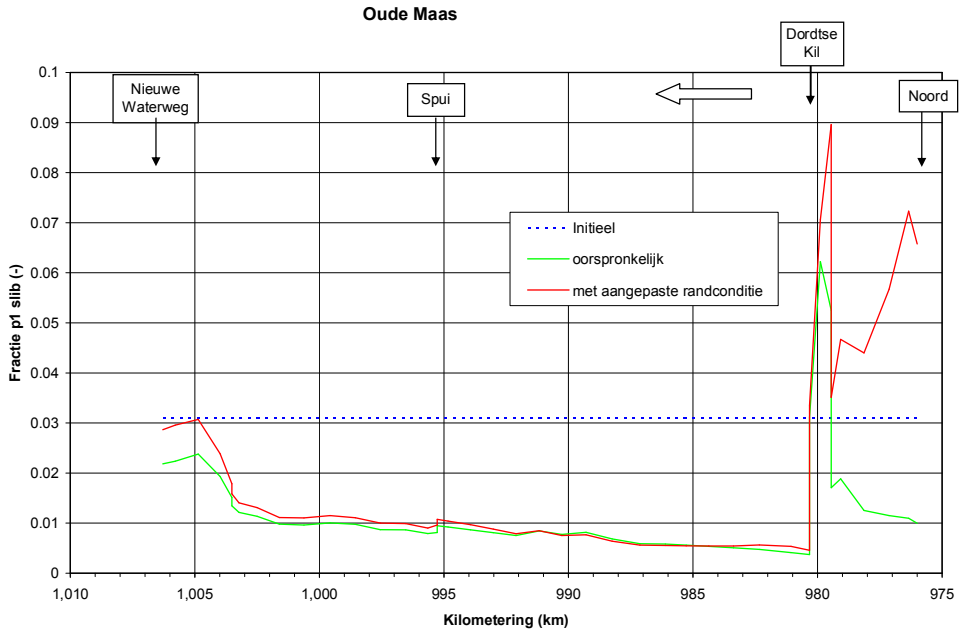
Figuur C.48 Berekende fractie p_1 (<8µm) met en zonder extra slibaanbod: Waal en Merwedes



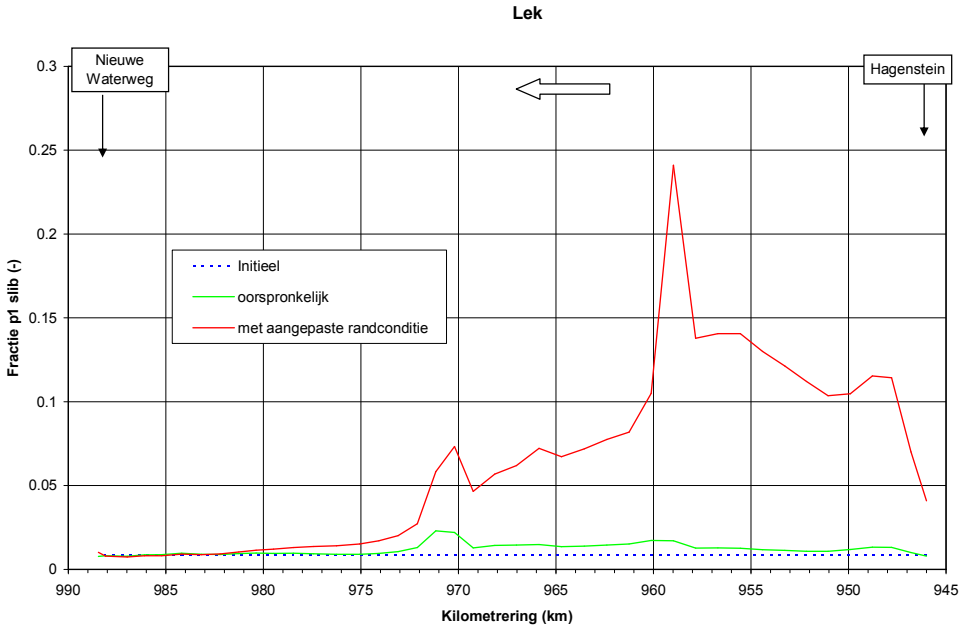
Figuur C.49 Berekende fractie p_1 (<8µm) met en zonder extra slibaanbod: Maas t/m Amer



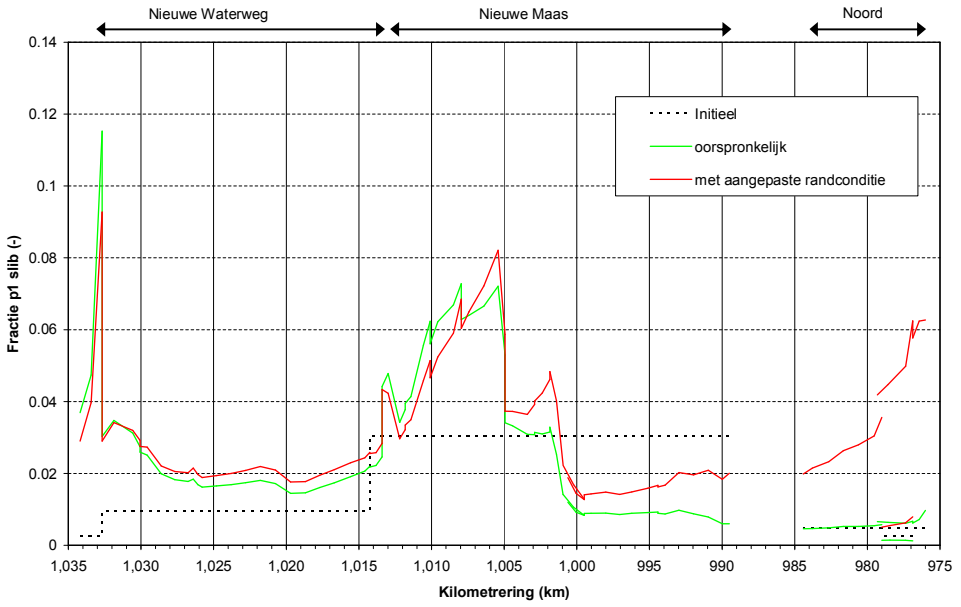
Figuur C.50 Berekende fractie p_1 (<8µm) met en zonder extra slibaanbod: Hollandsch Diep t/m Haringvliet



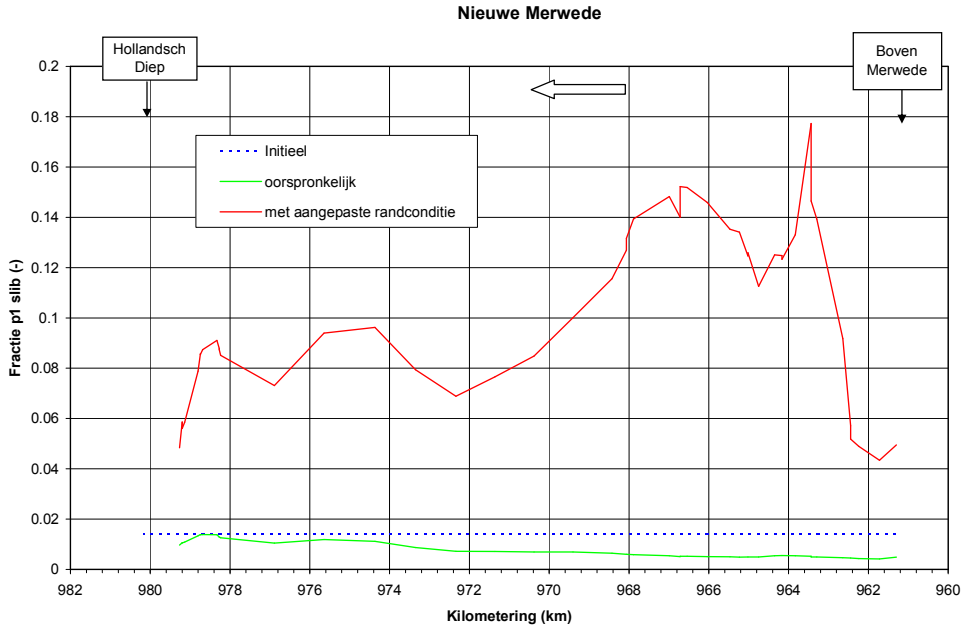
Figuur C.51 Berekende fractie p_1 (<8µm) met en zonder extra slibaanbod: Oude Maas



Figuur C.52 Berekende fractie p_1 (<8µm) met en zonder extra slibaanbod: Lek



Figuur C.53 Berekende fractie p_1 (<8µm) met en zonder extra slibaanbod: Noord t/m Nieuwe Waterweg



Figuur C.54 Berekende fractie p_1 (<8µm) met en zonder extra slibaanbod: Nieuwe Merwede

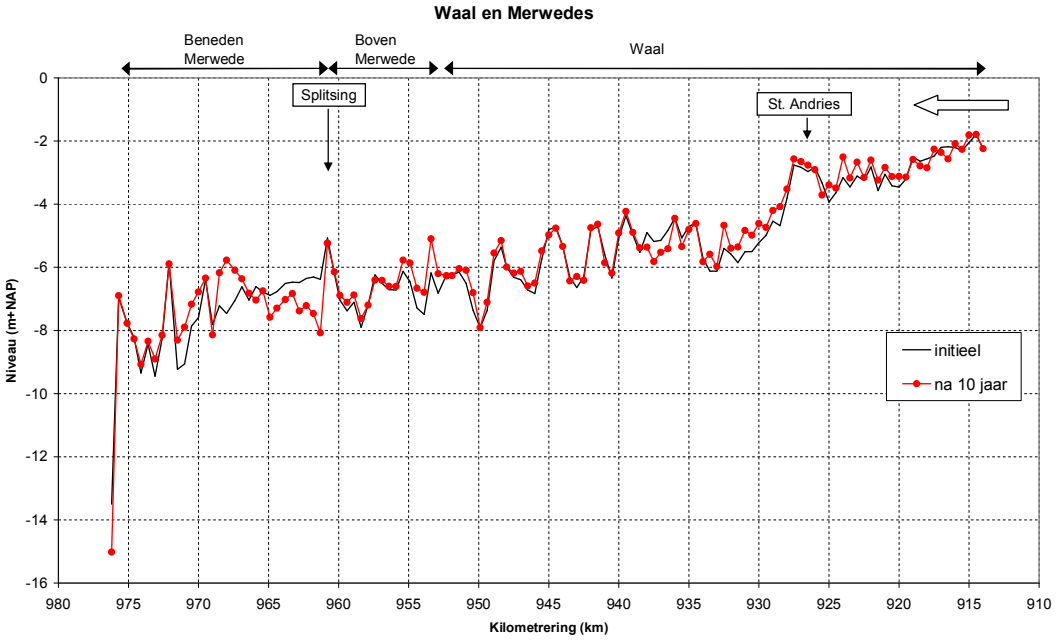
C.5 Simulatieresultaten met DelWAQ-morfologiemodule in SOBEK-River

C.5.1 Bodemveranderingen

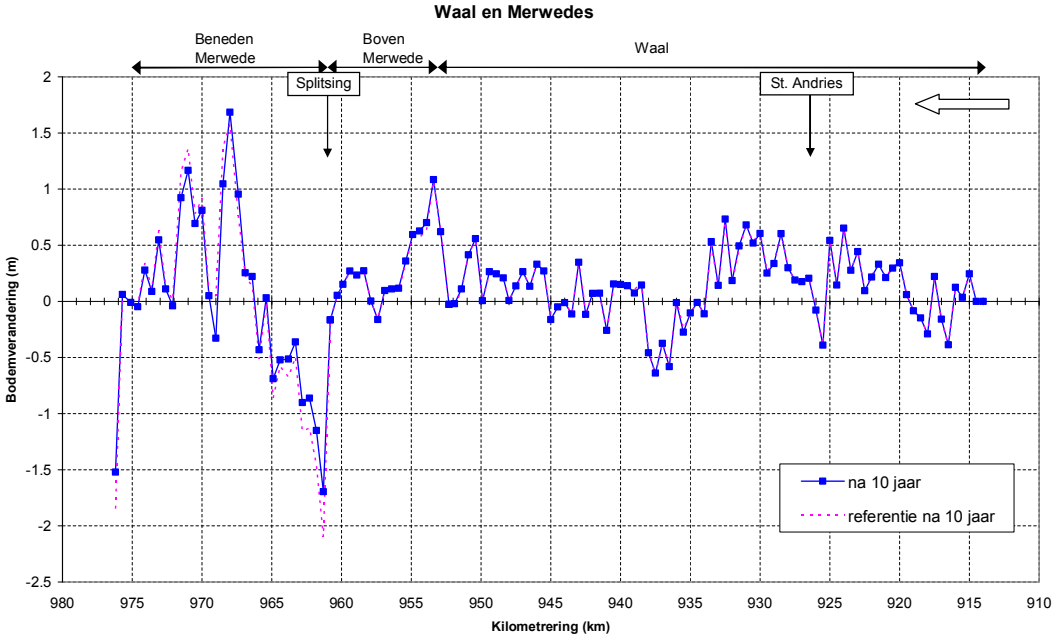
In de in deze paragraaf gepresenteerde resultaten hebben betrekking op de uitvoer van het diepste punt van het dwarsprofiel (in voorgaande paragraaf betrof het de breedtegemiddelde bodemligging). De berekeningen met de DelWAQ-morfologiemodule zijn uitgevoerd voor de periode 1989-2000. De morfologische factor is gelijk aan 6. In onderstaande resultaten zijn de berekende bodemveranderingen langs de takken gepresenteerd voor een aantal berekeningen. Deze zijn telkens vergeleken met de *referentie berekening* die is gekarakteriseerd met:

- actieve laagdikte van 0,5 m,
- Van Rijn transportformule voor bodemtransport (met een factor van 0,9 voor de kritische schuifspanning),
- splitsingspuntrelatie als machtswet met een macht k=3 (voor afvoeren) en m=-1 (voor breedtes),
- zonder baggerwerk,
- formulering voor hiding en exposure uitgeschakeld;
- twee fijnste fracties (D < 0,18 mm) zowel als bodem en zwevende stof gedefinieerd, en gesimuleerd met de instellingen die in eerdere studies voor de Rijn-Maasmonding zijn gehanteerd (Meijers en Icke, 2006).

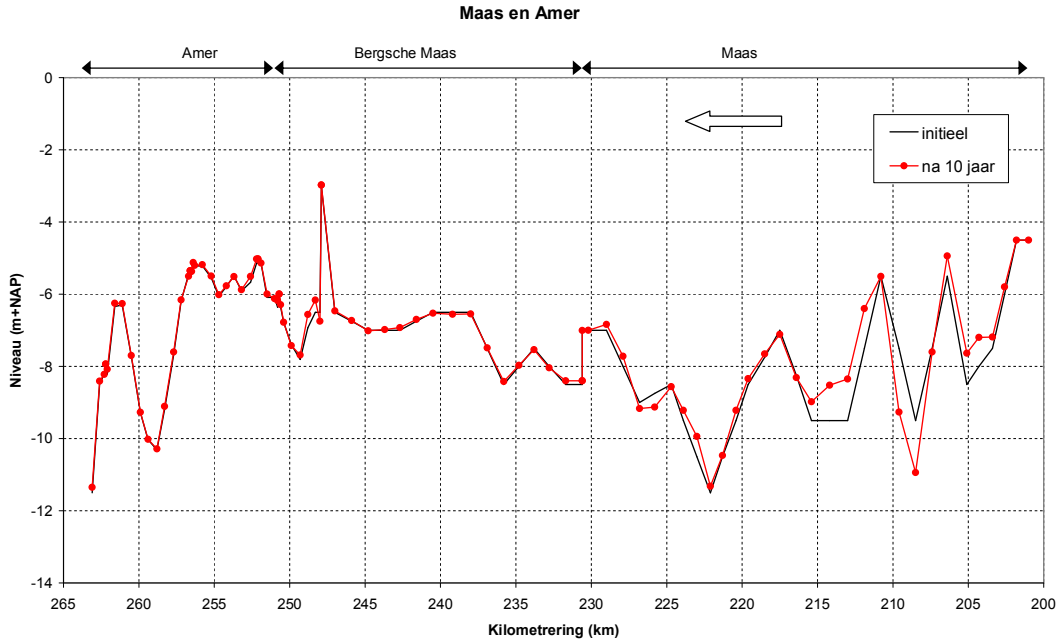
Simulaties zonder baggerwerk: referentiesom en som met kleinere actieve laag



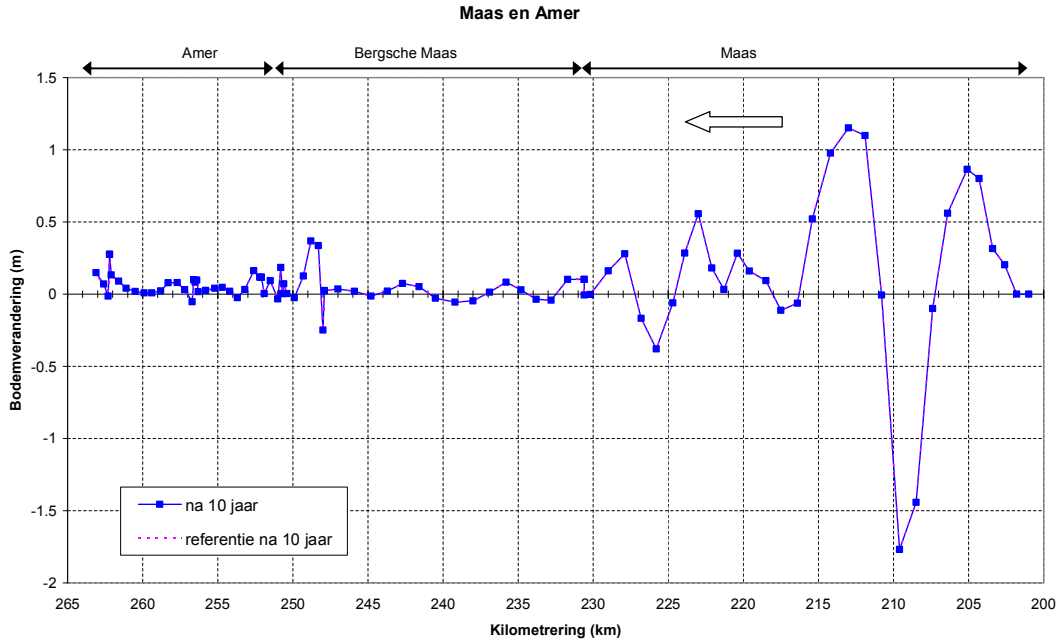
Figuur C.55 Berekende bodemligging (jan. 2000): Waal en Merwedes (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



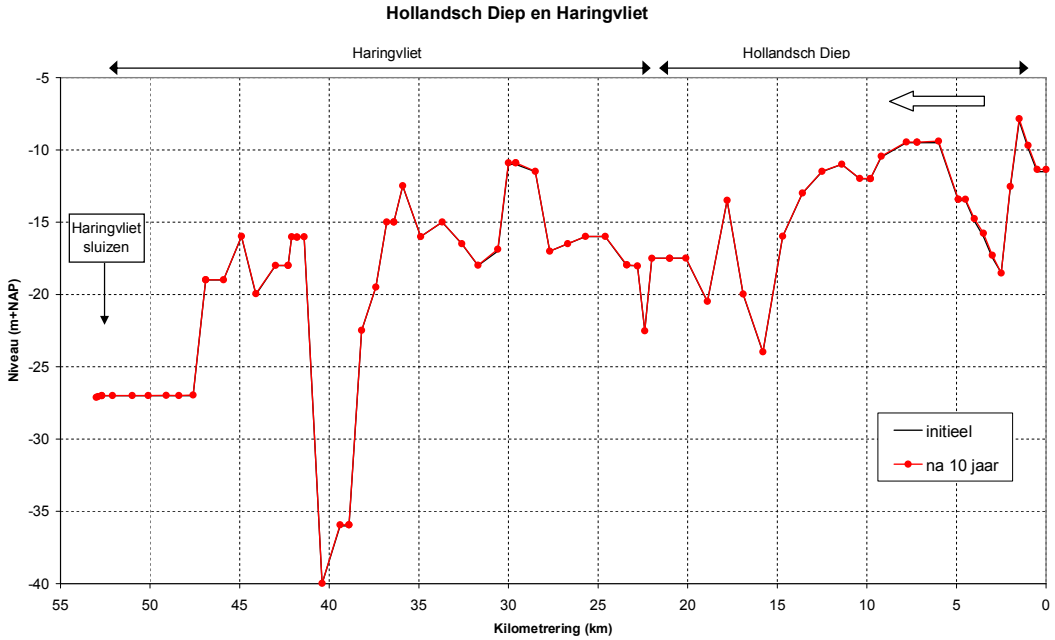
Figuur C.56 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Waal en Merwedes (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m). Relatief grote erosie (en daaropvolgende sedimentatie) in de Beneden Merwede wordt toegeschreven aan de gekozen instellingen voor de sedimentverdeling (splitsingspuntrelatie) op de splitsing. Het effect van laagdikte is in geringe mate in de Beneden-Merwede zichtbaar.



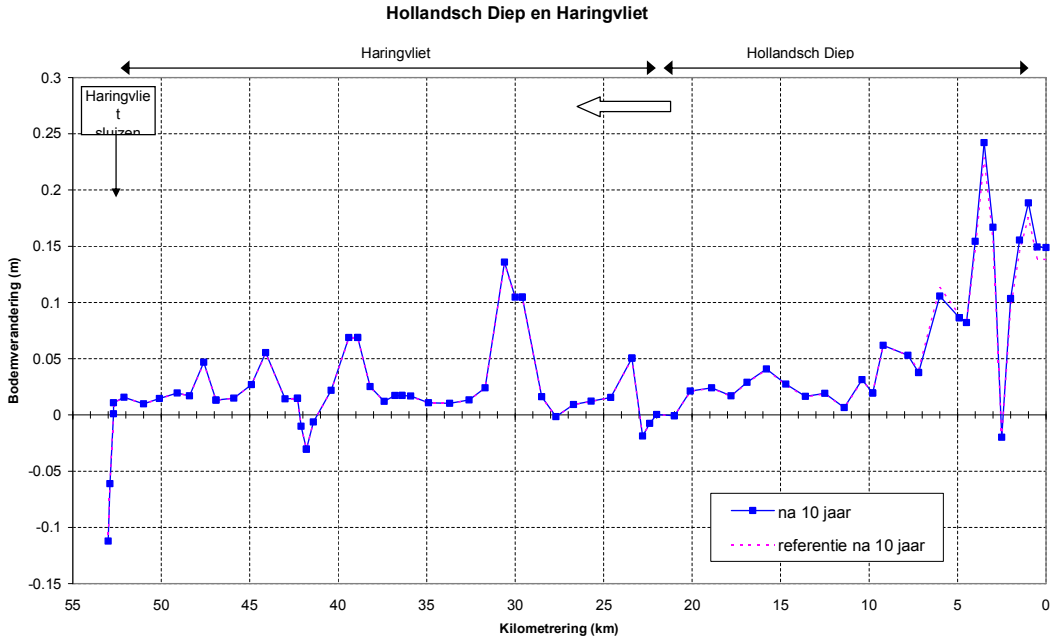
Figuur C.57 Berekende bodemligging (jan. 2000): Maas – Amer (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



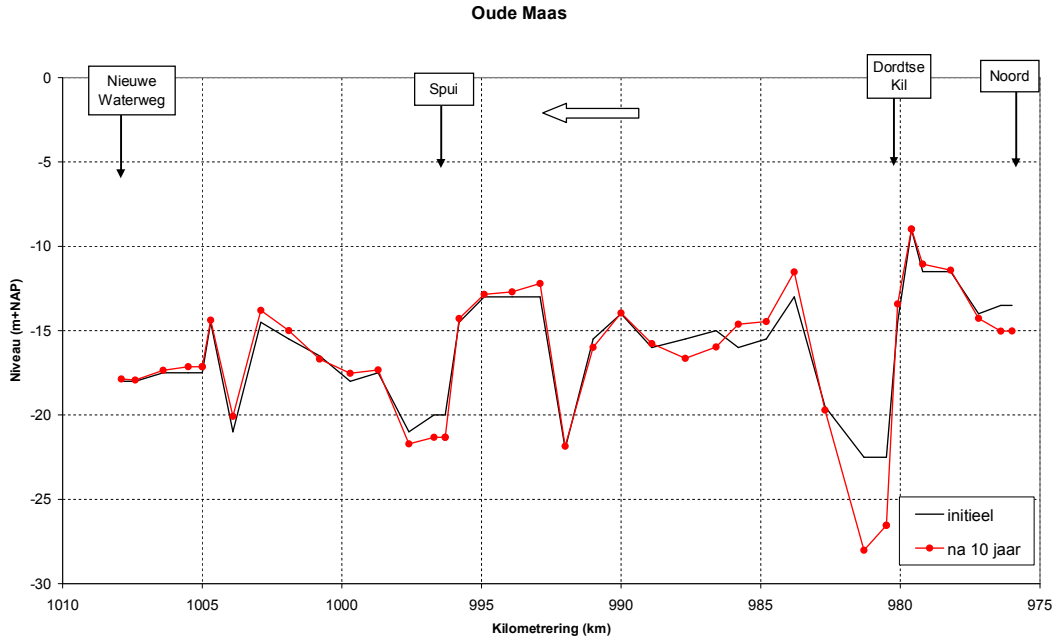
Figuur C.58 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Maas – Amer (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m). Verplaatsing van de initieel aanwezige grote variaties in bodemligging tussen km 205 en 215 leiden tot ogenschijnlijk grote veranderingen op dit traject.



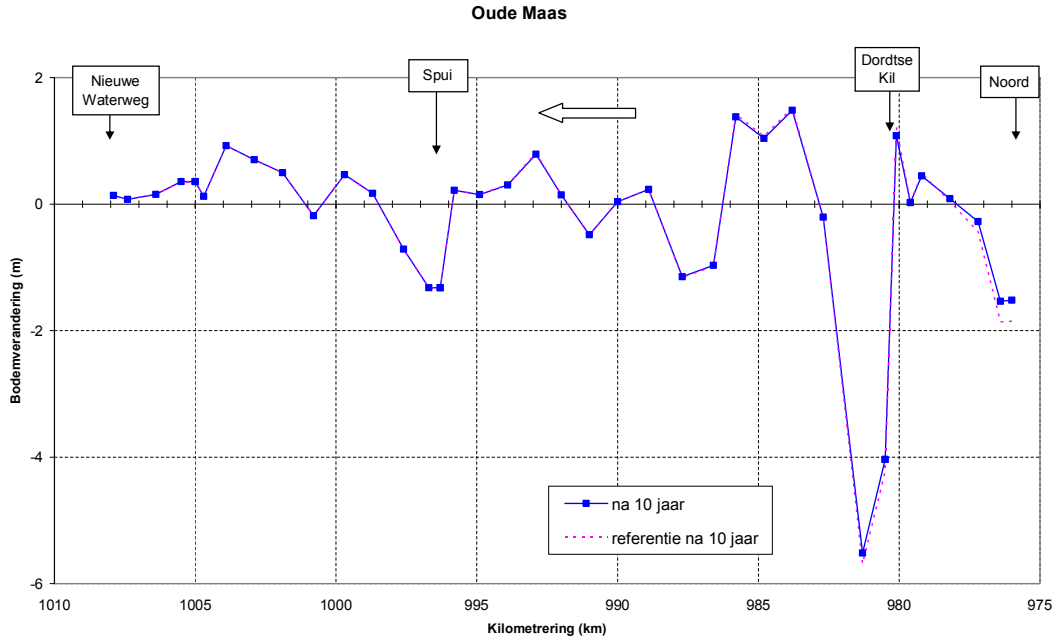
Figuur C.59 Berekende bodemligging (jan. 2000): Hollandsch Diep – Haringvliet. (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



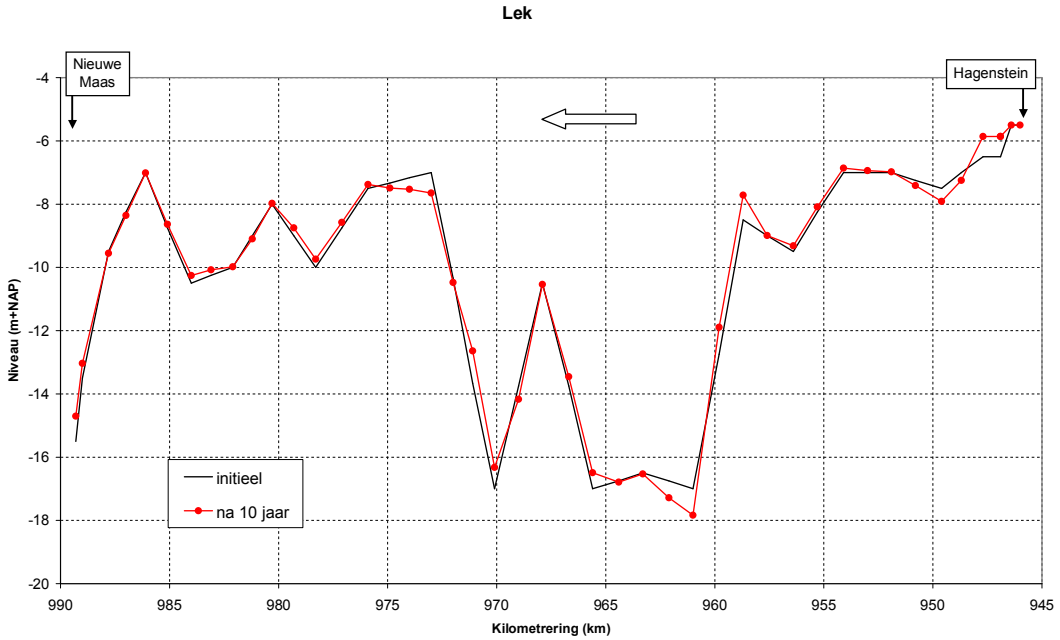
Figuur C.60 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Hollandsch Diep – Haringvliet. (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m). Geringe sedimentatie treedt op in het Oostelijke deel van het Hollandsch Diep. Er is een zeer geringe invloed van laagdikte merkbaar op de grootte van deze sedimentatie.



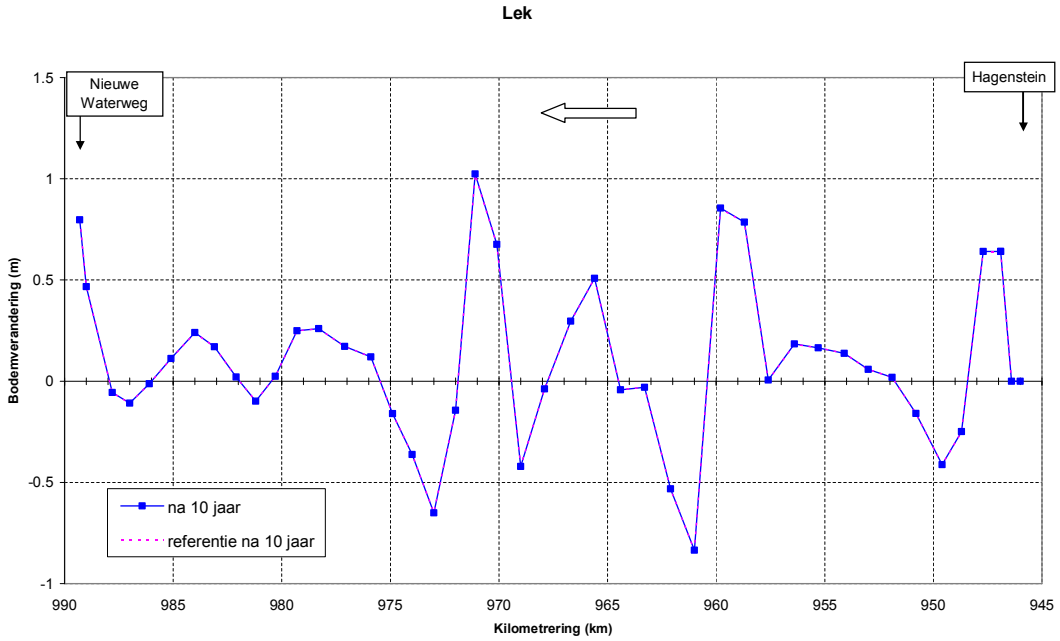
Figuur C.61 Berekende bodemligging (jan. 2000): Oude Maas (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



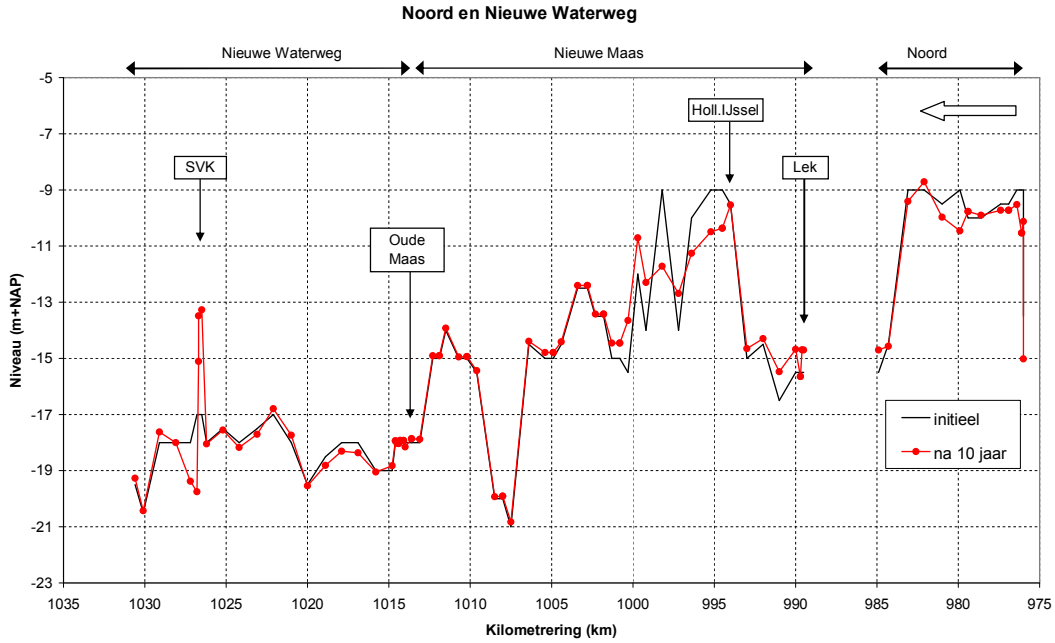
Figuur C.62 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Oude Maas (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m). Relatief grote erosie treedt op in het reeds verdiepte deel van de Oude Maas juist benedenstrooms van de splitsing met de Dordtse Kil.



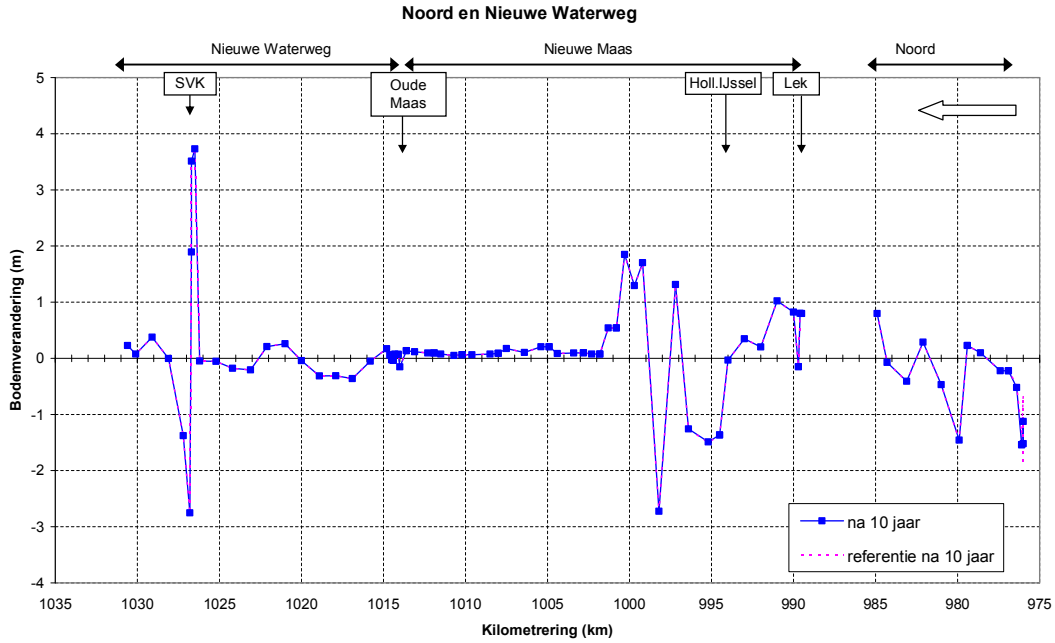
Figuur C.63 Berekende bodemligging (jan. 2000): Lek (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



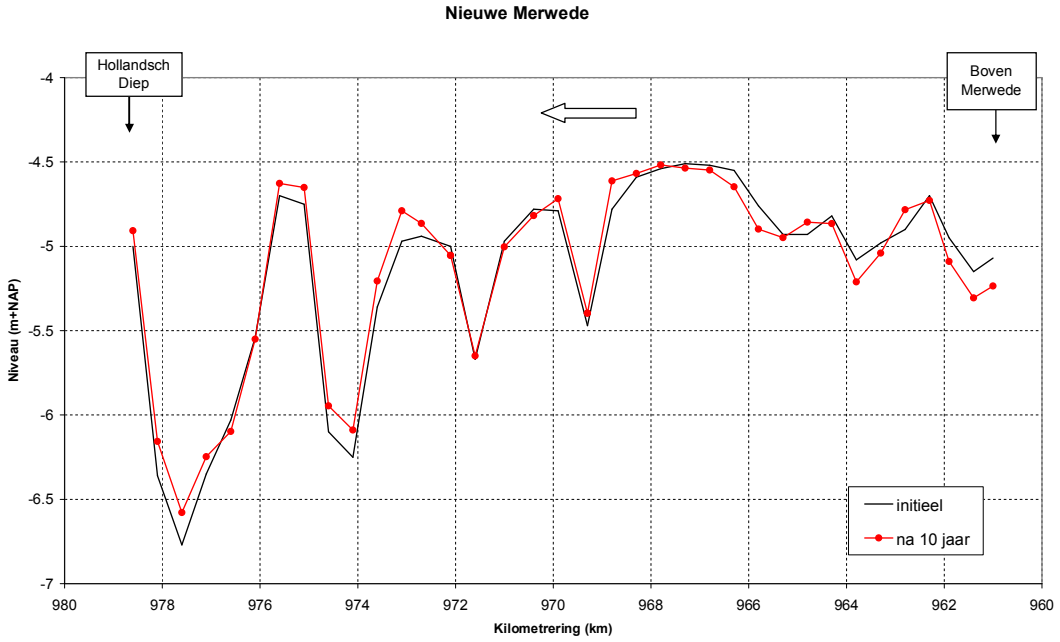
Figuur C.64 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Lek (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



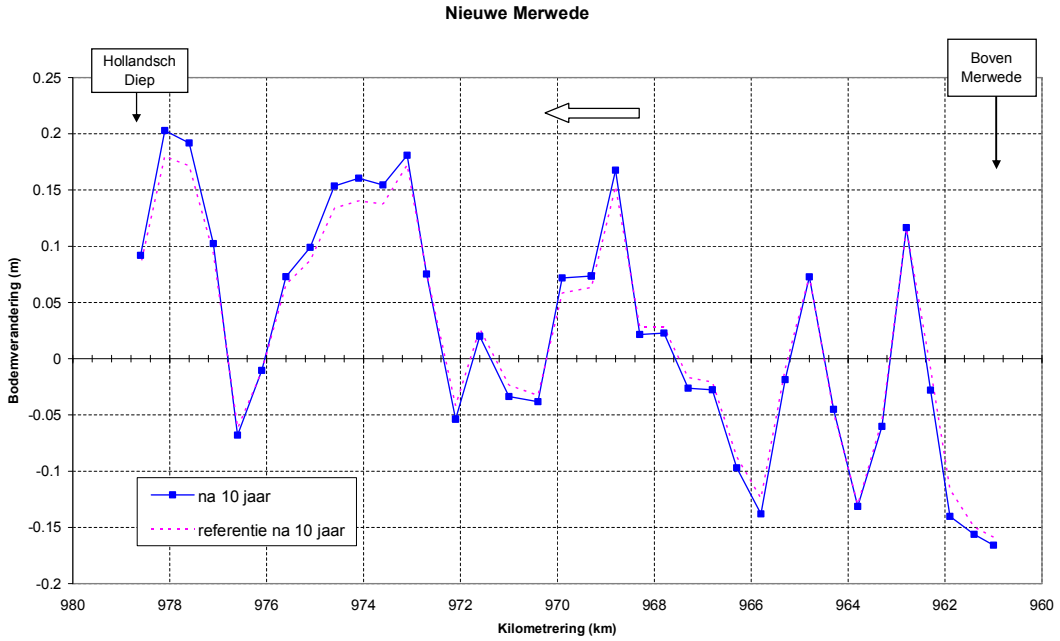
Figuur C.65 Berekende bodemligging (jan. 2000): Noord – Nieuwe Waterweg (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



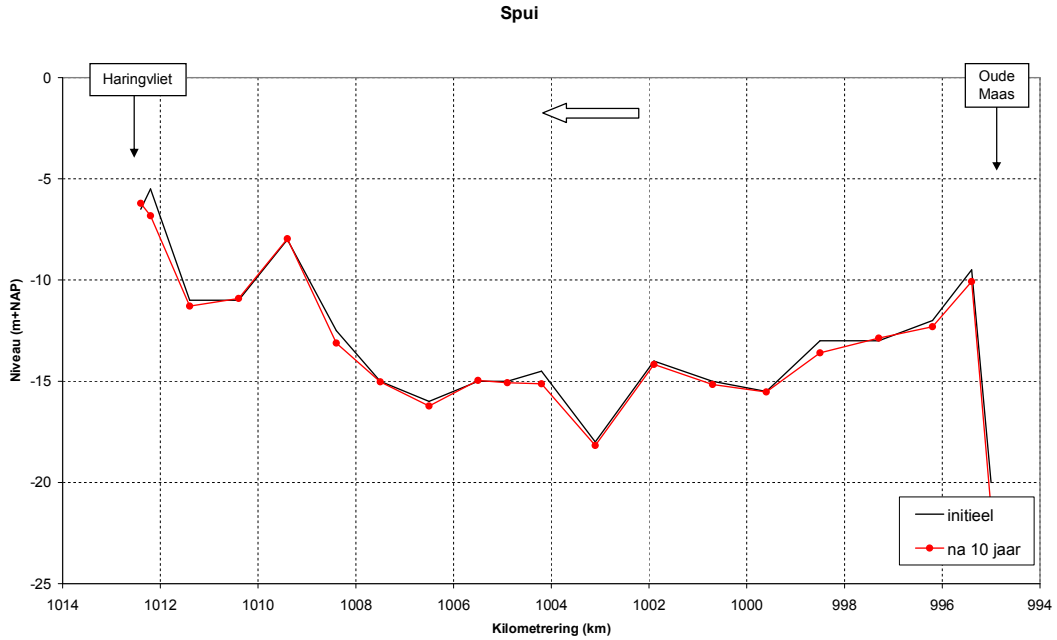
Figuur C.66 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Noord – Nieuwe Waterweg (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m). De vrij sterke bodemverandering ter plaatse van de Maeslantkering is gerelateerd aan de aanwezigheid van een kunstwerk in de schematisatie, en kan als een artefact van deze schematisatie worden beschouwd.



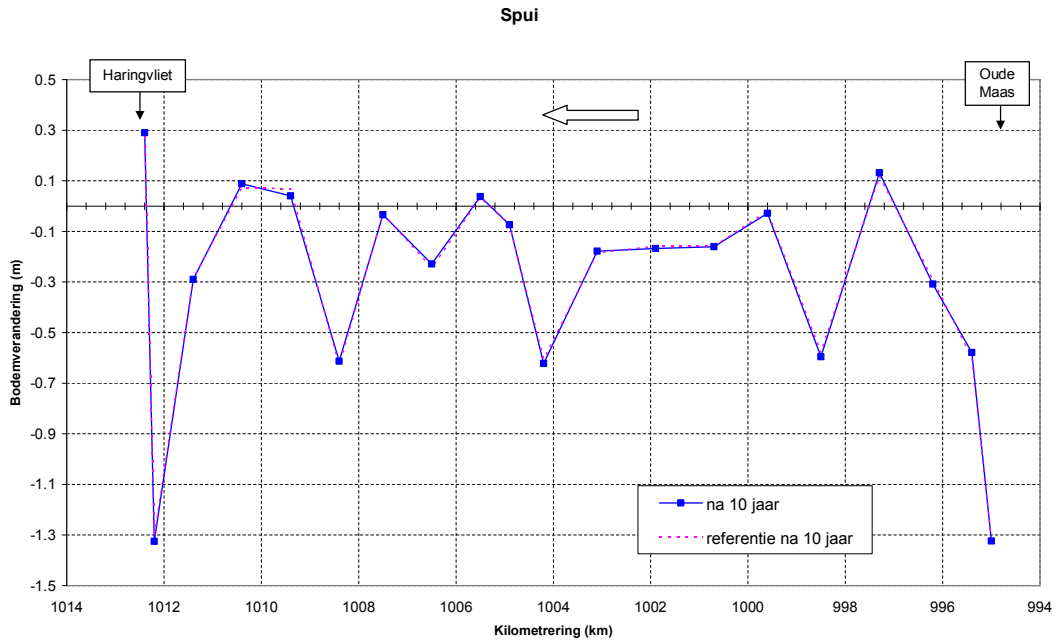
Figuur C.67 Berekende bodemligging (jan. 2000): Nieuwe Merwede (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



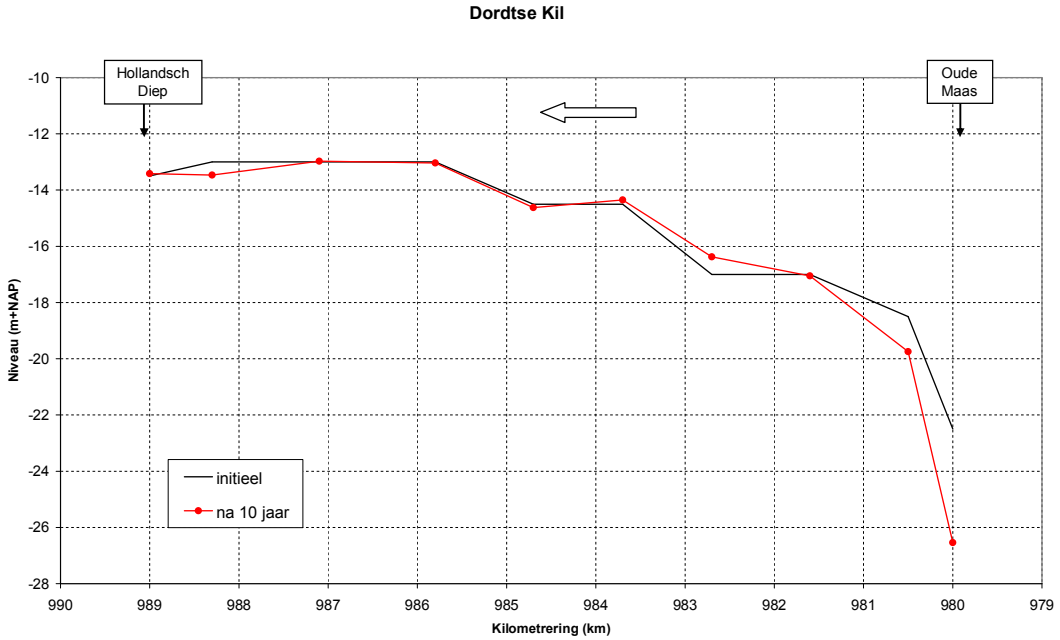
Figuur C.68 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Nieuwe Merwede (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m). Er is sprake van een geringe invloed van de dikte van de actieve laag.



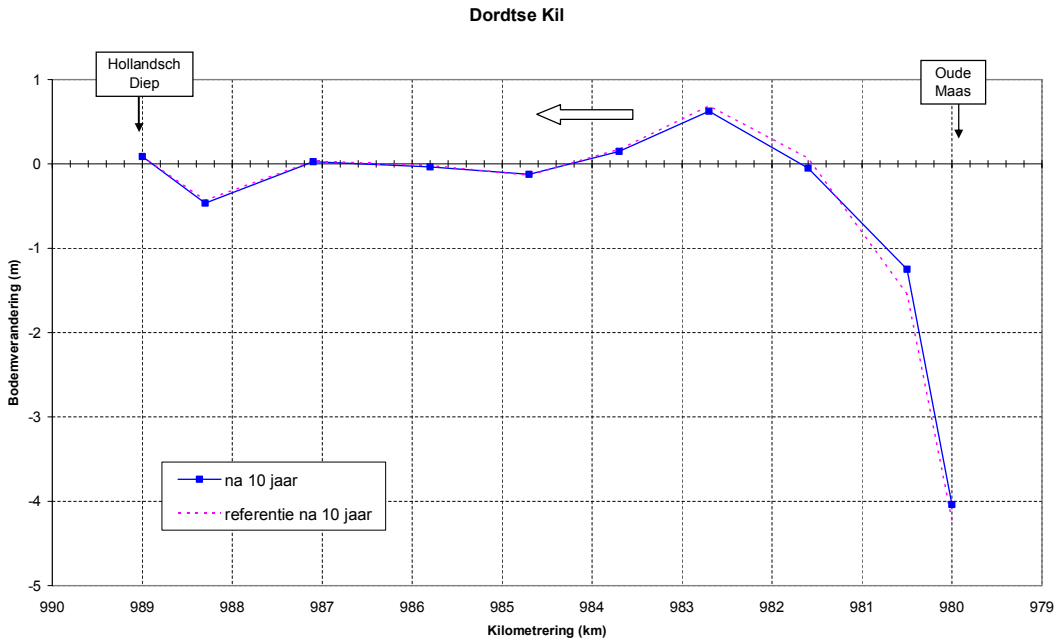
Figuur C.69 Berekende bodemligging (jan. 2000): Spui (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)



Figuur C.70 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Spui (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)

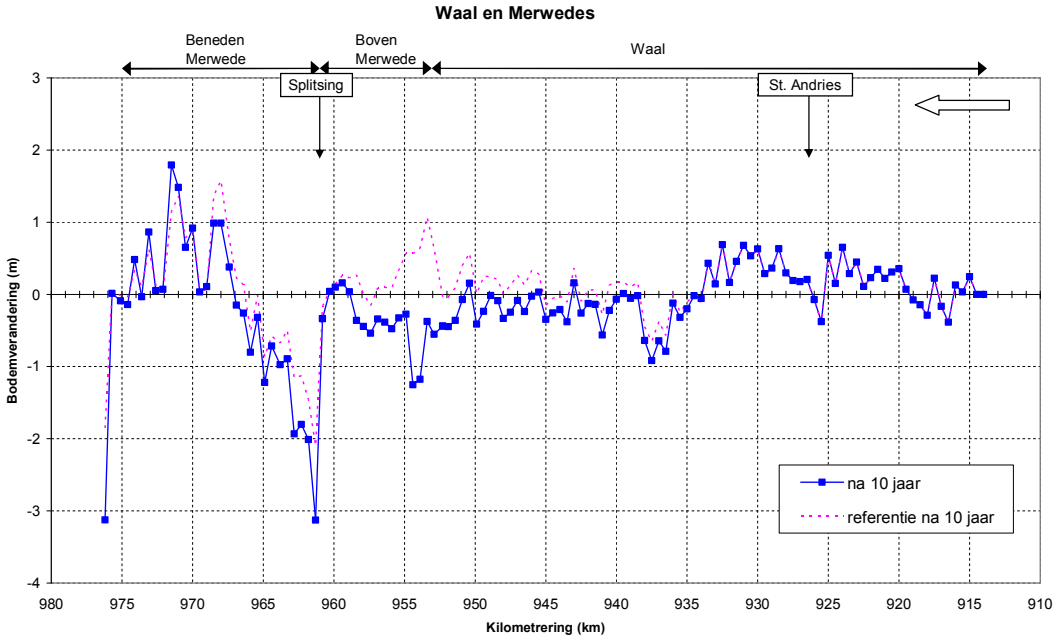


Figuur C.71 Berekende bodemligging (jan. 2000): Dordtse Kil (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m)

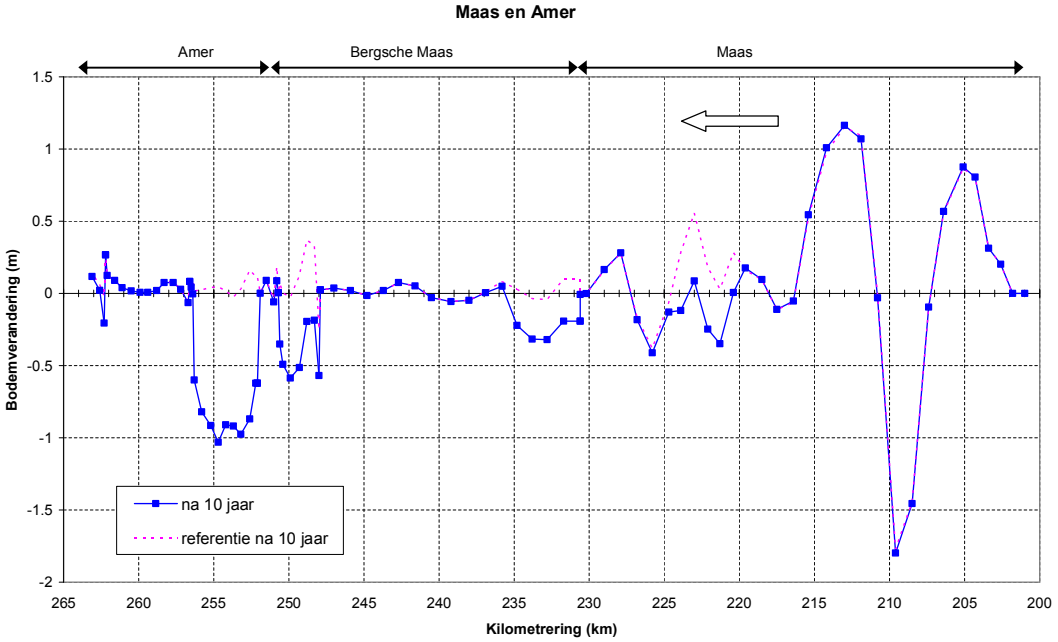


Figuur C.72 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Dordtse Kil (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met actieve laagdikte 0,2 m (referentie = 0,5 m). De berekende erosie treedt vooral op aan het begin van de Dordtse Kil. Er is sprake van een zeer geringe invloed van de laagdikte.

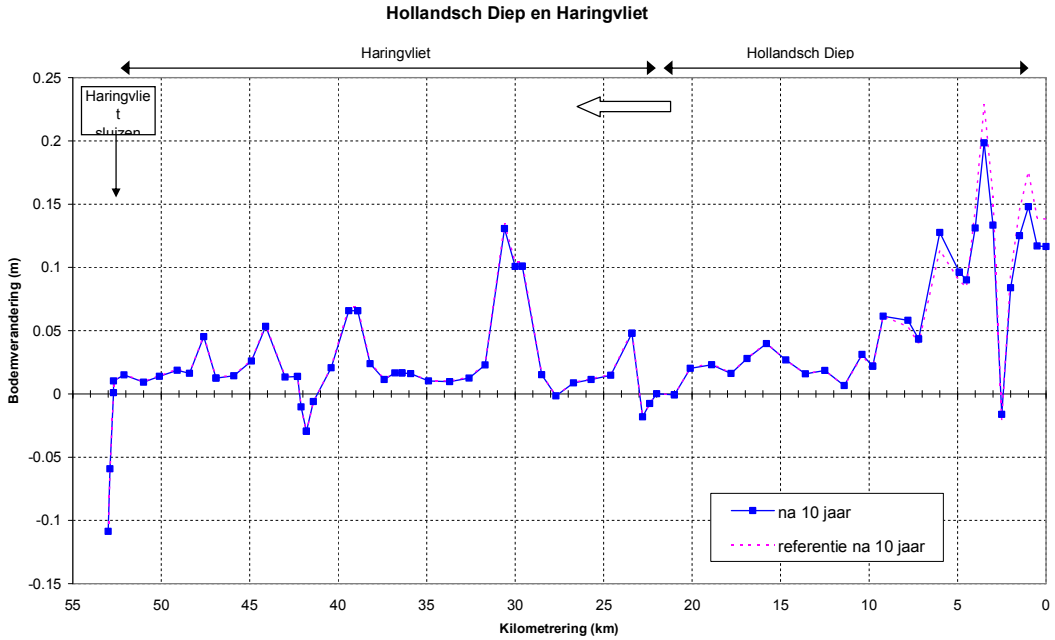
Simulaties met baggerwerk: referentiesom en som met baggeren



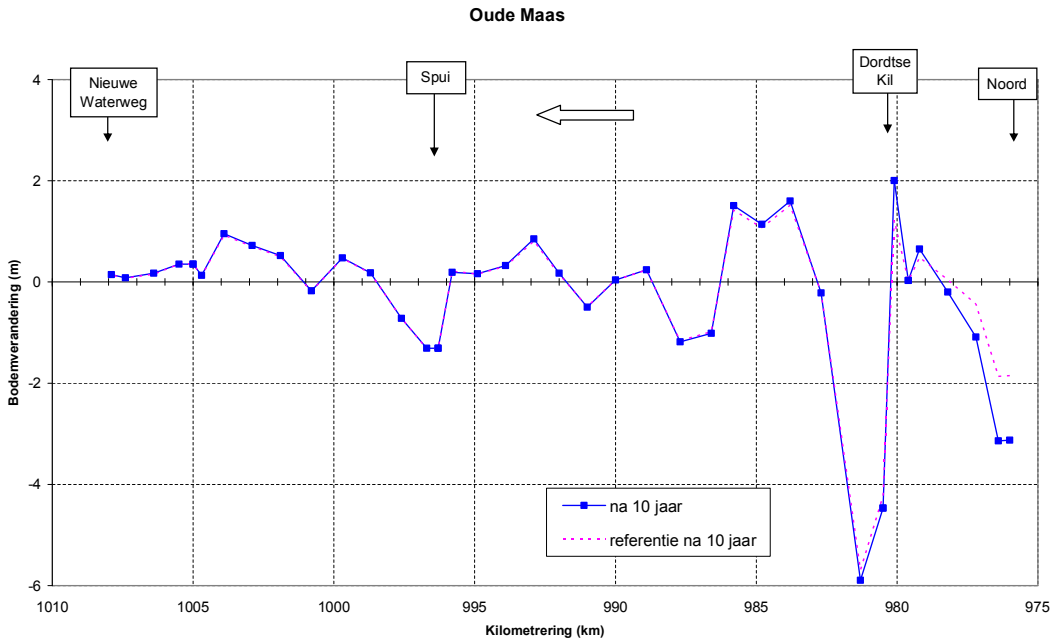
Figuur C.73 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Waal en Merwedes (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)



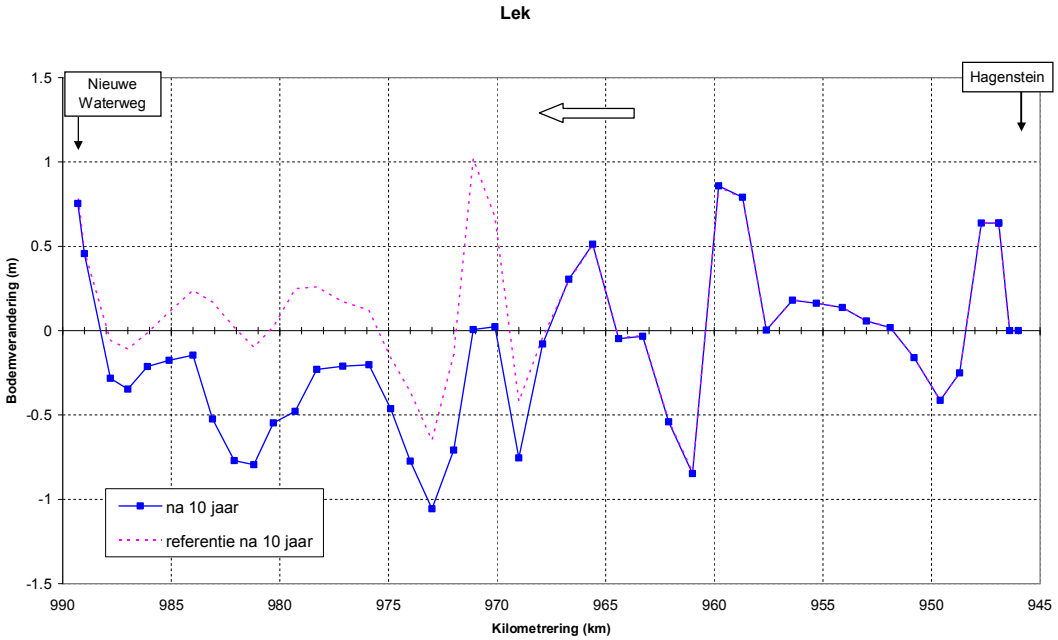
Figuur C.74 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Maas – Amer (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)



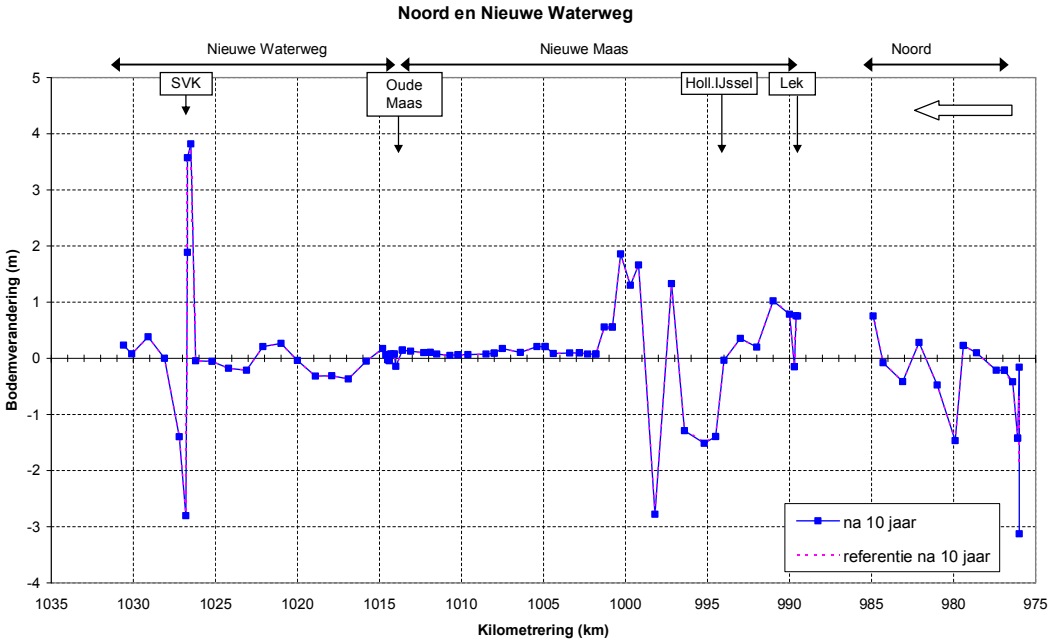
Figuur C.75 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Hollandsch Diep – Haringvliet. (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)



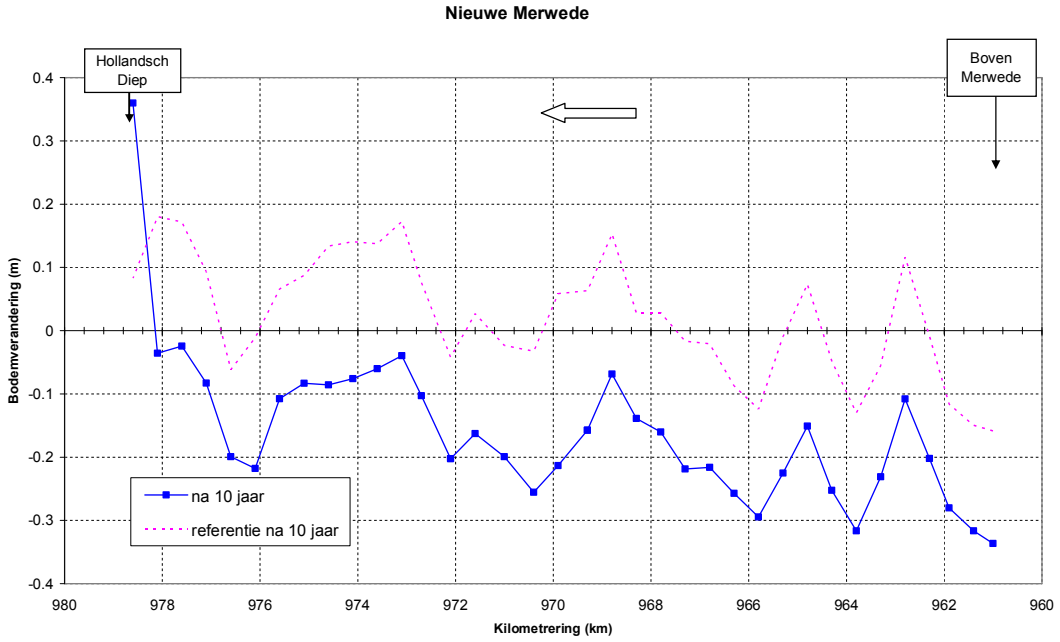
Figuur C.76 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Oude Maas (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)



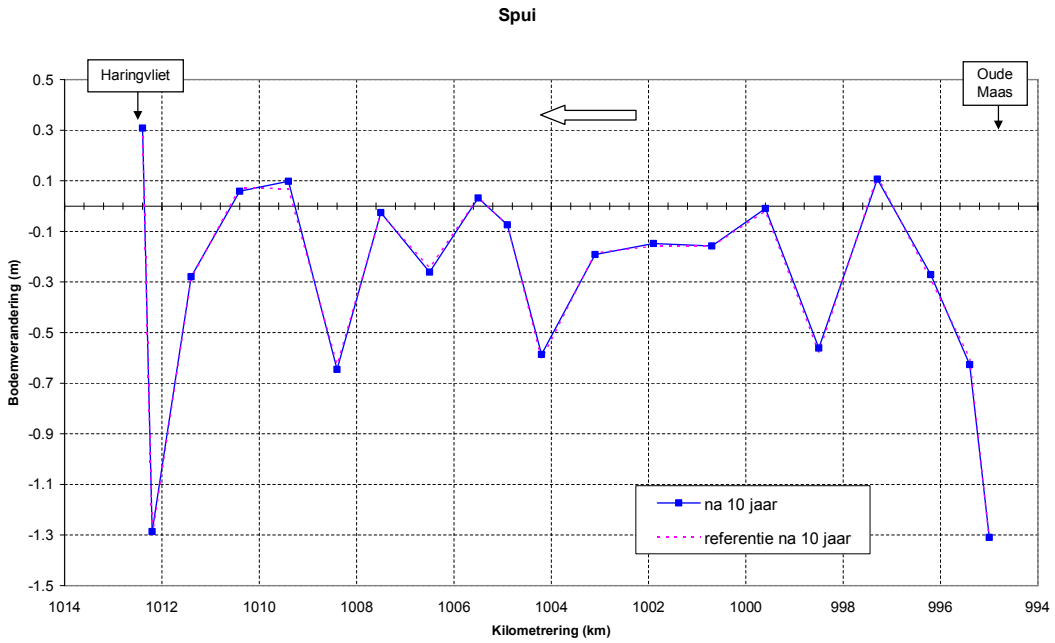
Figuur C.77 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Lek (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)



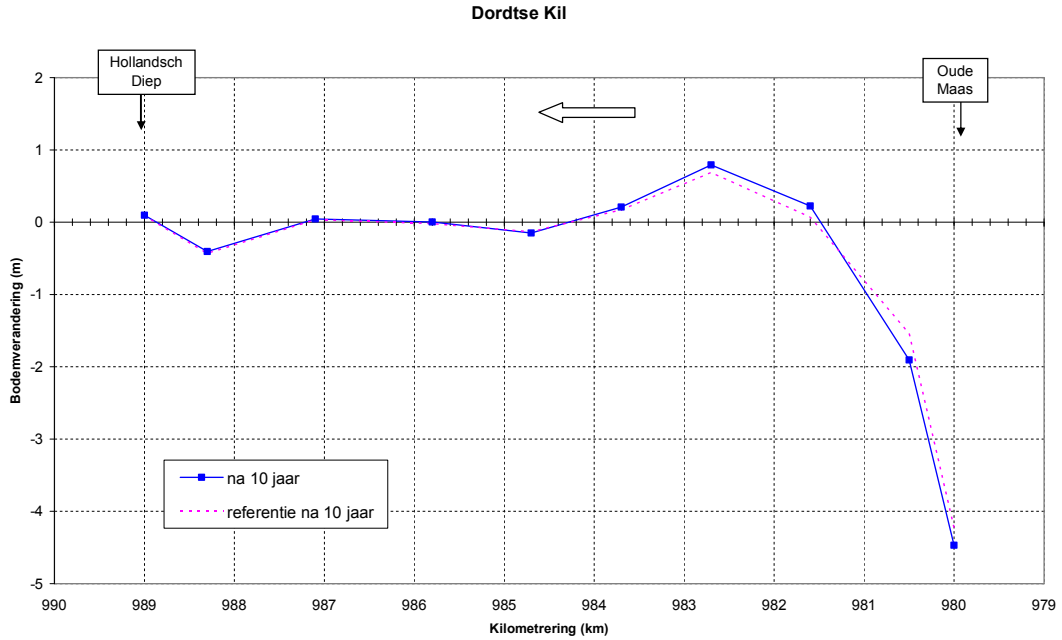
Figuur C.78 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Noord – Nieuwe Waterweg (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)



Figuur C.79 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Nieuwe Merwede (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)

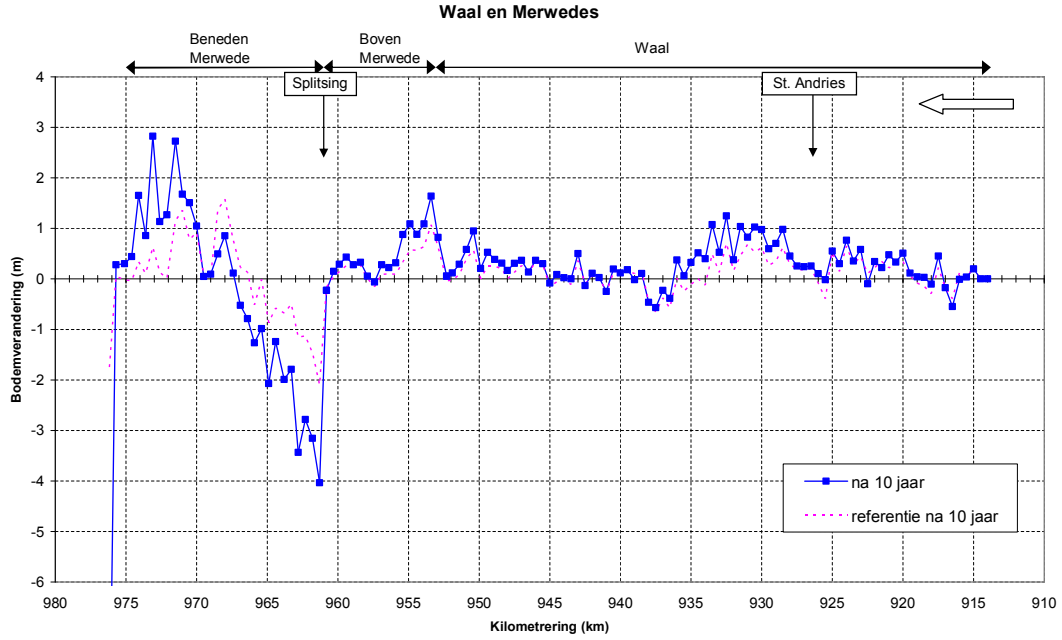


Figuur C.80 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Spui (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)

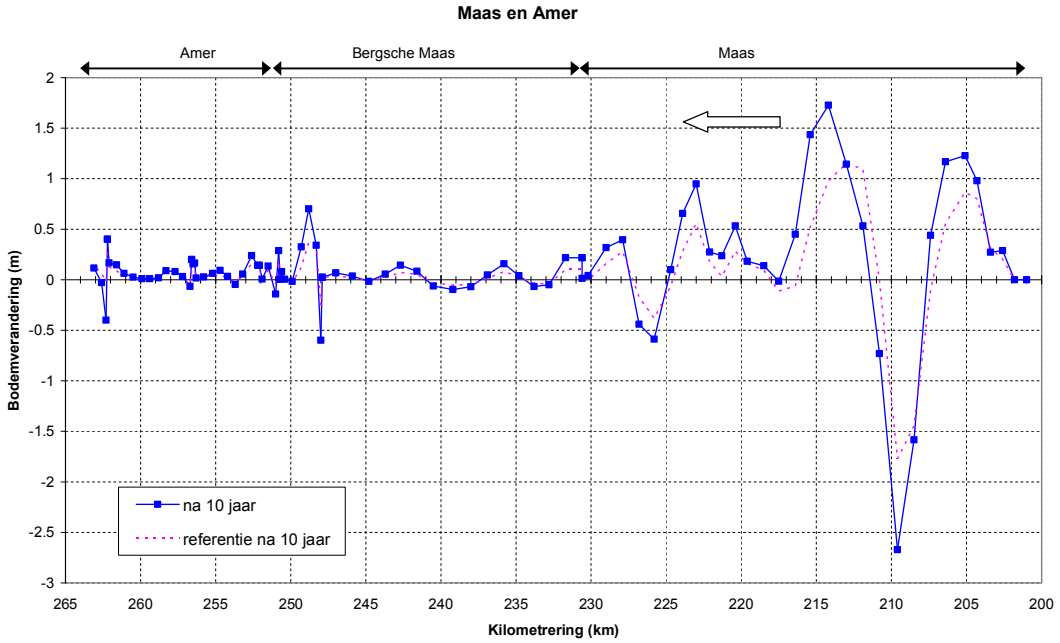


Figuur C.81 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Dordtse Kil (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met baggerwerk en zonder baggerwerk (referentie)

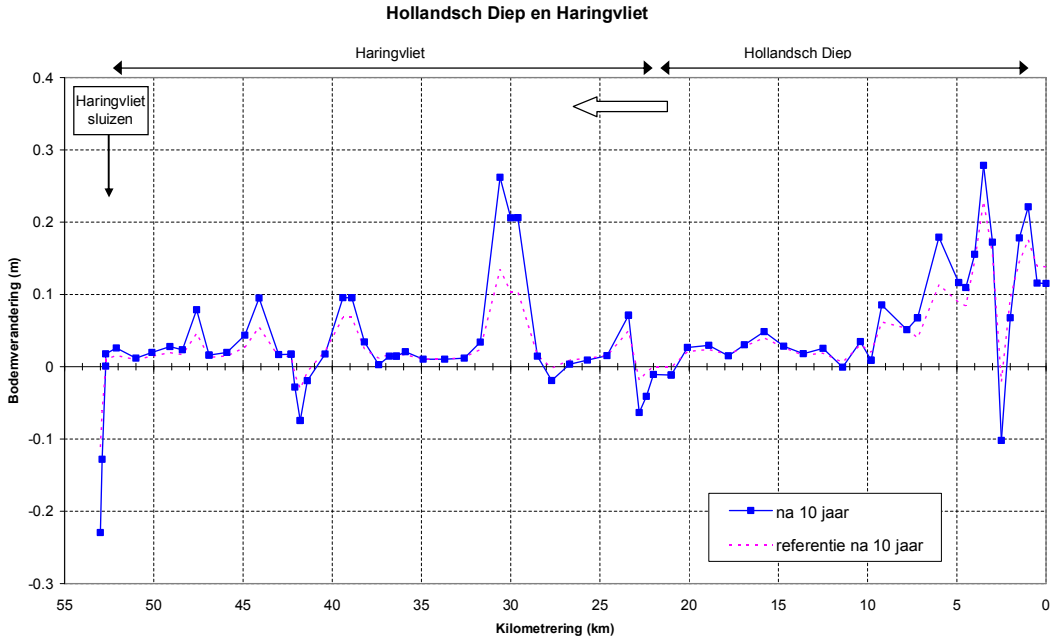
Simulaties met verdubbeling van sedimenttransport: referentiesom en som met calfac=2



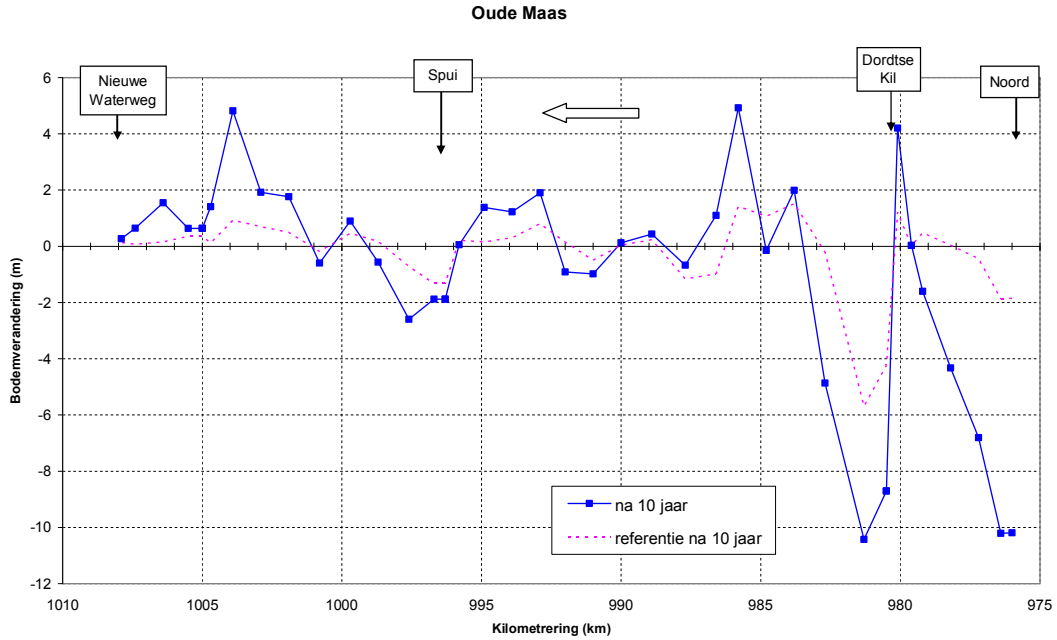
Figuur C.82 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Waal en Merwedes (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening



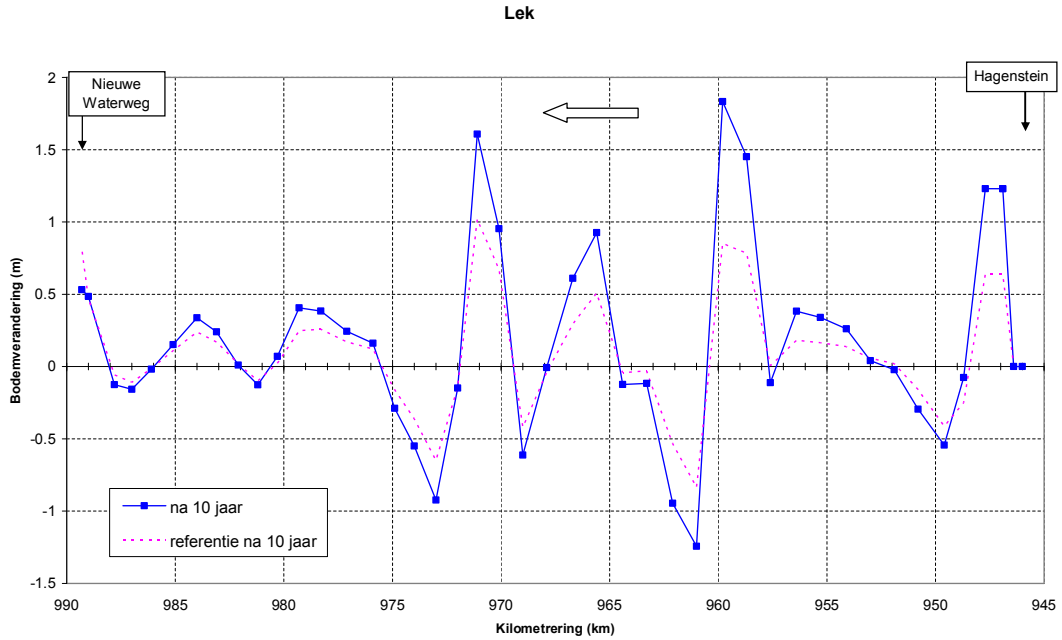
Figuur C.83 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Maas – Amer (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening



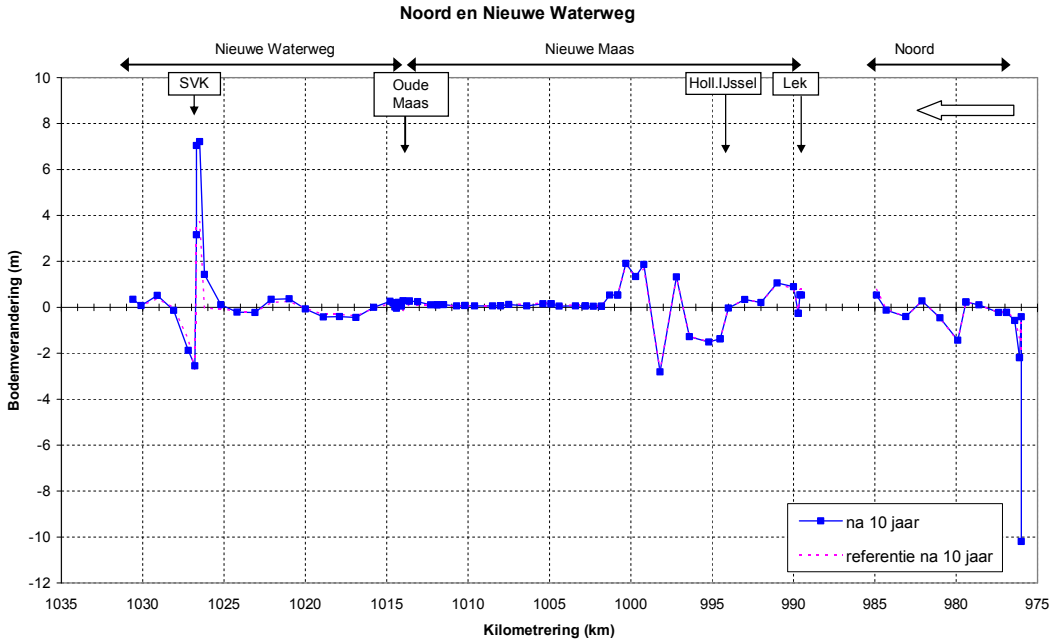
Figuur C.84 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Hollandsch Diep – Haringvliet. (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening



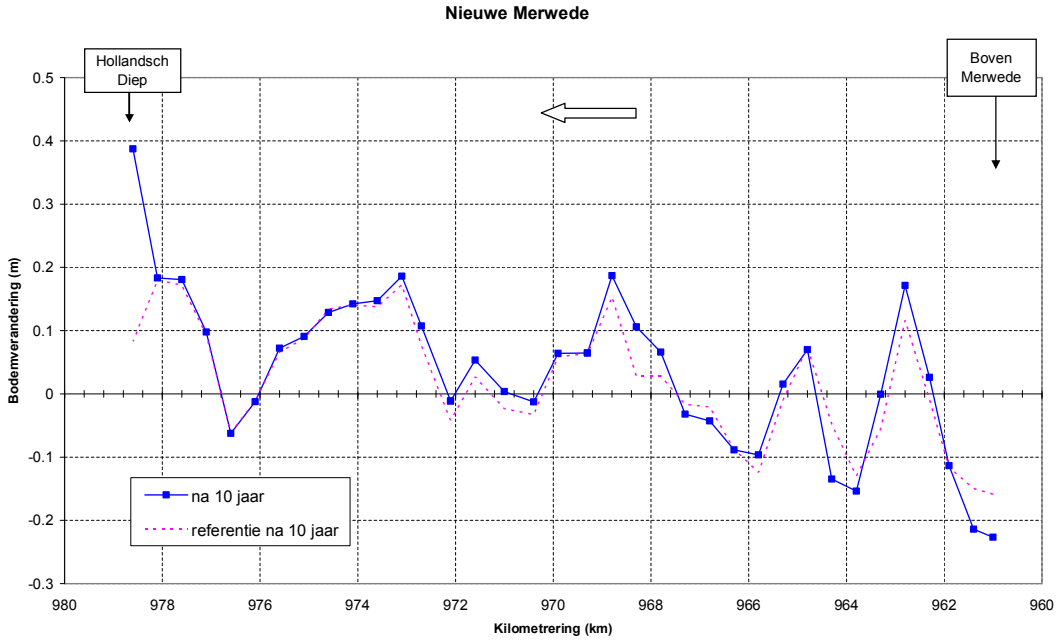
Figuur C.85 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Oude Maas (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening. Grote veranderingen in de bovenloop van de Oude Maas worden toegeschreven aan splitsingspuntrelaties.



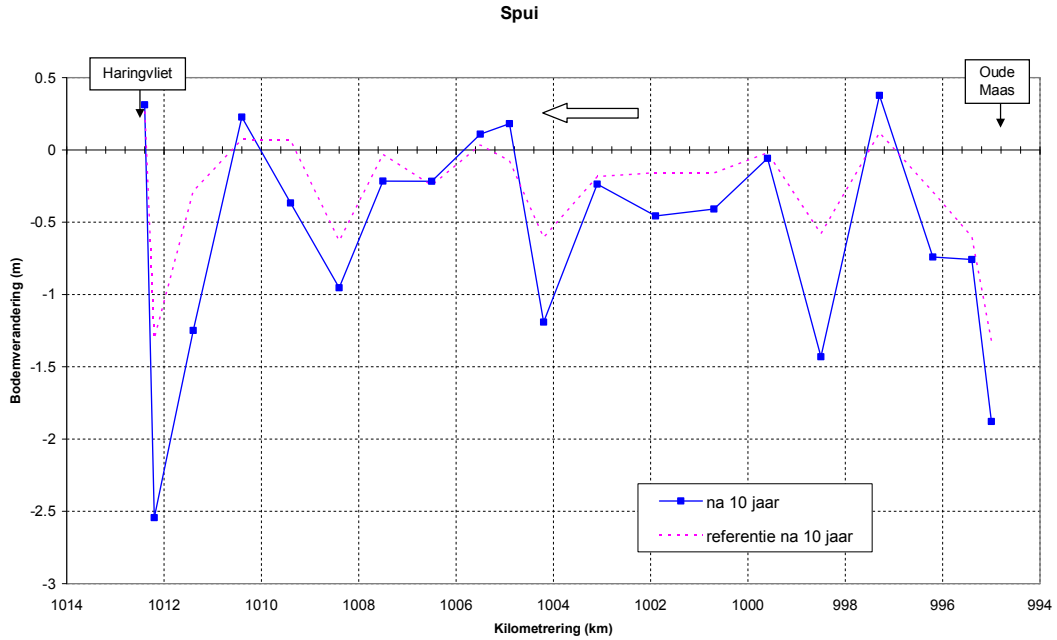
Figuur C.86 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Lek (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening



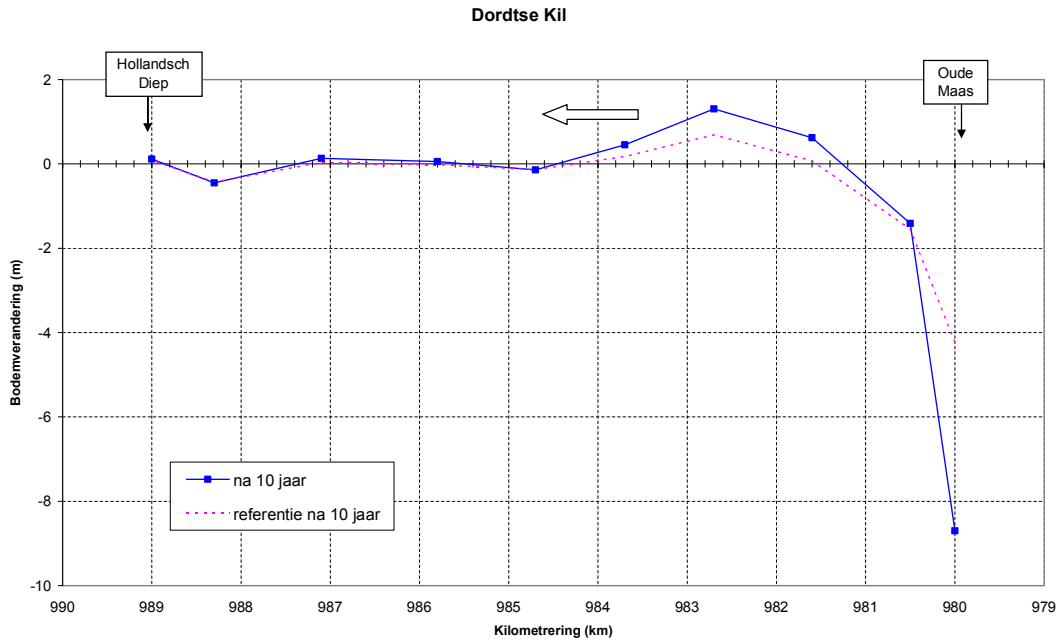
Figuur C.87 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Noord – Nieuwe Waterweg (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening



Figuur C.88 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Nieuwe Merwede (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening

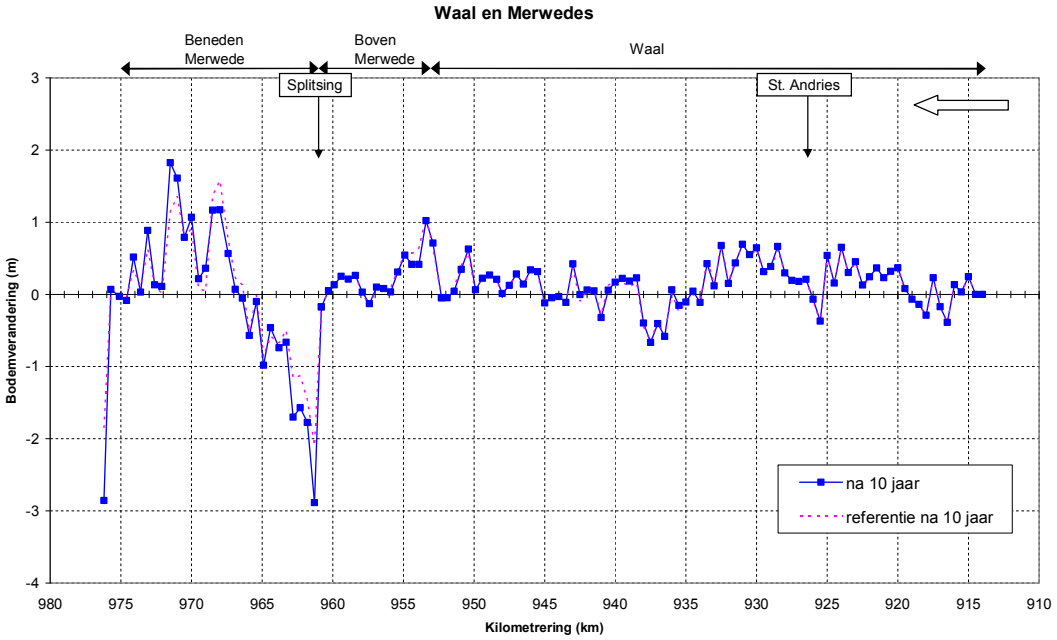


Figuur C.89 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Spui (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening

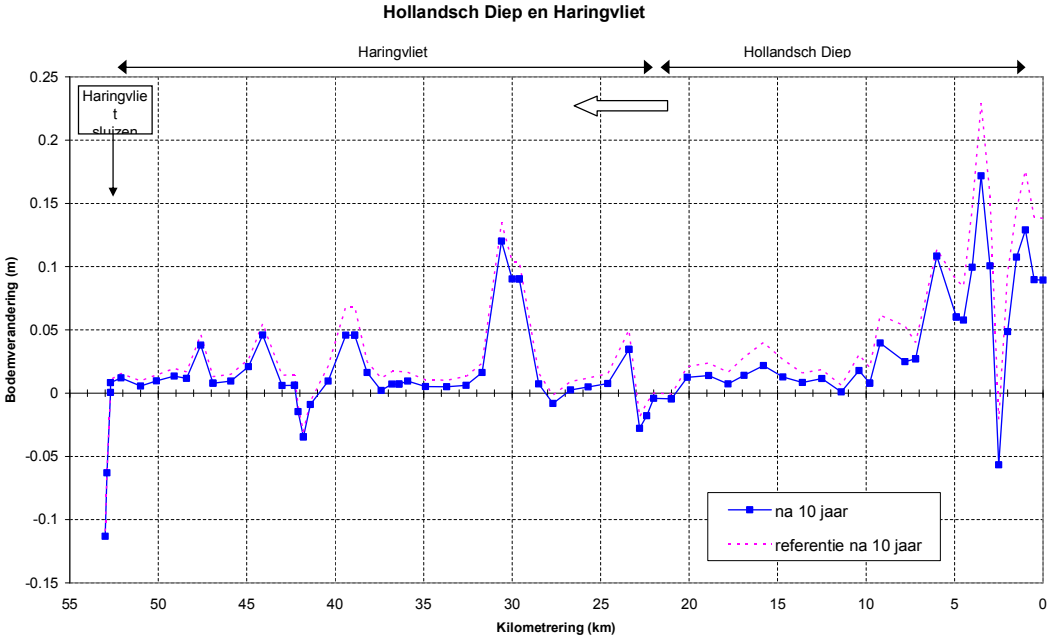


Figuur C.90 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Dordtse Kil (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met verdubbeling van transport (calfac=2) en referentieberekening

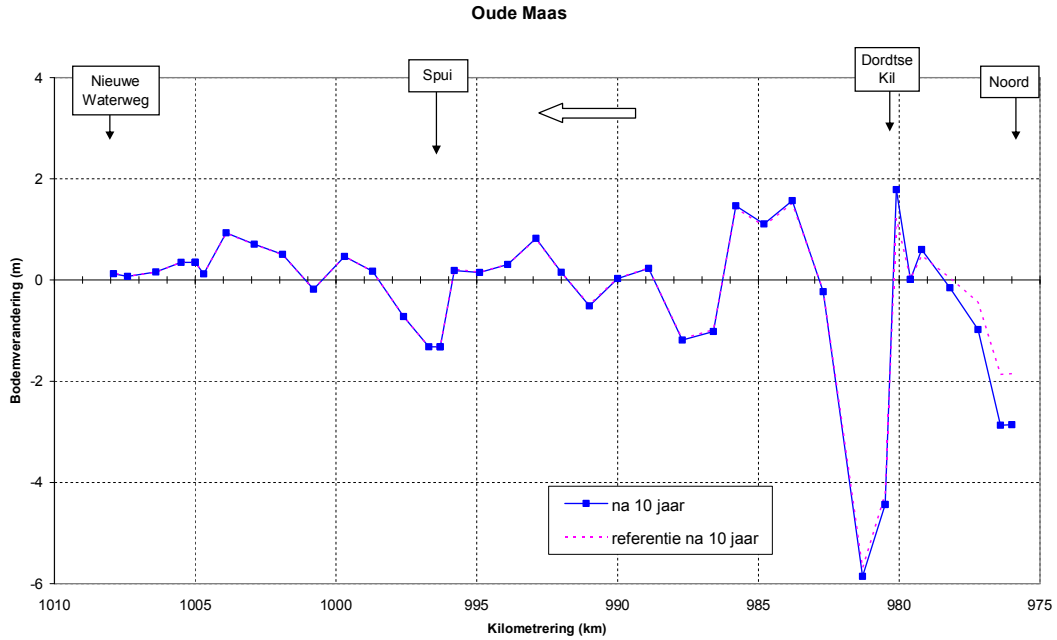
Simulaties met verlaagd aanbod van zwevende stof op rivierranden



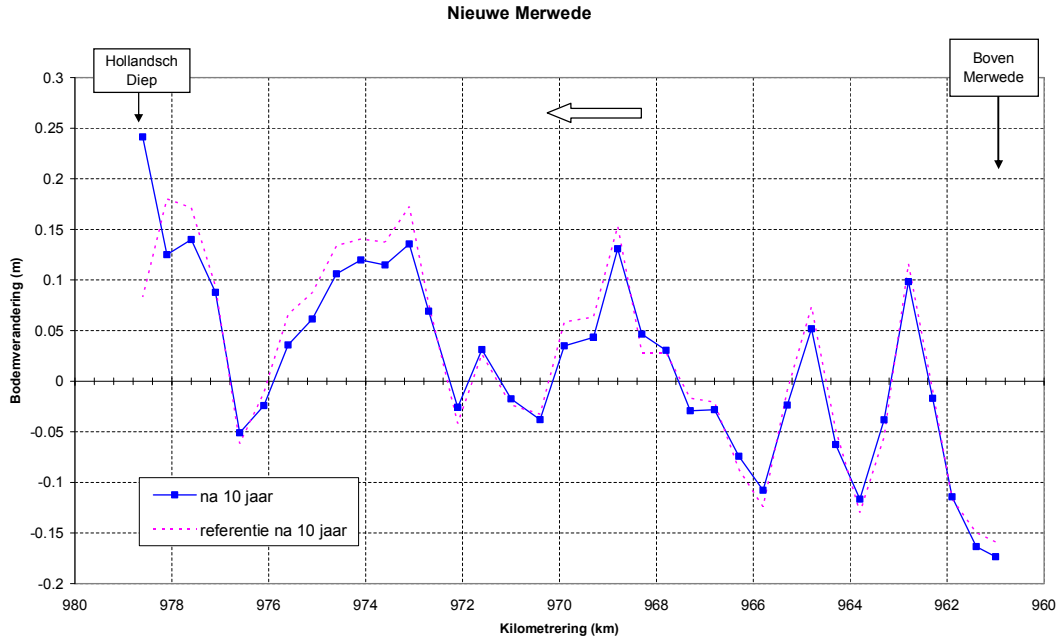
Figuur C.91 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Waal en Merwedes (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met halvering van zwevende stofaanbod op instroomranden.



Figuur C.92 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Hollandsch Diep – Haringvliet. (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met halvering van zwevende stofaanbod op instroomranden.



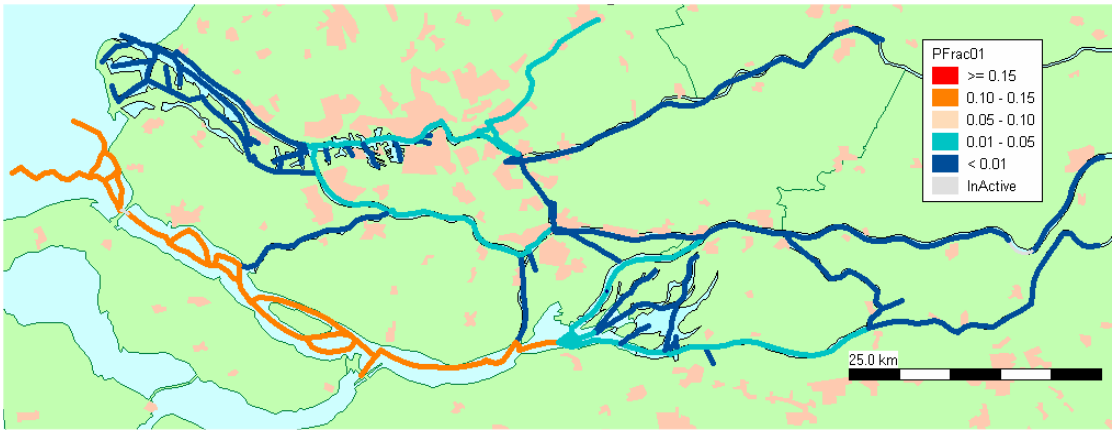
Figuur C.93 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Oude Maas (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met halvering van zwevende stofaanbod op instroomranden.



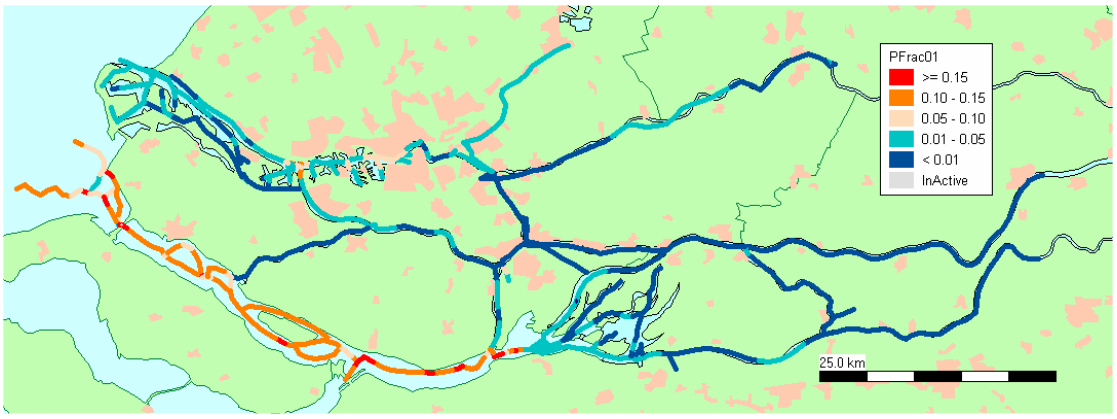
Figuur C.94 Berekende bodemverandering (jan. 2000 – dec. 1989): Nieuwe Merwede (DelWAQ-morfologie in SOBEK-River) met halvering van zwevende stofaanbod op instroomranden.

C.5.2 Bodemsamenstelling

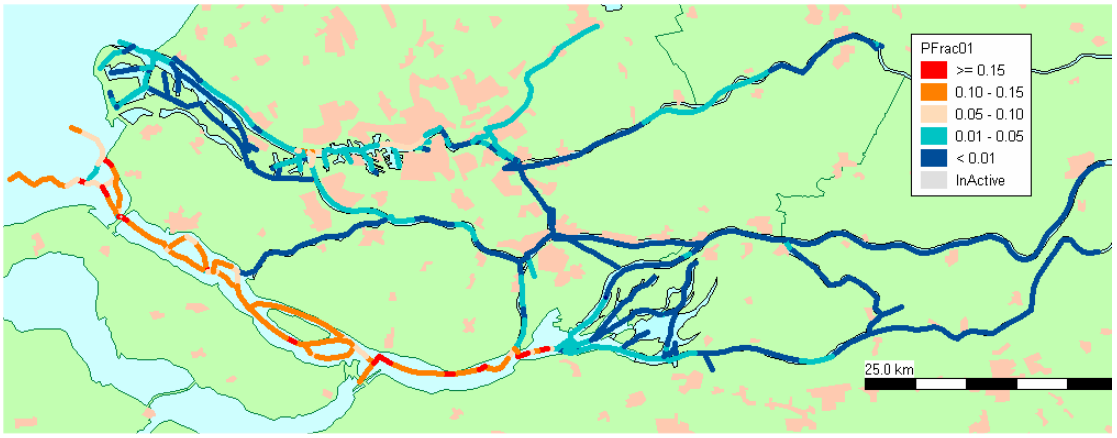
Berekende resultaten voor fracties en mediane diameter D50 met DelWAQ-morfologie.



Figuur C.95 Initiële fractie p_1 slib in het Rijn-Maasmonding model (referentiesimulatie, DelWAQ-morfologie)

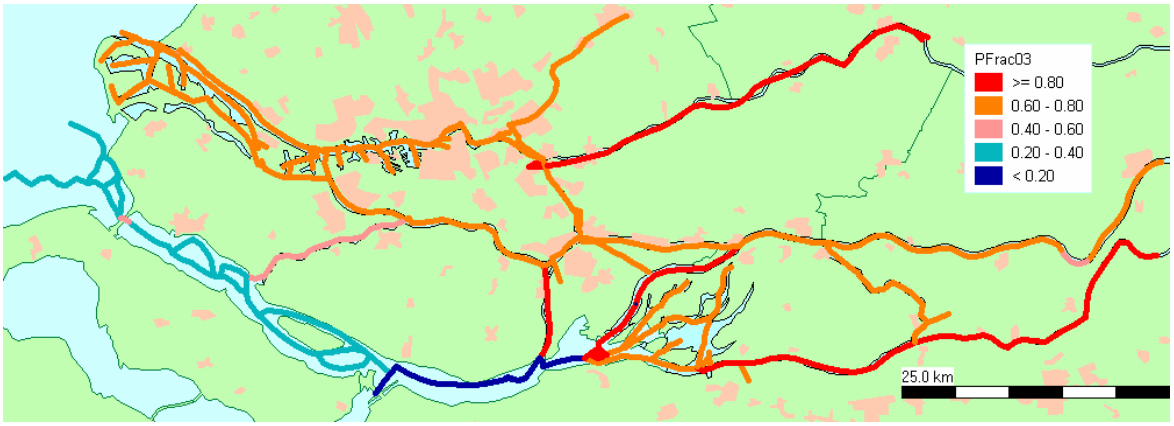


Figuur C.96 Berekende fractie p_1 slib na 10 jaar in het Rijn-Maasmonding model (referentiesimulatie, DelWAQ-morfologie)

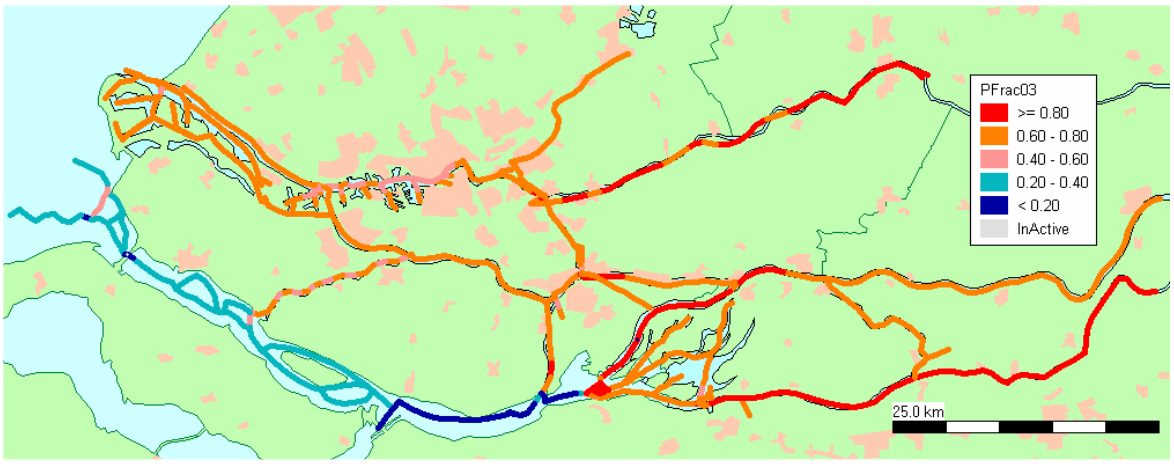


Figuur C.97 Berekende fractie p_1 slib na 10 jaar in het Rijn-Maasmonding model simulatie met gehalveerd aanbod zwevende stof op de instroomranden (DelWAQ-morfologie

In Figuur C.97 is het verschil met de referentiesimulatie vooral zichtbaar op de zand/slib overgang in de Nieuwe Merwede. De veranderingen ten opzichte van de (op metingen gebaseerde) begincondities zijn gering. Dit geldt ook voor de andere fracties zoals blijkt uit de volgende figuren. Hierin is de hoeveelheid van de zandfractie in het model weergegeven.

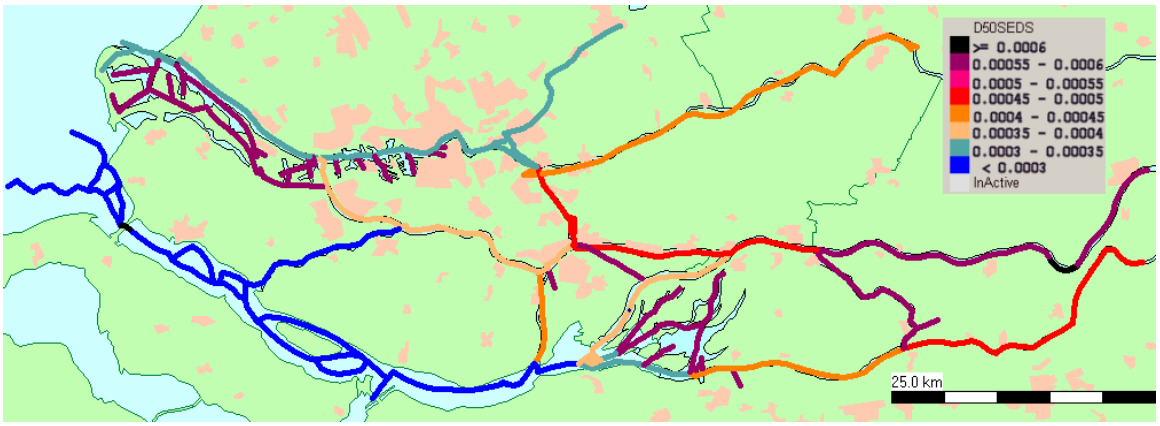


Figuur C.98 Initiële fractie zand p_3 in het Rijn-Maasmonding model simulatie (referentie, DelWAQ-morfologie).

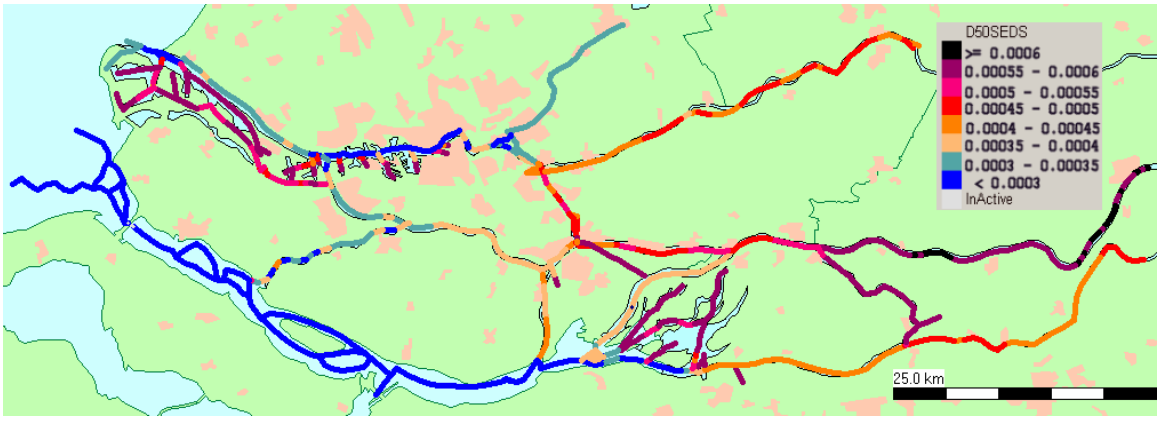


Figuur C.99 Berekende p_3 zand na 10 jaar in het Rijn-Maasmonding model simulatie (referentie, DelWAQ-morfologie).

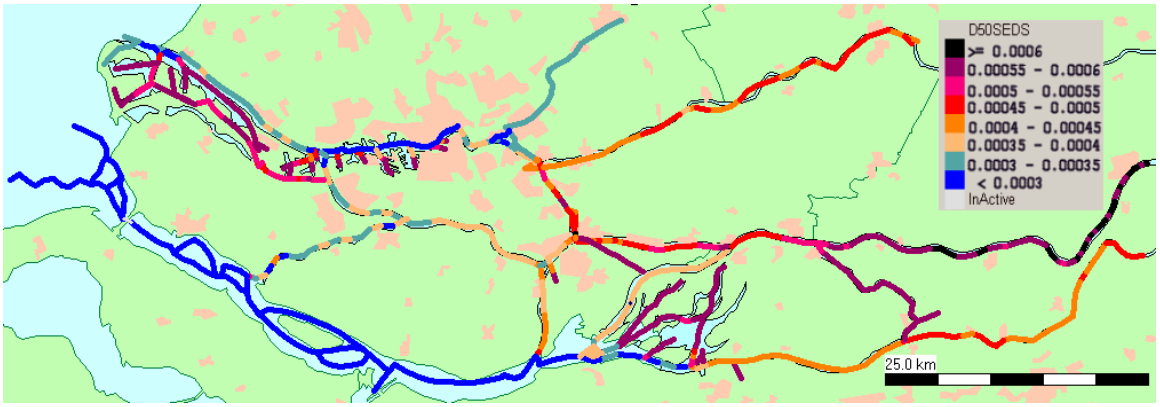
In de volgende figuren zijn vervolgens de resultaten gepresenteerd van de mediane diameter D_{50}. Ook deze geven aan dat de bodemsamenstelling (met locaties van zand en slib overgangen) redelijk wordt geproduceerd.



Figuur C.100 Berekende diameter D_{50} initieel in het Rijn-Maasmonding model simulatie (referentie, DelWAQ-morfologie).



Figuur C.101 Berekende diameter D_{50} na 10 jaar in het Rijn-Maasmonding model simulatie (referentie, DelWAQ-morfologie).



Figuur C.102 Berekende diameter D_{50} na 10 jaar in het Rijn-Maasmonding model simulatie met meenemen van hiding en exposure effecten (DelWAQ-morfologie). De verschillen ten opzichte van de referentie zijn gering.

D Discussiebijeekomst

Op 11 oktober 2006 heeft een discussiebijeenkomst plaatsgevonden waarbij een aantal belangrijke experts zijn geraadpleegd over de implementatie van zand/slib functionaliteit in het modelinstrumentarium. In dit hoofdstuk zijn de discussiepunten en uitkomsten van deze bijeenkomst samengevat.

Deelnemers aan de discussiebijeenkomst “Morfologische modellering met zand slib in Rijn-Maasmonding" waren:

- Kees Sloff (WL, projectleider);
- Jasper Hugtenburg (RIZA, projectleider);
- Ton Visser (RIZA);
- Leo van Rijn (WL/Univ. Utrecht);
- Wang (WL/Univ. Delft);
- Erik Mosselman (WL/Univ. Delft);
- Erwin Meijers (WL);
- Bert Jagers (WL).

Algemeen:

RIZA en WL werken aan de bouw en toepassing van een eendimensionaal SOBEK model met morfologie voor de Rijn-Maasmonding. Onderdeel van dit project is implementatie van een morfologiemodule met zand-slib concepten in SOBEK-River (Rural) en de toepassing ervan. Gebruik wordt gemaakt van de DelWAQ-module die reeds is gekoppeld aan SOBEK-River. In de bijeenkomst is met deskundigen gediscussieerd over de mogelijke concepten en de keuzes voor de implementatie.

Na een inleidende presentatie van Jasper en Kees is gediscussieerd op basis van een aantal relevante punten. Onderscheid is gemaakt tussen de resultaten van berekeningen tot nu toe (met Van Rijn 2007), de modelconcepten, de wijze van implementeren, en de toepassing voor de Rijn-Maasmonding. In onderstaande opsomming staan enkele resultaten van de discussie die zullen worden meegenomen in het vervolgtraject (voorontwerp en bouw van SOBEK morfologie module):

De eerste resultaten van berekeningen met de transportformules van Leo van Rijn (2007a,b,c) zijn gepresenteerd. Voor het model wordt voorgesteld de berekende concentraties in het gebied Hollands Diep en Haringvliet te beschouwen. Deze zouden in de orde van hooguit 5 á 10 mg/l moeten zijn. Op de instroomranden van het model wordt een samenstelling opgelegd die vrijwel geen slib bevat. In plaats daarvan zal een concentratie per fractie moeten worden opgelegd zodat washload tijdens hoogwater het model binnenstroomt (baseer totaal volume op berekende zandvracht voor stabiel houden van bodem). Voor grote modellen zoals Rijn-Maasmonding is het altijd nodig washload mee te modelleren (vooral wanneer met advectie-diffusie wordt gerekend). Aanbevolen wordt de Van Rijn simulatie te herhalen met een opsplitsing in meer fracties.

Bouw van DelWAQ-module kan ruwweg worden beschouwd als het op de juiste manier bepalen en doorgeven van fluxen van sediment van verschillende soorten op diverse interfaces (van cellen, knopen of lagen).

Voor simulatie van de aanpassingslengte/tijd (advectie-diffusie) van zwevend sediment is Galappatti aanpak te gebruiken. Deze wordt verwerkt in de bron en puttermen.

Belang van diffusieeffecten geldt ook voor zout. Er is echter geen overlap tussen zoutimplementatie in SOBEK omdat deze implementatie niet via DelWAQ loopt. Verder lijkt scheiding tussen deze processen geen probleem op te leveren. De aanpak met verhoogde dispersie voor het zout is sowieso niet voor sediment toepasbaar.

Het tegelijkertijd gebruiken van verschillende transportformules voor zwevend-transportconc. en bodemtransportvolume zo veel mogelijk tegengaan (geen 'ratjetoe' aanpak). Bijvoorbeeld gebruik van Meyer-Peter en Muller combineren met een conc=0 voor zwevendtransport.

Voor zand-slib modellering is gewenst de aanpak van Van Ledden (2003) te implementeren met multi-fractie aanpak (zand-slib als aparte fracties, dan verhouding zand/slib in bodem bijhouden, en dan terugkoppelen op de erodeerbaarheid van sedimentfracties). Beschouw de fracties als afzonderlijke processen met eigen transportmodel (slib met Krone Partheniades, zand met transportformule). Daarnaast ook goed de Van Rijn TR2004 formules (Van Rijn, 2007) als parallel spoor in te bouwen, zodat beide wegen kunnen worden afgetast.

Eigenschap van ondergrond (gelaagdheid) speelt grote rol bij zand-slib gedrag. Aanpak met lagenadministratie zoals nu in Delft3D beschikbaar is voor gegradeerd sediment (met vaste lagen) kan als eerste optie worden toegepast. In toekomst zullen wellicht nog alternatieven worden geïmplementeerd. Beseft moet worden dat ruimtelijke middeling van bodemeigenschappen in een rekencel mogelijk veel problematischer is in 1D model dan de discretisatie in de verticaal. Door middeling is niet meer te onderscheiden of zand en slib naast elkaar of als lagen op elkaar voorkomen in een rekencel. Voor implementatie in SOBEK wordt gekeken naar een ander schaalniveau dan Delft3D.

Baggeren is belangrijk in de Rijn-Maasmonding, en het lijkt verder geen probleem dit via baggervolumes door DelWAQ uit te laten voeren. Wel beseffen dat de echte baggerstrategiën rekenen met baggerniveaus, maar dat dergelijke gedetailleerde activiteiten eigenlijk alleen met een 2D/3D model kunnen worden gemodelleerd.

Voor numerieke oplossing wordt gestart met toepassing van een eenvoudig robuust numeriek schema. Op basis van testen kan vervolgens een verdere uitbreiding plaatsvinden voor vergroten nauwkeurigheid, indien gewenst.

Voor de morfologische simulaties wordt uitgegaan van de aanpak met een morfologische factor (versnellen van de morfologische veranderingen in een flow-tijdstap). De flow-tijdstap is dan de leidende tijdschaal.

Verder aandachtspunten implementatie en gebruik: In de flowsecties met kunstwerken zouden de bron en put termen nul moeten worden gezet, maar omdat DelWAQ-cel de kunstwerkcel aggregeert bij de voorgaande cel is dit in DelWAQ-proces niet nodig.

Vaste (niet-erodeerbare) lagen zijn van belang voor de Waal. Deze het best te implementeren door net als in Delft3D de initiële sedimentdikte op te geven. Als sedimentdikte klein gaat worden dan geleidelijk de entrainment of transportcapaciteit reduceren (concept van Struiksma).

Op splitsingspunten is het nodig bed-load te verdelen met splitsingspuntrelatie. Bij suspensieberekening wordt in DelWAQ het sediment gelijk verdeeld met de waterafvoer (verdeling volgens Q1/Q2 met macht 1), hetgeen naar verwachting tot een instabiel gedrag leidt. Gezien opzet in DelWAQ is dit niet echt te voorkomen, maar alleen als model wordt gebruikt voor effecten met vergelijkbare (zeer grote) tijdschalen. Wellicht is er iets met lozing en onttrekking mogelijk om de sedimentverdeling te beïnvloeden.

Rekensnelheid wordt niet als probleem beschouwd wanneer DelWAQ wordt ingezet.

Nagegaan moet worden in hoeverre het mogelijk is om verschillende zones (bijv. zomerbed, winterbed, kribvak) in dwarsprofiel te onderscheiden voor het verdelen van zwevend sediment en bodemtransport, en de morfologische veranderingen.

E Ontwerp en implementatie DelWAQ-morfologie

E.1 DelWAQ process library

Voor de implementatie van de DelWAQ-morfologieprocessen is gebruik gemaakt van de "Open Process Library" van DelWAQ. Deze aanpak wordt op dit moment gehanteerd voor de ontwikkeling van de module, maar biedt de toekomstige gebruikers tegelijkertijd ook de mogelijkheid later zelf processen toe te voegen, bijvoorbeeld alternatieve transportformuleringen.

In onderstaande tekstblok is een toelichting gegeven bij het gebruik van de Open Process Library:

The Open Processes Library is an extensible collection of subroutines used by the water quality module in Delft3D and SOBEK. To support this extendibility the tool that gives access to the contents of the processes library is been adjusted. It now essentially has two modes of operation:

- Selecting the substances and water quality processes for a particular computation
- Extending the library itself with new substances and processes

The *process library* is an object oriented approach where each substance is an object. Each "arrow between substances" in the commonly used flow charts of water quality kinetics (called process) is an object as well. Finally each steering coefficient or steering function is also an object. The library includes all substances we could think of being relevant and includes all interactions between the substances we could think of being relevant. At the moment some 223 substances/organisms and fractions of substances (e.g. dissolved and particulate, and also different algal species) are contained for the standard WAQ module alone (there are also ECOlogical and CHEMistry extensions). The amount of interactions between the substances, the "arrows between the boxes" in common water quality graphs, stands now at some 425 processes for the WAQ module alone. The number of coefficients to steer the processes is several thousands. The 425 processes are computed by some 89 library software functions (Fortran subroutines). Because several processes for e.g. different heavy metals or different organic micro-pollutants essentially behave the same, although with different coefficients, they could be computed by the same library function, fed with different input. This is why the library functions are re-used on average 425/89 = 4.8 times. Although with careful design probably even a somewhat higher re-use rate could be obtained, a rate of almost 5 seems not bad at all.

The *Open Processes Library* can best be compared with a real library with books on the shelves, one book for each substance, one book for each process, one book for each steering coefficient or function. Thousands of books that are already contained in the existing processes library produced at WL | Delft Hydraulics. If a new substance, a new process or a new steering function is needed, you only need to make this 'new book', put it on the shelf and insert its name and reference in the online catalogue.

From that time on the existing library is expanded with your substance, process or steering function. Whether you (or others) will use this functionality in subsequent studies will depend on the study at hand. Sometimes you will, sometimes you won't. The feature is however contained in the library and you can select it (borrow it) any time you want through the multi-level user interface, like all other already existing features. No software errors are possible once you have added your book to the library. If your *book* says that *temperature* is required for the process in the book, the system will take care that *temperature* is there at the right place and in the right form, without any coding from your side. If your *book* produces a result in the form of a flux from one organism to another organism, the system takes care that the flux actually operates on the organisms, without any further coding from your side.

Voor verder toelichting van deze Open Processes Library (OPL) verwijzen we naar de user manual "Open Processes Library".

Op basis van de OPL werden de processen gebouwd en aan elkaar gerelateerd. De implementatie is in eerste instantie uitgevoerd voor 4 fracties (deze kunnen later worden uitgebreid tot grotere aantallen). De bijbehorende 'substances' zijn gedefinieerd voor de waterfase W en de bodemlaag S. Met de OPL zijn vervolgens de benodigde processen geïnitialiseerd.

De invoer van de module werd in eerste instantie opgezet via de DelWAQ User Interface. Door het grote aantal substances en processen is het echter niet te voorkomen dat daarbij een groot aantal bewerkingen nodig is. Voor het ontwikkelen is dit geen bezwaar, maar voor toekomstige toepassing zal worden gezocht naar vereenvoudigingen en vooraf geprepareerde onderdelen.

E.2 Data structures

The heart of the DelWAQ system is the processes library, which is an extensible library of water quality components. The following water quality components are distinguished (see User Manual Open Processes Library):

- *Substances*
  These are all constituents where a concentration or density can be computed for by the water quality model. The concentration/density is computed by the time integration of the reaction equation (dC/dt = ….) together with the advection diffusion equation (ADE) if the substance is carried with the water or without the ADE for substances that are not carried with the water (e.g. those that lay on the bottom). Also phenomena (e.g. BOD, salinity, pH) are called substances although they are not in strict chemical or biological sense. Because the list of available substances in the user interface could become long, they are divided into substance groups. This is just for the ease of reference and has no specific further meaning in the computation.

- *Processes*
  These are the water-quality kinetics. It is the right-hand side of dC/dt = ….. In flow charts of water quality models processes generally represent the *arrows* or fluxes between the substances. Each process is computed by a tiny computer program, a Fortran subroutine. Each process has its input coefficients and produces one or more *arrows* in the flow chart of water quality kinetics. The arrow itself is called *Flux*, so the process produces fluxes.
  The process may also produce output variables. These variables may be used as input for other processes. Output variables may also be used for analysis purposes. They can be displayed in graphs and statistics just like a normal substance. Several processes can use the same Fortran subroutine for their computation but with different input, output and flux variables. If the resuspension and sedimentation of suspended sediment has to be computed for 3 size fractions of suspended sediments in an identical way but with different coefficients, they can use the same Fortran subroutine. The same holds for all those heavy metals that partition in the same way but with different partitioning coefficients or isotherms.
- *Items*
  These are the input variables for the processes, but also the output variables (that may be input to other processes). Also the fluxes between substances are 'items', but they are special in the sense that they contain a description of the substances that they affect. Also the concentrations can appear as items, if they are input to a process. A process may behave e.g. temperature dependent. temperature can be a *substance* if it is modelled as a state variable of the model. It can also act as ordinary input item if it is prescribed from outside by you. The same items can be input to several different processes (*temperature* for instance is an input parameter for many processes). Input items for a process can have a default value. Per process, however, you can specify whether you want the system to use this default value or not. If an item is modelled, the system generally automatically takes the model result as input for all processes that require the item. You can overrule this by specifying the item externally.
  Items can be:
  - constant in time and for the whole model area
  - a time function that is uniform over the whole model area
  - a spatially heterogeneous factor that is constant in time
  - a spatially and temporally varying item.

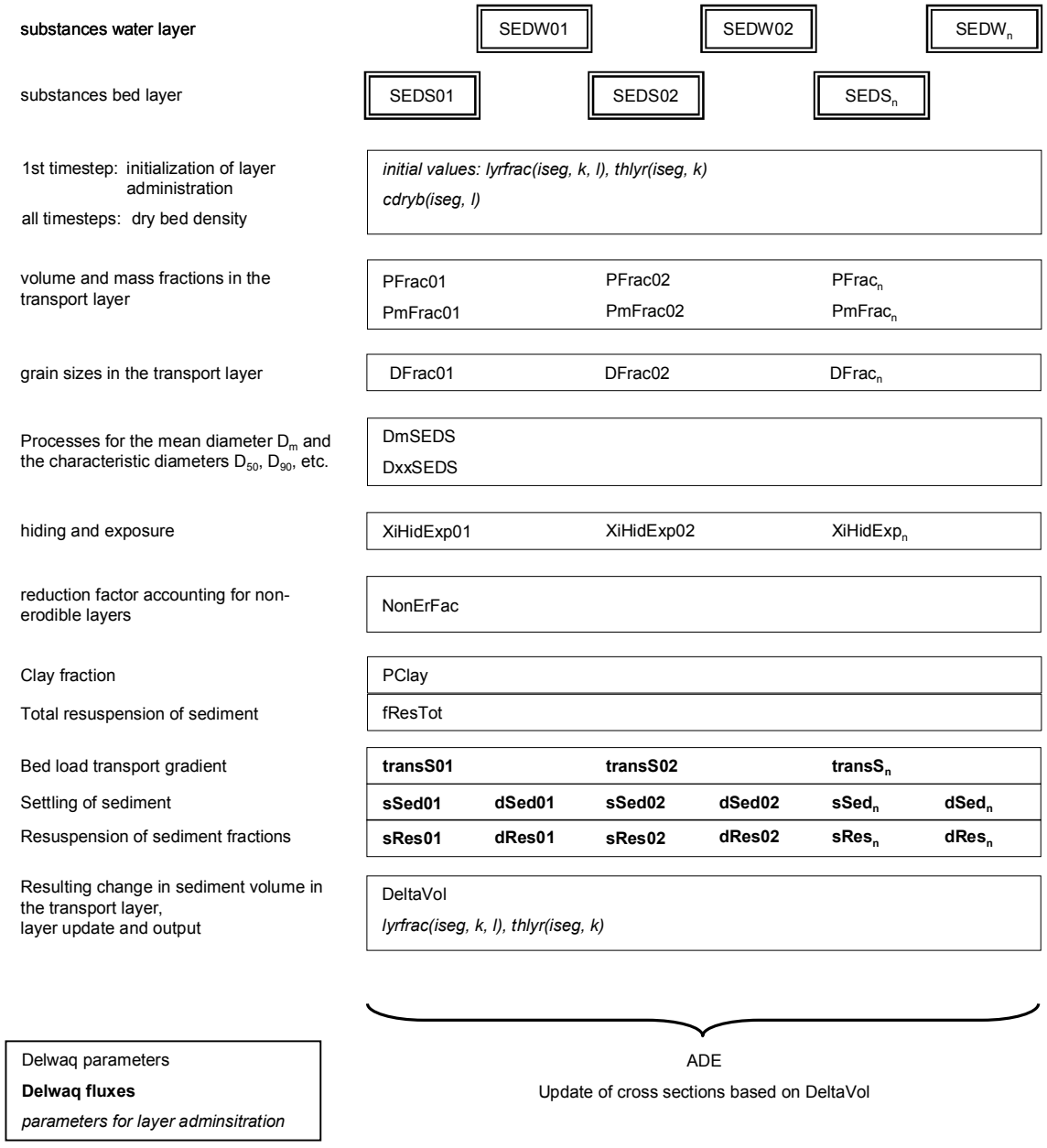
  A model result generally is in the last form. You do not need to care. You can use different approaches for the same item in different studies:
  - temperature as a prescribed constant for a short term simulation
  - as a prescribed time function for a one year simulation of a coastal zone or river
  - temperature modelled with input from solar radiation, cloudiness and humidity).

  The system automatically resolves all references.
- *Fluxes*
  A special class of items consists of the *fluxes* between substances. They have an associated *stoichiometry*. That is a table with the name of the substances where they act upon and the factor with which they act. The *nitrification* flux e.g. acts with a factor -1.0 on ammoniacal nitrogen and with a factor +1.0 on oxidised nitrogen, but it also acts with a factor of - 4.57 on oxygen. This 4.57 represents the amount of oxygen in gram needed to nitrify 1 gram of ammoniacal nitrogen to oxidized nitrogen.

Essentially the substances and processes for morphology are considered for two phases:

1. sediment transported in the water column (suspended sediment concentration, inorganic matter, etc.)
2. sediment available in the bed (bed-load and bed layers). This material is considered in DelWAQ terms an inactive substance as it is not affected by the (suspended-) transport algorithms in DelWAQ.

A schematic structure for morphology processes in DelWAQ is presented in Figuur E.1, designed for the graded-sediment /multi-fraction approach.



Figuur E.1 Structure of substances and processes of DelWAQ morphology module

The most important components of this structure are:

- Define the sediment fractions in the bed as separate substances SEDS01, SEDS02, … (in the mixing layer or top-layer of the bed). The volumes of these bed substances are affected by the sediment-transport capacity processes (bed-load or total-load transport formulae).
- Define the sediment fraction in the water column as separate substances SEDW01, SEDW02, … (in suspension between bed and water surface). The volumes of these substances are affected by advection-diffusion processes (Partheniades-Krone for clay, and Galappatti for sand).
- Based on the mass balances of the DelWAQ segment the processes affecting the volumes of each substance will lead to a bed-volume change of each fraction and a total volume change. For stability of the coupled flow/morphology simulations it is necessary that bed update by these bed-volume changes is done in a numerically stable and mass-conserving way.
- The adaptation of bed composition (administration/bookkeeping of under layers) is done in a process of the DelWAQ model. However, the data is not stored in the global data array of DelWAQ but in a separate array.

E.3 Conditions

E.3.1 Boundary conditions

The continuity equation requires for each branch one boundary condition for each inflowing boundary, which means that at the upstream boundaries of the model boundary conditions are imposed. At outflow boundaries no boundary conditions are required.

For the suspended load sediment concentrations per fraction have to be specified at the inflow boundary. They may be a function of time. For the bed load transport, the bed level and bed composition at the inflow boundary are kept constant for the time being. However, resuspension and settling may take place also in the inflow boundary segment. The morphology module can later be extended to allow the user to impose a time-varying bed level and composition or to specify a bed-load sediment transport per fraction instead.

At *confluence*'s and *bifurcation*'s specific procedures are applied to transfer the sediment transport from the "outflowing" to the "inflowing" branch(es).

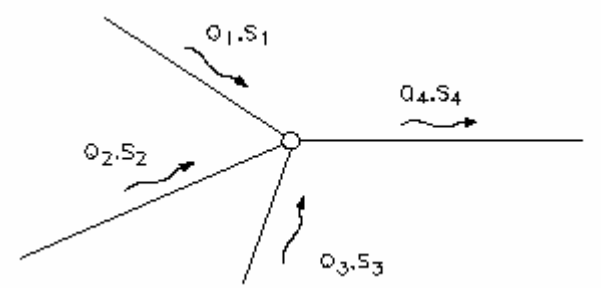
Note:
In tidal areas, boundaries are present which are inflowing and outflowing during a certain period. The imposed boundary condition for the morphological process will be automatically overruled during outflow, and the $S = S_t$ (from the selected sediment transport formula) condition will be applied.

E.3.2 Confluences

A confluence is a node where two or more *branch*es flow into one outflowing branch. At confluence's no particular problems exist for a morphodynamic system. The summation of the sediment transport of the branches flowing to the confluence will be used as a boundary condition for the branch flowing from the confluence.

$$S_k = \sum_{i=1}^{n} S_i \quad S_k = \sum_{i=1}^{n} S_i \tag{D.1}$$

in which n is the number of inflowing/upstream branches, and the index k denotes the first grid point of the branch flowing from the node (confluence). The indices i denote the last grid points of the inflowing branches.



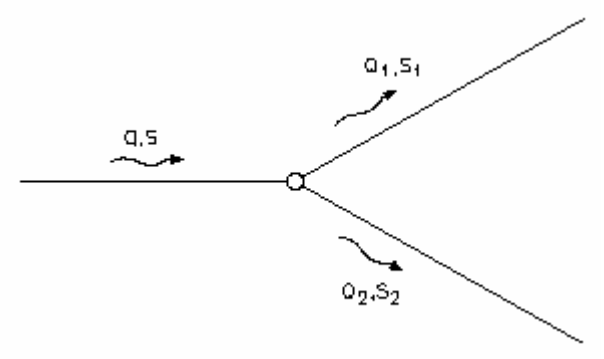
Figuur E.2 Confluence

E.3.3 Bifurcations

Bifurcations in a one-dimensional model are by definition problematic:

- Firstly, the transport distribution over the outflowing *branch*es (from the node) is usually not governed by the discharge distribution, but rather by the local two- or three-dimensional flow pattern. This means that the real distribution cannot be computed by a one-dimensional system.
- Secondly, the sediment distribution functions used often lead to instable model conditions, causing the complete siltation of one channel. To some degree, this is a phenomenon which also occurs in nature, e.g. in the case of an island in a river, one of the two channels normally tend to silt up and close itself off.

The user has to give information to the model, the basis on which DelWAQ computes the sediment transport distribution for a specified condition. According to the principle of sediment conservation, the summation of the sediment transports leaving the bifurcation equals the total sediment transport entering the bifurcation.



Figuur E.3 Bifurcation

In the morphology module of DelWAQ four methods are to be available, of which all but the third one are already implemented.

Method 1:
The sediment transport distribution is proportional to the discharge distribution:

$$S_i = \frac{Q_i}{Q_t} S_t \qquad [i = 1, \ldots, n] \tag{E.1}$$

in which the index *t* denotes the total volume entering (and leaving) the bifurcation and *n* is the number of outflowing branches. This method can be used in all cases with three or more outflowing branches. Moreover, this is the default method for two outflowing branches. The user does not have to give additional information.

Method 2:
The sediment transport is a linear function of the water discharge distribution:

$$\frac{S_1}{S_2} = \alpha_s \frac{Q_1}{Q_2} + \beta_s \tag{E.2}$$

in which the indices 1 and 2 denote the two outflowing branches (see Figuur E.3). The value of the coefficients α_s and β_s are given by the user.

Equation (E.2) can be rewritten in the following format:

$$S_1 = \frac{F}{1+F} S_t \qquad S_2 = \frac{1}{1+F} S_t \tag{E.3}$$

with:

$$F = \alpha_s \frac{Q_1}{Q_2} + \beta_s \tag{E.4}$$

This method can only be applied in the case of two outflowing branches.

Method 3:
The sediment transport distribution is given in table format as follows:

Q_1/Q_2	S_1/S_2
X_1	Y_1
.	.
.	.
X_i	Y_i
.	
.	
X_n	Y_n

which gives the relation between the ratio S_1/S_2 as a function of the discharge distribution. Of course, $S_1 + S_2$ equals the total volume of sediment transport towards the bifurcation.
This method can only be applied in the case of two outflowing branches.

Method 4:
The sediment transport distribution is expressed by a power function of the water discharge and width ratio of the two outflowing branches:

$$\frac{S_{out,i}}{S_{out,j}} = \left(\frac{Q_{out,i}}{Q_{out,j}}\right)^k \left(\frac{B_{s,i}}{B_{s,j}}\right)^m \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_j}\right) \qquad [i = 1, \ldots, n-1;\ j = 2, \ldots, n] \tag{E.5}$$

where

n	=	the number of outflowing branches
k,m	=	exponents to be specified by the user, where these exponents are characteristic for the entire bifurcation (i.e., identical for all combinations of outflowing branches)
γ_i	=	multiplication (calibration) factor of the sediment transport formula at outflowing branch i
$B_{s,i}$	=	Sediment transporting width outflowing branch with number i
$S_{out,i}$	=	Sediment transport rate outflowing branch with number i
$Q_{out,i}$	=	Discharge outflowing branch with number i

This method can be used in all cases with two or more outflowing branches, where for each node in a network only two parameters n and m have to be given. The default option (method 1) is a limited form of this power formula in which n=1 and m=0. The power function approach is the most general sediment distribution function available in SOBEK. For the time being this method is only implemented for two outflowing branches.

E.3.4 Lateral sediment

Lateral sediment is defined as sediment entering or leaving the model, except the sediment entering or leaving the model at the model boundaries. The lateral sediment is added as a term to the continuity equation. A distinction is drawn between dredging and dumping.

In case of dredging, lateral sediment conditions can be defined in terms of depths per day (dzDredeg [m/d]). In case of dumping, a volume per sediment fraction and day has to be specified by the user ($dump_i$ [m^3/d]). The dumped volumes include the pore volume of the bed. The associated values have to be specified for each (group of) segment(s) and can be entered either as a tabulated function of time, or as a constant value.

At present dumped amounts of sediment are not coupled to the dredged material.

E.4 Bed-material sediment transport

E.4.1 General

Sediment-transport formulas are used to compute the transport capacity of bed material based on local flow conditions and available material in the bed layer S. These processes only act on the substances in the bed SEDS01, SEDS02, etc. The output of these formulas is a transport capacity of sand and gravel for bed-load. It also provides the equilibrium concentration for suspended load to be used in advection-diffusion equation for Galappatti (to compute erosion/deposition term in Galappatti equation).

The equations are implemented together in one process. The selection of the desired model is organized by a switch.

The specific calculation of hiding and exposure coefficients is done in a separate process/subroutine. This process is called before CALSEDM to provide the appropriate values of the coefficients.

E.4.2 Shields parameter

In most sediment transport formulas the Shields parameter is defined as follows:

$$\theta_s = \frac{\overline{u}^2}{C^2 \Delta_d D_r} \tag{E.6}$$

in which:

$\overline{u}$	= average flow velocity
C	= Chézy coefficient
Δ_d	= relative density of the sediment
D_r	= representative grain size

The parameter is introduced by Shields (1936) to define a criterion for the initiation of motion of bed particles. The parameter is also suitable for a general indication of the flow characteristics. This calculation is part of subroutine CALSEDM.

E.4.3 Sediment-transport formula of Engelund en Hansen

The well-known transport formula of Engelund & Hansen (1967) is usually applied for rivers with fine sediment. It computes the total bed-material load (bed-load and suspended-load) of sand. The formula does not account for a threshold of motion, which makes the formula less suitable for flow conditions near this threshold (relative coarse bed material).

The formula can be written is a short, dimensionless way (excluding pores):

$$\phi = \gamma_s \cdot 0.05 \frac{C^2}{g} \theta_s^{5/2} \tag{E.7}$$

In this representation ϕ is a dimensionless sediment transport parameter, θ_s is the Shields parameter (see section E.4.2), C is the Chézy coefficient, and γ_s is a calibration factor (or general multiplification factor). The dimensionless transport parameter is defined as:

$$\phi = \frac{s}{\sqrt{g \Delta_d D_r^3}} \tag{E.8}$$

in which D_r is the representative grain size. In both the Shields parameter and transport parameter the grain size D_{50} is applied for uniform sediment conditions.

Using the appropriate definitions of ϕ and θ_s, the sediment transport per unit width can also be written as:

$$s = \frac{0.05 \cdot u_m^5}{\sqrt{g}\, C^3\, \Delta_d^2\, D_{50}} \tag{E.9}$$

in which:

u_m	= average flow velocity in the main channel [m/s]
Δ_d	= relative density of sediment [-]
ε	= packing factor of bed material [-]
D_{50}	= grain size for which 50% of the material is smaller [m]
s	= total-load transport without pores per unit of width [m^2/s]

Note:
The formula is not designed for graded-sediment, although it can be applied for each size fraction separately. However, the sum of transport rates computed for fraction of a graded mixture, is usually not equal to the (uniform) transport rate based on the D_{50} of the mixture.

E.4.4 Meyer-Peter and Müller transport formula

The transport formula developed by Meyer Peter & Müller (1948) is particularly by used for rivers with more coarse material than rivers for which the Engelund & Hansen transport formula is used.

An important difference with the Engelund & Hansen formula is, that a threshold of transport is present. Below a specified value of the shields parameter the transport is zero.

The general appearance of the Meyer-Peter and Müller (MPM) formula is (excluding the pores):

$$\phi = \gamma_s \cdot 8 \left(\mu\theta_s - \xi_r \cdot \theta_{cr} \right)^{3/2} \tag{E.10}$$

With ϕ = the transport parameter (equation (E.8)), θ_s is the critical Shields parameter (default defined as 0.047), ξ_r =hiding and exposure function (see section E.4.7), γ_s is a calibration factor, and μ = the ripple factor. The hiding and exposure function is equal to unity for uniform sediment conditions. The ripple factor is defined as:

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{3/2} \quad with \quad C_{90} = 18 \cdot \log\left(\frac{12h}{D_{90}} \right) \tag{E.11}$$

Note that in SOBEK-RE the roughness value C_{90} was computed with $3 \cdot D_{90}$ instead of D_{90}. In Delft3D-3DMOR the formula above is used.

For uniform sediment Meyer-Peter & Müller use the main grain size D_m as representative grain diameter, meaning that using the shields parameter θ_s based on D_m, the sediment transport per unit width is computed by:

$$s = \gamma_s \cdot 8 \sqrt{g \Delta D_m^3} \left(\frac{u_m^2}{\sqrt{C_{90}^3 C}\, \Delta_d D_m} - 0.047 \right)^{3/2} \tag{E.12}$$

in which:

Δ_d = relative density of sediment [-]
ε = packing factor of sediment [-]
u_m = average flow velocity in the main channel [m/s]
C = Chézy coefficient [$m^{1/2}/s$]
C_{90} = Chézy coefficient with respect to the bed material [$m^{1/2}/s$]
s = bed-load transport per unit of width (without pores) [m^2/s]

If the transport parameter ϕ is less than zero the total bed-load transport is taken equal to zero (ϕ <0: s_{bi} = 0).

For graded sediment (multi-fraction approach) two versions of this MPM formula are distinguished following their evaluation of the transport parameter ϕ. In this approach the reference diameter for transport parameter, Shields parameter and hiding and exposure function is taken equal to D_i (mean diameter of the considered sediment class).

Version ME1

The transport parameter involves two empirical constants: $M1$ (the ripple factor μ) and $M2$ (related to the critical Shields parameter) to be introduced by the user:

$$\phi_i = \gamma_s \cdot 8 \left(M1 \cdot \theta_{s,i} - \xi_i \cdot M2 \right)^{3/2} \tag{E.13}$$

in which subscript i relates to sediment fraction i (and its representative mean diameter D_i).

Version ME2

The transport parameter involves the computation of a Chézy roughness coefficient C_{90} representing roughness due to grains (see (E.11)). It is used to express the ripple factor μ as $(C/C_{90})^{3/2}$. The transport parameter is computed as:

$$\phi_i = \gamma_s \cdot 8 \left(\mu \cdot \theta_{s,i} - \xi_i \cdot 0.047 \right)^{3/2} \tag{E.14}$$

in which subscript i relates to sediment fraction i (and its representative mean diameter D_i).

E.4.5 Van Rijn TR2004 transport formula (multi-fraction)

The sediment-transport model TR2004 of Van Rijn (2007a,b,c) is presented in section B.1.

E.4.6 User-defined formula

A user defined formula is added which can be defined as power-law transport formula. It is defined as:

$$s_{bi} = \frac{M_1 \, \overline{u}^{M_2}}{D_m^{M_3}} \tag{E.15}$$

in which M_1, M_2, and M_3 are empirical constants to be provided by the user.

E.4.7 Hiding and exposure

For hiding and exposure effects in transport formulae for graded sediment, a separate process has been defined. The subroutine is called before the transport formula to provide the hiding and exposure function.

In graded-sediment (multi-fraction) simulations for sand and gravel mixtures the hiding/exposure effect is introduced by the improved Egiazaroff exposure correction function $\xi_i\left(D_i, D_{ref}\right)$ of Ashida and Michiue (1972):

$$\xi_i = \beta \cdot \frac{D_{ref}}{D_i} \qquad \text{if } \frac{D_i}{D_{ref}} < \alpha_{\max} \tag{E.16}$$

$$\xi_i = \left[\frac{\log_{10}(19.0)}{\log_{10}(19.0\, D_i / D_{ref})} \right]^{\gamma} \quad \text{if } \frac{D_i}{D_{ref}} \geq \alpha_{\max}$$

where

$$\alpha_{\max} = \max(\alpha, 0.1)$$

$$\beta = \alpha_{\max} \left(\frac{\log_{10}(19.0)}{\log_{10}(19.0 \cdot \alpha_{\max})} \right)^{\gamma}$$

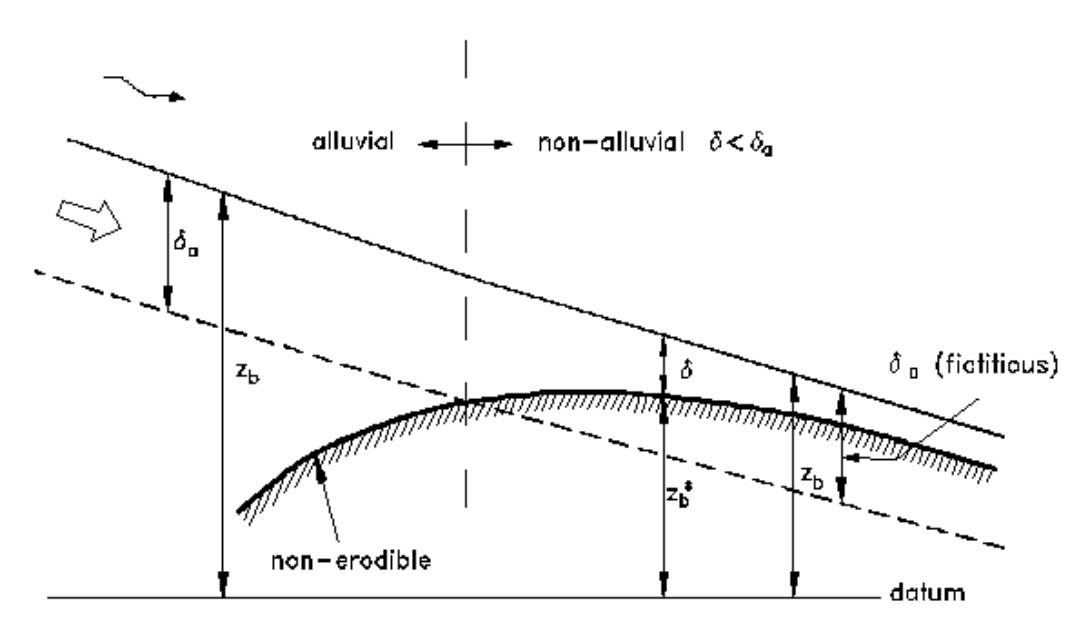
The value of α can be provided by the user, or a default value $\alpha = 0.4$ is used. Similarly a value for γ can be provided, or a default value of $\gamma = 2.0$ is used. In default conditions the value of β equals 0.85.

E.4.8 Non-erodible layers

When (a part of) the riverbed consists of a non-erodible layer (e.g. rock or clay), both sediment transport and the celerity of bed perturbations will change. The sediment transport will be governed by the amount supplied by the area upstream of the fixed bed layer and the celerity of perturbations will increase. Effectively a non-erodible layer in a segment is approached when sediment layers are emptied in this segment.

The method to deal with this phenomenon, which is implemented in SOBEK, was described by Struiksma (1999). The method is based on applying a reduction of the transport gradients (causing erosion) proportional to the remaining layer of sediment above the non-erodible bed. As soon as the non-erodible bed is exposed the transport capacity for bed-load is completely diminished. For suspended-load fractions this would mean a reduction of the resuspension flux.

The concept of Struiksma for bed-load (or total load) is as follows.



Figuur E.4 Definition sketch

For the alluvial bed the bed-load transport occurs in the transport layer:

$$\delta_a = \alpha_{al} h \tag{E.17}$$

in which δ_a is the transport layer thickness as specified by the user, α_{al} is a the alluvial-layer factor, h is the water depth. If the sediment motion is affected by a fixed bed layer the transport layer thickness becomes:

$$\delta = z_b - z_b^* \tag{E.18}$$

in which δ is the layer thickness, z_b is the bed level and z_b^* is the level of the fixed bed layer.

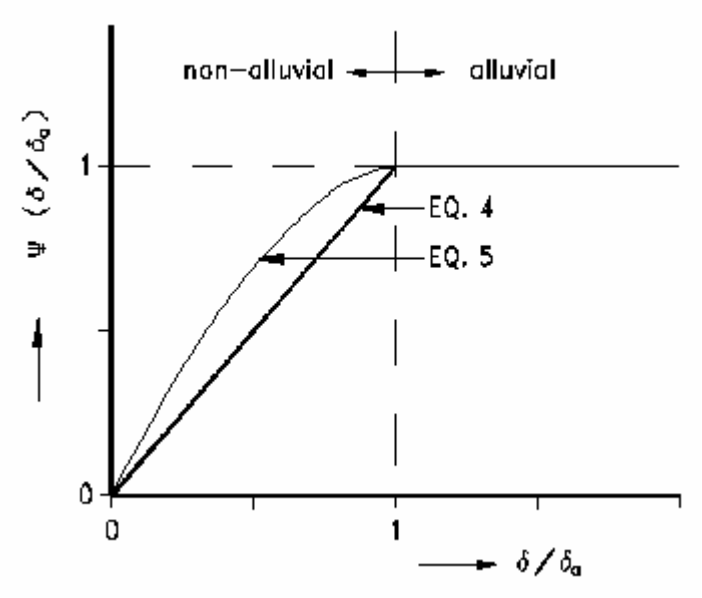
- The sediment motion "feels" the fixed bed layer if $\delta < \delta_a$. This condition is referred to as the non-alluvial bed. The transport formula still holds but yields a fictitious value.
- For the alluvial and non-alluvial bed the sediment transport computation is based on the selected sediment transport formula. For the non-alluvial bed the transport is reduced as follows:

$$s^* = \psi \left(\frac{\delta}{\delta_a} \right) s \tag{E.19}$$

in which s^* is the sediment transport per unit-width, ψ is the reduction function and s is the sediment transport per unit width computed with the selected transport formula for alluvial bed with uniform grain-size.
The following sediment transport reduction functions are available (user selection):

$$\psi\left(\frac{\delta}{\delta_a}\right)=\frac{\delta}{\delta_a} \qquad \left(\text{for } \delta<\delta_a\right); \textit{linear}$$
$$\psi\left(\frac{\delta}{\delta_a}\right)=\sin\frac{\pi}{2}\frac{\delta}{\delta_a} \qquad \left(\text{for } \delta<\delta_a\right); \textit{non}-\textit{linear} \tag{E.20}$$

Both functions are shown in the figure below



Figuur E.5 Reduction functions for the sediment transport

Note: Special care has to be taken that during a time step not more sediment is taken than the volume that is available on top of the non-erodible cell. This type of overshoots may lead to negative frequencies of sediment fractions, or mass errors in the sediment budget.

E.5 Suspended-sediment transport

E.5.1 General

Temporal and spatial variations in the depth-integrated suspended-sediment concentration follow from the convection-diffusion equation. The 3-D convection-diffusion equation for suspended sediment (with reasonably low concentrations) is obtained by applying the Reynolds procedure and the eddy-viscosity concept for a fluid and sediment mixture, and subtracting the continuity equation for the mixture.

$$\frac{\partial c}{\partial t}+u\frac{\partial c}{\partial x}+v\frac{\partial c}{\partial y}+w\frac{\partial c}{\partial z}-\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_{sx}\frac{\partial c}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_{sy}\frac{\partial c}{\partial y}\right)= \\ =w_s\left(1-c\right)^{\alpha}\frac{\partial c}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_{sz}\frac{\partial c}{\partial z}\right) \tag{E.21}$$

where α is taken equal to zero for low-concentration flows. The sediment-flow interaction is determined by the sediment mixing coefficients ε_{sx}, ε_{sy} and the particle fall velocity w_s.

In DelWAQ the advection-diffusion equation is applied to the substances which are suspended in the water-column (not the material that is in the bed layer). In a 1-D cross-sectional averaged model this equation must be integrated. Three approaches are implemented:

- For mud/clay fractions the Krone-Partheniades approach is used that has been available in DelWAQ for computing the transport of inorganic matter.
- For sand-mud fractions an adaptation to the Krone-Partheniades approach is implemented in which the entrainment and deposition terms are modified according to Van Ledden (2003).
- For (suspended) sand fraction the Galappatti approach is used, in which the entrainment and deposition terms are replaced by Galappatti's source term. This approach has been available in Delft3D for computing depth-averaged sediment concentrations.

E.5.2 Galappatti model

This method proposed by Galappatti (Galappatti, 1983, Galappatti and Vreugdenhil, 1985) and extended to 2-DH models by Wang (1989) accounts for the spatial and temporal adaptation of suspension profiles to the changing flow conditions.

In a straight-on depth-integration of the convection-diffusion equation for the underflow the adjustment of profiles and average concentrations is replaced by a sediment-entrainment function, which is different than the original bed-boundary condition (Wang, 1989). Such a term is usually an empirical or semi-empirical which requires calibration, and therefore reduces the predictive power of these depth-integrated models. Obviously, another more robust approach is needed to overcome this problem. Galappatti (Galappatti, 1983, Galappatti and Vreugdenhil, 1985) proposed an asymptotic solution to the 1-D convection-diffusion model which can be used if the deviation of shape of the concentration profile from the shape of the equilibrium profile is small. The depth-integrated form of the equation is found by substituting an asymptotic solution of the depth-integrated concentration into it, and by using a concentration or gradient type bed-boundary condition. The depth-averaged concentration C_s is then theoretically determined instead of empirically, since the convection-diffusion equation is actually solved (although approximately, only for lower order terms). Consequently the resulting equation for the depth-averaged suspended-sediment concentration, which we call Galappatti's equation, does not involve any empirical entrainment function, and is therefore much more robust. Wang (1989) extended the originally 1-D Galappatti's equation to two-dimensions, and in this section a further extension of this theory is summarized for 2-D turbidity currents as derived in Sloff (1994a). The applicability and validity of the original approach was studied by Wang (1992). The following elaboration of the theory is taken from Sloff (1997).

Consider the 3-D convection-diffusion equation for suspended sediment shown in equation (E.21). After normalizing the equation it can be rewritten in terms of differential operators:

$$\mathrm{L}[\,c(\hat{\eta})\,] = \mathrm{D}[\,c(\hat{\eta})\,] \qquad \text{(E.22)}$$

with transformed coordinates

$$\tau = \frac{w_s}{h}(t - t_0);\ \xi = \frac{w_s}{uh}(x - x_0);\ \overline{\zeta} = \frac{w_s}{vh}(y - y_0);\ \hat{\eta} = \frac{z - z_b}{h}$$

and with normalized velocity profiles

$\psi_u(\hat{\eta}) = u(\hat{\eta})/\overline{u}$ = normalized main flow-velocity profile in x-direction

$\psi_v(\hat{\eta}) = v(\hat{\eta})/\overline{v}$ = normalized main flow-velocity profile in y-direction

These profiles can be formulated theoretically according to for instance equation (B.22).

At reference level a (i.e. $\hat{\eta} = \hat{\eta}_a$) it is proposed to use a gradient-type (Von-Neumann type) bed boundary condition (instead of a concentration type):

$$[\partial c]_{\hat{\eta}=\hat{\eta}_a} = [\partial c_e]_{\hat{\eta}=\hat{\eta}_a} \tag{E.23}$$

in which $c_e(\hat{\eta}) = C_{se} \cdot \psi_c(\hat{\eta})$ is the equilibrium concentration, $\psi_c(\hat{\eta})$ is the equilibrium concentration profile (e.g. following from integration of equation (B.19)), C_{se} is the depth-averaged equilibrium concentration, and $c_a = c_e(\hat{\eta}_a)$ is the equilibrium bed concentration.

Now the theory of Galappatti states that the (approximate) solution of the convection-diffusion equation can be presented as an asymptotic expansion:

$$c = \sum_{j=0}^{n} c_j \tag{E.24}$$

where c_j is one order of magnitude smaller than c_{j-1}. Galappatti assumed that terms on the left side of (E.22) are an order of magnitude smaller than on the right hand side, such that after substitution of this asymptotic solution into (E.22) terms of the same order of magnitude can be collected as follows:

$$\mathrm{D}[c_j] = \begin{cases} 0 \text{ for } j = 0 \\ \\ \mathrm{L}[c_{j-1}] \text{ for } j > 0 \end{cases} \tag{E.25}$$

Formally also the boundary conditions should be treated in this manner (see Wang, 1989, 1992), and a bed-boundary condition should be used for each term c_j. However, Galappatti made the important assumption that only the zero-order term contributes to the (yet unknown-) depth-averaged concentration so that the bed-boundary condition only has to be used once (for c_0):

$$\int_{\hat{\eta}_a}^{1} c_j \mathrm{d}\hat{\eta} = \begin{cases} C_s & \text{for } j = 0 \\ 0 & \text{for } j > 0 \end{cases} \tag{E.26}$$

Alternatively Wang (1989) proposed a more general approach by introducing a set of test functions which we also applied here, such that:

$$\int_{\hat{\eta}_a}^{1} c_j(\hat{\eta})\psi_u(\hat{\eta})\,\mathrm{d}\hat{\eta} = \begin{cases} C_s & \text{for } j=0 \\ 0 & \text{for } j>0 \end{cases} \tag{E.27}$$

in which C_s is the depth-averaged concentration. In this way the gradient-type bed-boundary condition (E.23) becomes:

$$\sum_{j=0}^{n} \left.\frac{\partial c_j}{\partial \hat{\eta}}\right|_{\hat{\eta}=\hat{\eta}_a} = \left.\frac{\partial c_e}{\partial \hat{\eta}}\right|_{\hat{\eta}=\hat{\eta}_a} \tag{E.28}$$

The exact solution to each of the collected terms is defined by applying an inverse operation on them (or particularly on shape functions for velocity and concentration). The inverse operator applied to a function $g(\hat{\eta})$ can be written for the presented model (Galappatti, 1983, Sloff, 1994a) as:

$$\mathrm{D}^{-1}\left[\,\mathrm{g}(\hat{\eta})\,\right] = \mathrm{f}(\hat{\eta}) = \psi_c(\hat{\eta})\int_{\hat{\eta}}^{1}\left(\frac{\mathrm{g}(\hat{\eta})}{\psi_c(\hat{\eta})}\right)\mathrm{d}\hat{\eta} + \\ -\int_{\hat{\eta}}^{1}\mathrm{g}(\hat{\eta})\,\mathrm{d}\hat{\eta} + \varphi_0\psi_c(\hat{\eta}) \tag{E.29}$$

where constant φ_0 follows from

$$\int_{\hat{\eta}_a}^{1}\mathrm{f}(\hat{\eta})\,\mathrm{d}\hat{\eta} = 0 \tag{E.30}$$

For unsteady 2-DH or practical 1D problems no more than the first-order solution can be applied in practice (Wang, 1989, 1992): $c = c_0 + c_1$. Furthermore we neglect horizontal diffusion and assume similarity of concentration and velocity in all horizontal directions (no helical flow). Then the resulting Galappatti equation in terms of an dimensionless adaptation time and length can be expressed as derived by Sloff (1994a):

$$C_{se} - C_s = T_a' \frac{h}{w_s}\frac{\partial C_s}{\partial t} + L_a' \frac{u\,h}{w_s}\frac{\partial C_s}{\partial x} + L_a' \frac{v\,h}{w_s}\frac{\partial C_s}{\partial y} \tag{E.31}$$

where (for a gradient type bed boundary condition):

$L_a' = \dfrac{\gamma_2+\alpha_0}{\gamma_0} - \dfrac{\alpha_2}{\alpha_0}$ = dimensionless adaptation length

$T_a' = \dfrac{\gamma_1+1}{\gamma_0} - \dfrac{\alpha_1}{\alpha_0}$ = dimensionless adaptation time

The coefficients in these adaptation scales are defined as:

$$\gamma_j = \psi_{s,j}(0); \quad \alpha_j = \int_{\hat{\eta}_a}^{1} \psi_u(\hat{\eta})\psi_c(\hat{\eta})\,\mathrm{d}\hat{\eta}$$

$$\psi_{c,1}(\hat{\eta}) = \mathrm{D}^{-1}\left[\psi_c(\hat{\eta})\right] \;;\; \psi_{c,2}(\hat{\eta}) = \mathrm{D}^{-1}\left[\psi_u(\hat{\eta})\psi_c(\hat{\eta})\right]$$

Since $\psi_c(\hat{\eta})$ represents the equilibrium concentration profile, and $\psi_u(\hat{\eta})$ the velocity profile, the use of Galappatti's model is only possible if mathematical relations (shape functions) can be defined for these profiles. For complicated flow and sediment profiles, as can be found in natural flows, the solution to the inverse operator requires numerical integration of shape functions. In Galappatti (1983) polynomial regression coefficients for regular flows have been determined from such numerical computations for a large number of possible shape functions under various conditions.

Galappatti has derived semi-empirical relations for these shape functions for open channel flows, in which he showed that by using simple profile functions, the adaptation time depends on the ratio w_s/u_*, the boundary level $\hat{\eta} = \hat{\eta}_a$, and the roughness scale R_c (or Chézy value).

To justify the use of Galappatti's model certain rules have to be obeyed. The validity of the model was studied by Wang and Ribberink (1986) who showed that it can only be applied for gradually varied flow (i.e., time scale of flow $T \gg h/u_*$; length scale $L \gg uh/u_*$). It can further be shown that w_s/u_* should be small (e.g., less than 0.4) for accuracy of the first-order solution. Quantitatively these conclusions were verified by Wang (1989, 1992). He showed mathematically that the first-order asymptotic solution will be accurate enough to replace an exact model if a certain convergence radius R_α is not exceeded. Basically, through the sediment-diffusion coefficient, this radius depends on w_s/u_* (higher convergence at lower w_s/u_*). Consequently it restricts the validity of the model to situations in which the shape of the concentration profile does not deviate too much from the shape of the equilibrium concentration profile (hence it only improves the equilibrium transport model).

In many cases the first-order solution still appeared to give good predictions outside the convergence domain as well (Wang, 1989). Wang showed additionally with a simple morphological model that exactness of the results strongly depends on the normalized wave number $k \cdot q/w_s$ ($k=\pi/L$) and a relative frequency $(h/w_s)(2\pi/T)$. The model performs well if these numbers do not significantly exceed the convergence radius R_α. For the longest waves (smallest k) the agreement is best, while for the shortest admissible waves with length $2 \cdot \Delta x$ ($k = \pi/\Delta x$, Δx = numerical space step) the agreement is poor dependent on whether they fall within the convergence radius. On the other hand the shortest waves are physically not relevant and will be damped out quickly.

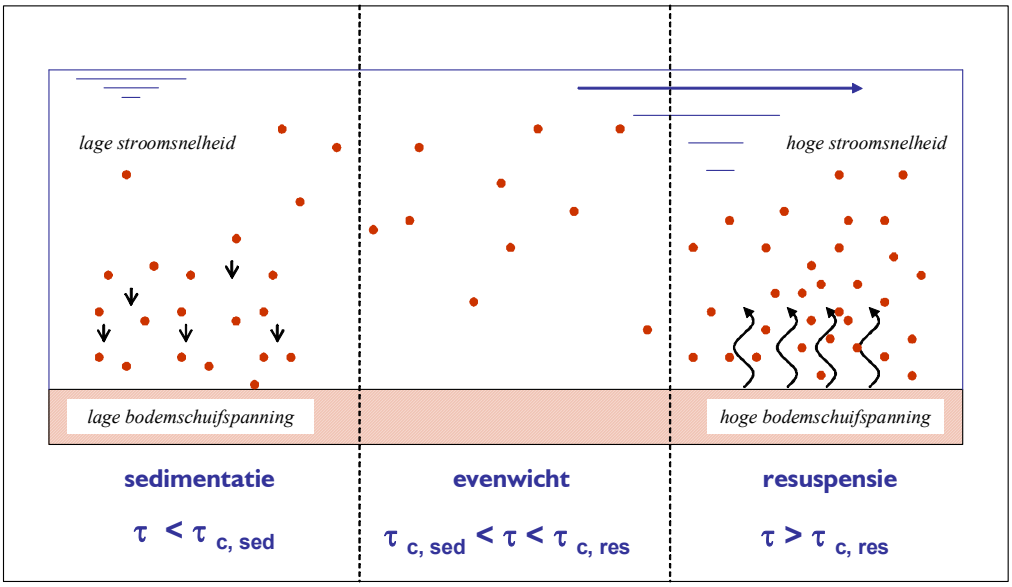
E.5.3 Transport of clay (Inorganic Matter processes)

In DelWAQ kan het zwevende transport van slib berekend worden met de formuleringen van Krone en Partheniades (Partheniades, 1962 and Krone, 1962). Dit is de bestaande functionaliteit in DelWAQ, welke geen verdere aanpassing behoeft. In dit proces vervult de bodemschuifspanning van de stroming een sleutelrol.

Naarmate stroomsnelheden en golven hoger zijn, zijn ook de schuifspanningen hoger. Bij een hoge schuifspanning worden sedimentdeeltjes losgewerkt uit de sliblaag op de bodem. De deeltjes gaan in suspensie in het water en worden vervolgens met de stroming naar elders meegevoerd. In zones met een lage bodemschuifspanning worden deze deeltjes vervolgens weer afgezet. Het zwevend-stofmodel van Krone en Partheniades maakt een onderscheid in drie toestanden waarin water en sediment zich kunnen bevinden:

- *Netto bezinking* als de bodemschuifspanning lager is dan de kritieke schuifspanning voor sedimentatie.
- *Netto resuspensie* als de bodemschuifspanning hoger is dan de kritieke schuifspanning voor resuspensie.
- *Evenwicht tussen bezinking en resuspensie* als de bodemschuifspanning zich tussen de kritieke schuifspanning voor sedimentatie en de kritieke schuifspanning voor resuspensie bevindt.

Dit is geïllustreerd in Figuur E.6. Uitgebreidere procesbeschrijvingen zijn te vinden in de Technical Reference Manual van DelWAQ.



Figuur E.6 Sedimentatie en resuspensie als functie van de bodemschuifspanning.

De volgende tekst bevat een mer gedetailleerde beschrijving van de implementatie van de processen in DelWAQ.

The (inorganic) substances that can be modelled in the original DelWAQ in relation to particulate matter are:

Name	Description	Unit
IM1	suspended inorganic matter fraction 1	g/m^3
IM2	suspended inorganic matter fraction 2	g/m^3
IM3	suspended inorganic matter fraction 3	g/m^3
IM1S1	inorganic matter fraction 1 in bed layer 1	g
IM2S1	inorganic matter fraction 2 in bed layer 1	g
IM3S1	inorganic matter fraction 3 in bed layer 1	g
IM1S2	inorganic matter fraction 1 in bed layer 2	g
IM2S2	inorganic matter fraction 2 in bed layer 2	g
IM3S2	inorganic matter fraction 3 in bed layer 2	g
Zsand	Thickness of sand layer	mm

The 1D advection-diffusion process of suspended-sediment is modelled using the depth-average mass-balance equation for sediment concentration:

$$\frac{\partial hc_w}{\partial t} + \frac{\partial huc_w}{\partial x} = \left[w_s c_w + \varepsilon_s \frac{\partial c_w}{\partial z} \right]_{bed} \tag{E.32}$$

In which c_w is concentration of suspended matter in the water column. The right-hand term in this equation represents the net diffusive and convective flux of sediment at the lower (bed) boundary of the suspension layer. It represents entrainment and deposition, or settling and resuspension fluxes. Furthermore, remaining dispersion terms have been neglected in this equation.

Following the equation above the mass balances for particulate (suspended) matter in the water column (c_w) and particulate matter in the sediment (c_b) can be written following equations (E.33) and (E.34) respectively.

$$\frac{\Delta c_w}{\Delta t} = loads + transport - settling + resuspension \tag{E.33}$$

$$\frac{\Delta c_b}{\Delta t} = loads + settling - resuspension - burial + digging \tag{E.34}$$

The following overview (from the DelWAQ manual) presents the available processes and substances for calculating transport of inorganic matter. Within the morphology module, the processes of digging and burial are dealt with in the administration/bookkeeping of underlayers, so that only the transport layer has to be considered in these processes. The original functionalities for settling and resuspension are therefore adapted.

Process	Substances	Comments
Settling/ sedimentation	IM1 IM2 IM3 (all particulates)	• Settling is proportional to a first order settling velocity (in m/d). • Settling occurs when the actual shear stress is lower than the user-defined critical shear stress for sedimentation. • The actual shear stress is a function of flow velocity and waves. Artificial disturbances such as ships can be added as well. • Each particulate fraction has its own critical shear stress for sedimentation.
Resuspension	IM1S1/IM1S2 IM2S1/IM2S2 IM3S1/IM3S2 (all particulates)	• Resuspension takes places with a zero-order rate (in g/m2/d) and is proportional to a probability function. • Resuspension takes place when the actual shear stress is higher than the critical shear stress for resuspension. • The sediment layers S1 and S2 each have a critical shear stress for resuspension. The critical shear stress for resuspension is valid for all particulate fractions in the sediment layer. • The resuspension rate of the individual particulate fractions in the sediment layer is proportional to its weight fraction.
Burial	IM1S1/IM1S2 IM2S1/IM2S2 IM3S1/IM3S2 (all particulates)	• Burial is the downward movement of particulates in the sediment. Sediment layers can have either a fixed or a variable layer thickness. • When considered independent of the thickness of a sediment layer, burial can consist of a zero-order and a first-order term. • When the prescribed layer thickness is exceeded, exceedance burial can take place. • Combined burial takes places for all particulate fraction. • The burial rate of the individual particulate fractions in the sediment layer is proportional to its weight fraction.
Digging	IM1S1/IM1S2 IM2S1/IM2S2 IM3S1/IM3S2 (all particulates)	• Digging is the upward movement of particulates in the sediment. Sediment layers can have either a fixed or a variable layer thickness. • When considered independent of the thickness of a sediment layer, digging can consist of a zero-order and a first-order term. • When the prescribed layer thickness is not met, replenishment digging can take place. • Combined digging takes places for all particulate fraction. • The digging rate of the individual particulate fractions in the sediment layer is proportional to its weight fraction.

Sedimentation

A characteristic feature of fine sediments is the ability to form aggregates of flocs that settle to the bottom. Whether a particle will settle to the bottom depends upon its size and density and the chemical conditions of the surrounding water system. Sedimentation is the process describing the settling of particles. This deposition process is described with the formulation by Krone (1962). Various laboratory and field measurements show that the suspended matter concentration strongly influences the aggregation process and thereby the settling velocities of the aggregates. Strong flocs are denser and have larger settling velocities. The aggregation of flocs strongly depends on the chemical and physical properties of the sediment, salinity and turbulence. At high sediment concentrations (several g/l) the particles hinder each other, resulting in a decrease of the settling velocity. Turbulence is an important parameter because it affects the flocculation and therefore the settling velocity in two opposing ways. On the one hand an increase in turbulence will increase the collisions between particles, resulting in larger flocs with high settling velocities. On the other hand, it results in turbulent shear stresses which can break up the flocs and decrease the settling velocity. At low suspended concentrations however, flocculation processes are so low, that the floc size, hence settling velocity does not vary over the depth. So the floc formation and floc break-up processes will only play a role in the sedimentation process at high-concentrated conditions (Winterwerp, 2002).

The rate of downward mass transport (deposition) is equal to the product of the near-bed velocity, the concentration and the probability that a settling particle becomes attached to the bed. The deposition (i.e. sedimentation flux) (Krone, 1962) is given by:

$$D = w_s \cdot c \cdot \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right) \tag{E.35}$$

with:

D	=	deposition flux of suspended matter	($g.m^{-2}.d^{-1}$)
w_s	=	settling velocity of suspended matter	($m.d^{-1}$)
c	=	concentration of suspended matter near the bed	($g.m^{-3}$)
τ_b	=	bottom shear stress (following from a separate process)	(Pa)
τ_d	=	critical shear stress for deposition	(Pa)

Note that bed-shear stress follows from a separate process which computes:

$$\tau_b = \frac{\rho \cdot g}{C_{flow}^2} \cdot \overline{u}^2 \quad \text{or} \quad \rho \cdot u_*^2 \tag{E.36}$$

Sedimentation always results in an increase of sediment in the upper sediment bed layer. In the implemented sedimentation process it is assumed that there is no correlation between the various sediment components which means that each of the particulate fractions can settle independently.

Erosion

Erosion of bed material occurs when the bed shear forces exceed the resistance of the bed sediment. The resistance of the bed is characterised by a certain critical erosive strength (bottom shear stress). This critical stress is determined by several factors, such as, the chemical composition of the bed material, particle size distribution and bioturbation. Erosion of sediment is induced by the bed stress due to tidal and wind-induced advective flows and surface waves. The erosion is directly proportional to the excess of the applied shear stress over the critical erosive bottom shear stress. The formula for erosion of homogeneous beds is based on Partheniades (1962). The erosion flux is limited by the available amount of sediment on the sea bed.

The erosion of bed material is given by:

$$E = p_{m,b} M \left[\frac{\tau_b}{\tau_{e,c}} - 1 \right] \qquad \text{(E.37)}$$

with:

E	=	erosion rate	($g.m^{-2}.d^{-1}$)
M	=	first order erosion rate or erosion parameter (defined by user)	($g.m^{-2}.d^{-1}$)
$P_{m,b}$	=	fraction of sediment available on the bed	(-)
τ_b	=	bed shear stress (following from a separate process)	(Pa)
τ_e	=	critical shear stress for erosion	(Pa)

The values of M and τ strongly dependent on the sediment properties and environmental parameters. The amount of eroded dry matter is added to the mass in the water column. Resuspension takes place from the upper sediment layer, the transport layer.

Sand-mud modelling

In a multi-fraction approach the presence of sand affects the resuspension of clay from the bed layer. To account for the interaction between sand and mud, studies are carried out to develop a process-based transport model. In this context relevant studies are carried out and ongoing on Delft university (e.g., studies of Van Ledden and Jacobs), and in relation with model studies for the Scheldt Estuary and the Nieuwe Maasvlakte. The interaction between sand and mud highly depends on clay content. When the clay content (i.e. grain sizes smaller than 2 μm) in the bed is less than 5 – 10 % the bed behaves more or less non-cohesive (Raudkivi, 1990). Also permeability is an important parameter in the erosion and transport process of sand-mud mixtures.

The present modelling approach implemented in DelWAQ morphology is that of Van Ledden (2003). It is implemented following an extension of the Partheniades-Krone approach for application to both the sand- and mud-fractions, accounting for their mutual interactions during erosion. The adaptations involve a revision of the erosion function (E.37) :

When the mud content $p_{m,b}$ is higher than the critical mud content p_{cr}, the erosion fluxes for both sand (E_s) and mud (E_m) are given by:

$$E_m = p_{m,b} M \left[\frac{\tau_b}{\tau_{e,c}} - 1 \right] \qquad E_m \geq 0 \tag{E.38}$$

$$E_s = \left(1 - p_{m,b}\right) M \left[\frac{\tau_b}{\tau_{e,c}} - 1 \right] \qquad E_s \geq 0$$

with:

E_m, E_s	=	erosion rate mud, sand	($g.m^{-2}.d^{-1}$)
M	=	first order erosion rate or erosion parameter (defined by user)	($g.m^{-2}.d^{-1}$)
$p_{m,b}$	=	mud content in bed layer	(-)
τ_b	=	bed shear stress (following from a separate process)	(N/m^2)
$\tau_{e,c}$	=	critical shear stress for erosion in cohesive regions	(N/m^2)

When the mud content $p_{m,b}$ is lower than the critical mud content p_{cr}, the erosion flux for mud is calculated as follows:

$$E_m = p_{m,b} M \left[\frac{\tau_b}{\tau_{e,nc}} - 1 \right] \qquad E_m \geq 0 \tag{E.39}$$

With:

$\tau_{e,nc}$	=	critical shear stress for erosion in non-cohesive sand-mud mixtures	(N/m^2)

In this formulation $\tau_{e,nc}$ is calculated as

$$\frac{\tau_{e,nc}}{\tau_{cr}} = \left(1 + p_{m,b}\right)^{\beta} \qquad p_{m,b} < p_{m,cr} \tag{E.40}$$

With:

β	=	empirical coefficient ($0.75 < \beta < 1.2$)	(-)
τ_{cr}	=	critical shear stress for sand only	(N/m^2)

Furthermore, this adaptation of the critical shear stress should also be applied to the transport formula. However, Van Rijn's equations (Van Rijn 2007a,b,c) already include the effect of clay.

The downward flux for mud is calculated as follows (equal to Krone-Partheniades equation (E.35)):

$$D_m = w_m c_m \left[1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right] \qquad D_m \geq 0 \tag{E.41}$$

With:

τ_d	=	critical shear stress for mud deposition	(N/m^2)
c_m	=	mud concentration	(-)
w_m	=	settling velocity for mud	(m/s)

E.5.4 Numerical solution of advection-diffusion processes

To proceed one step in time (t+Δt), DelWAQ solves the convection-diffusion equation for each computational cell and for each state variable. Eq. (E.42) is a simplified representation of the advection-diffusion-reaction equation.

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr} + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{P} + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{S} \qquad \text{(E.42)}$$

The mass balance has the following components:

- the mass at the beginning of a time step: M_i^t
- the mass at the end of a time step: $M_i^{t+\Delta t}$
- changes by transport: $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr}$
- changes by physical, (bio)chemical or biological processes: $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{P}$
- changes by sources (e.g. waste loads, river discharges): $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{S}$

It should be noticed that the basic principles of DelWAQ are the same whether you have one state variable and only two computational cells, or you have several tens of state variables and thousands of computational cells. The only differences is the number of times that DelWAQ has to solve Eq. (E.42).

Changes by transport include both advective and dispersive transport, that is the transport by flowing water and the transport as a result of concentration differences respectively. The flow of water is usually derived from the hydrodynamic model (Flow module of SOBEK). Dispersion in the vertical direction which is important if the water column is stratified, is derived from the hydrodynamic module as well (is implemented in SOBEK-River in 2006/2007). Dispersion in the horizontal direction is user input. Dispersion, as defined here, differs from the physical concept of molecular diffusion as it stands for all transport that is not described by the advective transport (there is sub grid-scale transport of water that is not resolved by SOBEK flow module).

Changes by processes include physical processes such as reaeration and settling, (bio)chemical processes such as adsorption and denitrification and biological processes such as primary production and predation on phytoplankton. Water quality processes convert one substance to another (such as the aforementioned nitrification example).

A special type of processes deals with settling in a 3-dimensional situation, as these processes transport particulate matter from one computational cell to the one below.

Changes by sources include the addition of mass by waste loads and the extraction of mass by intakes. Mass entering over the model boundaries can be considered a source as well. The water flowing into or flowing out of the modelled area over the model boundaries is derived from the hydrodynamic model.

The advection-diffusion equation is solved on a numerical grid. The definition of relevant components of this grid are listed in the table below.

Component		Description
Segment		Computational element of the water quality schematisation of the study area.
Segment related and exchange related information		*Process input* and *process output* is divided into segment related and exchange related information. Segment related information is known for each *segment* of the schematisation (e.g. parameters). Exchange related information is known for each *exchange area* of the schematisation (e.g. additional velocities).
Exchange area		The contact area of two linked computational elements (or *segments*).
Exchange		The Delft3D-WAQ model considers computational elements (or *segments*) as volumes that are linked to each other. The links or exchanges are defined by the segment number on both sides of the contact area.

Each computational cell has a unique number ranging from 1 to N, where N is the total number of computational cells. Also, each surface area that is shared with another computational cell, is identified by a unique number, ranging from 1 to M, where M is the total number of shared surface areas. Over this shared surface area mass can be exchanged between computational cells. Therefore, the shared surface areas are referred to as exchanges as well. DelWAQ defines an exchange by the numbers of the two computational cells that share the surface area.

The advective transport across an exchange can be given as:

$$T_{x_o}{}^{A} = v_{x_o} \times A \times C_{x_o} \tag{E.43}$$

with:

$T_{x_o}{}^{A}$	=	advective transport at $x = x_o$	(g/s)
v_{x_o}	=	velocity at $x = x_o$	(m/s)
A	=	surface area at $x = x_0$	(m^2)
C_{x_o}	=	concentration at $x = x_o$	(g/m^3)

We assume that velocities and concentrations are an average representative value for the whole surface. The smaller the cross section, the better this assumption.

The dispersive transport across an exchange is assumed to be proportional to the concentration gradient and to the surface area:

$$T_{x_0}^D = - D_{x_0} \times A \times \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=x_0} \tag{E.44}$$

with:

$T_{x_0}^D$	=	dispersive transport at x = x_o	(g/s)
D_{x_0}	=	dispersion coefficient at x = x_o	(m^2/s)
A	=	surface area at x = x_0	(m^2)
$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right\|_{x=x_0}$	=	concentration gradient at x = x_o	(g/m^4)

Dispersion is done according to Fick's diffusion law. The proportionality constant 'D' is called the dispersion (or diffusion) coefficient. The minus sign originates from the fact that dispersion causes net transport from higher to lower concentrations, so in the opposite direction of the concentration gradient. The concentration gradient is the difference of concentrations per unit length, over a very small distance across the cross section:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_x = \lim_{\Delta x \downarrow 0} \frac{C_{x+0.5\Delta x} - C_{x-0.5\Delta x}}{\Delta x} \tag{E.45}$$

A numerical expression for this term will be given later on. Dispersion coefficients should be calibrated or be obtained from calculations with turbulence models.

If the advective and dispersive terms are added and the terms at a second surface are included, the one dimensional equation results:

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \times \left(v_{x_0} C_{x_0} - v_{x_0+\Delta x} C_{x_0+\Delta x} - D_{x_0} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x_0} + D_{x_0+\Delta x} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x_0+\Delta x} \right) \times A \tag{E.46}$$

with:

M_i^t	=	mass in volume i at time t	(g)
Δt	=	time step	(s)
$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right\|_{x_o}$	=	concentration gradient at x = x_0	(g/m)
A	=	surface area	(m^2)
v_{x_o}	=	velocity at x = x_0	(m/s)
C_{x_o}	=	concentration at x = x_0	(g/m^3)

Instead of this equation, DelWAQ uses the following *equivalent* equation:

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \times \left(Q_{x_0} C_{x_0} - Q_{x_0+\Delta x} C_{x_0+\Delta x} - D_{x_0} A_{x_0} \left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x_0} + D_{x_0+\Delta x} A_{x_0+\Delta x} \left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x_0+\Delta x} \right) \tag{E.47}$$

with:

M_i^t	=	mass in volume i at time t	(g)
Δt	=	time step	(s)
$\left.\frac{\partial C}{\partial x}\right\|_{x_o}$	=	concentration gradient at x = x_0	(g/m)
A_{x_0}	=	surface area at x = x_0	(m^2)
Q_{x_o}	=	flow at x = x_0	(m^3/s)
C_{x_o}	=	concentration at x = x_0	(g/m^3)

If the previous equation is divided by the volume V (= $\Delta x\, \Delta y\, \Delta z$), and the time span Δt, then the following equation results in one dimension (Hereto it is required that all segments have an equal volume).

$$\frac{C_i^{t+\Delta t} - C_i^t}{\Delta t} = \frac{D_{x_{o+\Delta x}} \left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x_o+\Delta x} - D_{x_o} \left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x_o}}{\Delta x} + \frac{v_{x_o} C_{x_o} - v_{x_{o+\Delta x}} C_{x_{o+\Delta x}}}{\Delta x} \tag{E.48}$$

Taking the asymptotic limit $\Delta t \to 0$ and $\Delta x \to 0$, the advection-diffusion equation for one dimension results:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x}(vC) \tag{E.49}$$

Thus, the finite volume method for transport is a computational method to solve the advection-diffusion equation. The accuracy of the method will be related to the size of Δx, A (= $\Delta y \times \Delta z$) and Δt.

By adding terms for transport in the y and z-direction a 3-dimensional model is obtained. Taking the asymptotic limit again, will lead to a 3-dimensional advection-diffusion equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} \tag{E.50}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} + S + f_R(C,t)$$

with dispersion coefficients taken for every direction. If functions 'S' and 'f' are added as shown in the equation above, the so-called advection-diffusion-reaction equation emerges. The additional terms are so-called source terms. They stand for:

1. Discharges or 'waste loads' (S): these source terms are additional inflows of water or mass that were not present in Sobek-FLOW as velocity terms in the impulse equations. They may be present in Sobek-FLOW's continuity equation, but this is not strictly required. As many source terms as required may be added by you. They are usually used for small rivers, discharges of industries, sewage treatment plants, small waste load outfalls, etc.
2. Reaction terms or 'processes' (f_R).

Processes can be split into physical processes and other processes. Examples of physical processes are:

- settling of suspended particulate matter;
- water movement not affecting substances, like evaporation;
- volatilization of the substance itself at the water surface.

Only processes that can be written in the form of a partial differential equation are considered

$$\left(\frac{\partial \overline{C_1}}{\partial t}\right)_R = f_R\left(\overline{C_1}, \overline{C_2}, .., .., \overline{C_N}, t\right) \tag{E.51}$$

with:

$\overline{C}_i$ = concentration at a given location for substance 'i' (here for N substances)
f_R = any functional prescription
t = time

The function describes a relation between the concentration variation at a certain location (x, y, z) and all other concentrations at exactly the same location at that time. Although this is a very general formulation, some types of processes do not fit. Among them is, as most important, the equilibrium kinetics of chemistry. Only relatively slow chemical processes can be described with this equation.

Numerical solution of the advection-diffusion-reaction equation with DelWAQ involves the use of discrete segments in space with finite mesh sizes and with a finite the time-step Δt. Several of these numerical discretisations are available in DelWAQ. For the space discretisation central discretisations or (first or higher order) upwind discretisations may be applied. For the time integration you may choose between explicit, semi-implicit or implicit methods. Having the numerical discretisation different strategies can be followed to solve the discretised systems of equations. These strategies are known as 'solution methods', and can be divided in iterative solvers or direct solver.

The following schemes are available in DelWAQ:

- Schemes 1 to 5:
  - Explicit (require a stability criterion!)
  - scheme 1 is most robust
  - scheme 5 is most accurate (2^{nd} order scheme)
  - schemes 2 to 4 should only be used in special cases

- Scheme 10:
  - As scheme 1 but implicit
  - Uses a direct inversion of the matrix to find the solution at t+Δt
- Schemes 11 to 14:
  - Separate solution of horizontal and vertical transport
  - Horizontal transport explicit either according to scheme 1 or scheme 5 (stability criterion!)
  - Vertical transport implicit
  - Central or Upwind discretisation in the vertical
  - Upwind schemes may cause numerical mixing which is undesirable when a significant vertical gradient exists
  - Scheme 12 (in horizontal as scheme 5 (thus most accurate), in vertical central) is preferred
- Schemes 15 and 16:
  - Implicit (both in the vertical and in the horizontal)
  - Iterative solvers of the matrix (may be time efficient)
  - Upwind (scheme 15) and Central (scheme 16) in the vertical
  - Numerical mixing of steep gradients occurs
- Schemes 19 and 20:
  - Schemes are also used in Delft3D-FLOW
  - ADI (Alternating Direction Implicit) used
  - Aggregation of the hydrodynamic database is not allowed
  - Remove inactive cells is also not allowed

For a description of the schemes we refer to the User Manual of DelWAQ.

E.5.5 Bed-material fluxes (numerical implementation)

Numerical implementation of bed-material fluxes is treated in section G.3.

E.6 Bed layers

E.6.1 General

The available DelWAQ implementation follows a two-layer approach distinguishing the following layers:

1. The S1 layer which is the upper sediment layer, and acts as the active layer or mixing layer;
2. The S2 layer which is the deeper sediment layer, or substratum

In the morphology module, this approach is extended to allow a more extensive description of the bed. The deeper sediment can be described by an unlimited number of so-called underlayers. An administration (bookkeeping system) for the underlayers is available in Delft3D, and has been adjusted and incorporated as a separate element in the DelWAQ model.

Currently implements two bed composition models are available:

- A uniformly mixed bed (one sediment layer). There is no bookkeeping of the order in which sediments are deposited and all sediments are available for erosion.
- A layered bed stratigraphy (multiple sediment layers).

A user-defined number of bed composition bookkeeping layers may be included to keep track of sediment deposits. When sediments are deposited, they are initially added to the top-most layer. After mixing in the top layer, sediments are pushed towards the bookkeeping layers beneath it (burial). The bookkeeping layers are filled up to a user-defined maximum thickness, if this threshold is exceeded a new layer is created. If the creation of a new layer would exceed the maximum number of layers specified by you, layers at the bottom of the stratigraphy stack will be merged. Only sediments in the top-most layer are available for erosion. After erosion, the top-most layer is replenished from below (digging).

A special feature of this graded-sediment functionality is the exchange-layer of Ribberink (1987). It is used for stability of the layer concept. However, it has been found that the implemented version only applies for bimodal sediment (i.e. 2 size fractions). Nevertheless, it is for future developments necessary to implement this exchange layer. In R&D project Q2934 the exchange layer implementation is used to extend towards the model concept of Astrid Blom of University of Twente.

E.6.2 Active layer / mixing layer and exchange layer

Following Ribberink (1987) the thickness of transport- and exchange layers can be assumed directly proportional to the local (average) dune height. Although alternative (more sophisticated) approaches exist for 1-D models (e.g., see Laguzzi, 1994) the idea of Ribberink is pursued here, resulting in the following relations (as far as the transport-layer thickness is not taken constant):

$$\delta_{eff} = \varepsilon_{eff} H \;;\; \text{minimum } \delta_{eff} = \delta_{eff,min} \qquad \text{(E.52)}$$
$$\delta_{ex} = \varepsilon_{ex} H \;;\; \text{minimum } \delta_{ex} = \delta_{ex,min}$$

in which H is the average dune height expressed by equation (E.53). For 1-D models Ribberink proposes for the calibration factors ε_{eff} and ε_{ex} a value of 0.5 (which is set as default in SOBEK). Minimum values are needed for robustness of the numerical computation. The minimum value is set in SOBEK by using the keyword Redfacmil (GSPAR), such that a minimum layer thickness of 'refac·D_m' is used by the model.

A further elaboration of these relations can be undertaken if the dune height H is replaced by a dune-height predictor. For the dune-height prediction in SOBEK-Graded only the method of Gill (1971) is presently implemented, which is sufficient for practical applications. The method of Gill relates the dune height directly to the hydraulic and sedimentological conditions:

$$H = \frac{d}{2n\beta_1}\left(1 - \beta_2 \frac{\tau_c^*}{\tau^*}\right)\left(1 - Fr^2\right) \qquad \text{(E.53)}$$

where

$\tau^* = \frac{u^2}{C^2 \Delta D_m}$ = Shields non-dimens. total bed shear stress [-]

$\tau_c^* = 0.013\, D_{gr}^{0.29}$ = critical Shields non-dimens. total bed shear stress [-]

$D_{gr} = D_m \left(\frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{1/3}$ = non-dimensional grain parameter [-]

Fr = Froude number [-]

n = Exponent of the sediment transport formula written in the following way: $s = k(\tau^*/\tau_c^* - 1)^n$, being n=3/2 for Meyer-Peter and Müller.

ν = kinematic fluid viscosity [m^2/s]

β_1 = calibration coefficient which is order 0.5 for dunes of triangular shape.

β_2 = calibration coefficient which is equal to 1 in default situations.

The material flux between transport layer and exchange layer is defined by Ribberink (1987) as

$$\phi_i = \gamma \frac{s}{L}\left(p_{ex,i} - p_{di} \right) \tag{E.54}$$

where

L = dune length determined by means of a predictor

p_{di} = average probability of size fraction i in the deposition material (from the transport layer to the exchange layer), which has a coarser composition than the average mixture in the transport layer (p_i), i.e., $p_{di} = f_{pdi} \cdot p_i$

s = total average bed-transport rate (sum of all sizes) per unit of width (in the averaged direction of bed-load transport)

γ = calibration coefficient

$\phi_i(x,y,t)$ = sediment exchange flux between transport layer and exchange layer

Ribberink proposed γ=0.08 and f_{pdi}=0.8 for a first approach. The dune length in this formulation can also be linearly related to the water depth in the following way:

$$L = \beta_L d \tag{E.55}$$

A values of 5.5 is used for the calibration factor β_L when the dune-length option of Yalin (1964) is used, whereas as value of 7.3 is used for the calibration factor β_L when the dune-length option of Ribberink (1982) is used. Alternatively a fixed dune-length can be specified by the user.

E.7 List of variables

The following table presents the list of variables applied in the morphology module:

Variable	Unit	Description
aHidExpEAM	-	alpha for hiding & exposure (Egiazaroff, Ashida & Michiue)
alpha	-	Weighting factor for numerical scheme (SwUpw = 3 or 4)
calfac_i	-	Calibration factor for transport capacity of fraction i
control_i	-	Control value
corrDVol_i	m3/dt	
Dbodsd_i	kg/m2/d	Change in mass of fraction i in the active layer
DeltaVol	m3/dt	Change in sediment volume in the active layer
densS_i	kg/m3	Density of sediment fraction i
DFrac_i	m	Diameter of fraction i
Dlow_i	m	Lower boundary of the diameter range of fraction i
DmSEDS	m	Mean diameter of the sediment in the active layer
dump_i	m3/dt	Dumped volume of sediment fracion i (incl. pores)
Dupp_i	m	Upper boundary of the diameter range of fraction i
DxxSEDS	m	Characteristic diameter Dxx of the sediment in the active layer (is calculated for xx = 10, 35, 50, 90)
dzDredge	m/d	Dredging depth
fRes_i	m3/dt	Resuspension flux of fraction i
fResTot	g/m2/d	Total resuspension of sediment
fSed_i	m3/dt	Sedimentation flux of fraction i
gHidExpEAM	-	gamma for hiding & exposure (Egiazaroff, Ashida & Michiue)
M1transME1	-	Factor M1 for the transport formula of Meyer-Peter and Mueller (version ME1)
M1transUD	-	Factor M1 for the user-defined transport formula
M2transME1	-	Factor M2 for the transport formula of Meyer-Peter and Mueller (version ME1)
M2transUD	-	Exponent M2 for the user-defined transport formula
M3transUD	-	Exponent M3 for the user-defined transport formula
MinDepth	m	Minimum water depth for sedimentation and resuspension
MorFac	-	Morphological factor
nfsplit	-	Net splitting factor
NonErFac	-	Factor for consideration of non-erodable layers
PackSEDS	-	Packing factor
PClay	-	Clay fraction
PFrac_i	-	Volume fraction i
PmFrac_i	-	Mass fraction i
pRes	-	Resuspension probability
pSed_i	-	Sedimentation probability for fraction i
SEDS_i	m3	Amount of sediment of fraction i in the active layer
SEDStot	g	Total amount of sediment in the active layer
SEDW_i	g/m3	Amount of sediment fraction i in the water
SegID	-	ID of a group of segments, used for input of layer information
Sp_i	m3/dt	transport gradient of fraction i
Taucr_i	N/m2	Critical shear stress for sedimentation of fraction i
TaucrRes	N/m2	Critical shear stress for resuspension of sediment
Vcenter_i	m/s	Velocity calculated for the use in the transport formula (according to the numerical scheme chosen by means of SwUpw)

The following switches have been defined:

Switch	Description
DrefHE	Reference diameter for hiding and exposure formulas: 0 – Dm 1 – D50
TypeHE	Hiding and exposure formula 0 – no hiding and exposure 1 – Egiazaroff, Ashida & Michiue
typeTrans	Transport formula 0 – Meyer-Peter and Mueller (version ME2) 1 – Meyer-Peter and Mueller (version ME1) 2 – Engelund and Hansen 3 – Van Rijn (2007) 4 – user-defined transport formula
SwUpw	Scheme for the calculation of the velocity in the segment centres (used for the calculation of transport capacities) 0 – velocities calculated in SOBEK at the velocity points 1 – take flow and cross section area at the exchanges from DelWAQ, calculate the velocities at the exchanges from them and upwind these in the direction of flow 2 – as with 1, but the cross section areas are calculated by deviding the volume of the considered segment by its length 3 – velocities as weighted average of the SOBEK-velocity in the considered segment and the one in the following segment in the direction of flow 4 – as with 3, but averaging the SOBEK-velocities of the considered and the previous segment
SwNonEr	Formula for calculating the factor to take into account the existence of non-erodible layers: 0 – d/da 1 – sin(Pi/2*d/da)

The input files are to be saved in the folder project.lit\INIVALUES

F Bed-level update in SOBEKSIM

F.1 Inleiding

In Sobeksim wordt de initiële waterbeweging uitgerekend, waarna de controle wordt overgegeven aan het DelWAQ-interface programma Wqinr die de voorbewerking doet voor DelWAQ met de afvoeren/snelheden via his-file verkregen van Sobeksim. Vervolgens wordt controle gegeven aan DelWAQ2 die aan de slag gaat met de van Wqinr verkregen gegevens. DelWAQ2 tenslotte schrijft de berekende toename van het volume (deltaVol) naar een bestand voor Sobeksim en geeft de controle over.

F.2 Implementatie

De implementatie is uitgevoerd op de volgende basisversies van de source-code:

- Parsen V2.04.*;
- Sobeksim V3.7.72;
- WQINR V2.1.2;
- DelWAQ2 V4.51.10.

De optie “online” bestaat reeds voor de koppeling van Sobeksim en DelWAQ, maar dan in één richting: van Sobeksim naar DelWAQ. Ten behoeve van de koppeling van Delft3D en DelWAQ is er al een DelWAQ versie ontwikkeld die voor alle tijdstappen via DelftIO resultaten wegschrijft ten behoeve van de waterbeweging in Delft3d (waq-r31-online-flow).

In Sobeksim is de subroutine Sosim vervangen door Sosimmor. Sosimmor is Sosim waarin is toegevoegd het lezen van de door DelWAQ berekende deltaVol‘s uit het bestand *datafromwaqtocf* (via DelftIO is het tot nu niet gelukt). In dit bestand staan steeds een waarde voor het aantal grootheden (=1) , een waarde voor het aantal segmenten en de deltaVol voor de segmenten. In Sobeksim wordt vervolgens de deltaVol per rekenpunt bepaald. De relatie tussen waterstandspunten en segmenten wordt bepaald uit de inhoud van de bestanden *ntrdlwq.poi* en *grid.tbl*. Daartoe wordt in de Parsen naast de rekenpunt_id ook de reachup_id en reachdwn_id naar *grid.tbl* geschreven. Tot op dit moment lukt het niet om in Sobeksim tijdens het online proces (initiëel) *ntrdlwq.poi* te openen in de case-directory. Nu wordt er in Wqinr (subroutine *getdimpoi*) ten behoeve van Sobeksim een kopie van het bestand naar cmtwork geschreven.

Eenmalig wordt een gridpunt/segment- relatietabel bepaald op basis van de positieve takrichting. Elke tijdstap wordt deze tabel per gridpunt zodanig aangepast dat de delta-A-waarden, berekend uit deltaVol en de reach-lengte, op basis van de stroomrichting (flwdir) worden toegekend aan het benedenstroomse rekenpunt. In Sobeksim zijn routines opgenomen die op basis van de delta-A per rekenpunt de dwarsprofielen op de rekenpunten aanpassen en nieuwe bob’s berekenen (overgenomen uit Sobek-RE). Uit deze routines is de speciale afhandeling van de randen op basis van de stroomrichting verwijderd, omdat dat door DelWAQ wordt verzorgd. Ten behoeve van deze routines wordt de sedimenttransportbreedte array *ws* op rekenpunten gevuld met de maximale flow-breedte van het (geïnterpoleerde) dwarsprofiel (*wft(igrid,maxlev)*).

Omdat in Sobeksim het bestand *wqint.ini* wordt gelezen (ten behoeve van het bepalen van de plaats van het bestand *ntrdlwq.poi*) terwijl hij open staat in programma Wqinr, is er een action='read' parameter toegevoegd aan beide open statements.

In Wqinr is het lezen van snelheden op u-punten uit het Sobek uitvoerbestand *reachseg.his*, het verwerken en het wegschrijven van die snelheden naar het DelWAQ-interfacebestand *segfun.dat* toegevoegd (aanpassingen in subroutines rdhisnam, fillparay, filsys, maplocats, rdhis, wqinr, wqaux, wqfile)

De online-versie van DelWAQ2 zou, behalve het selecteren van de grootheid, geen wijziging behoeven, ware het niet dat het schrijven via DelftIO niet werkt. Op dit moment wordt in subroutine *waq2flow* een ascii-bestand geschreven (*datafromwaqtocf)*.

F.3 Output

Tussenuitvoer wordt geschreven naar het bestand Sobek.log dat ook wordt opgeslagen in de case-directory.

Resultaten worden door DelWAQ opgeslagen in diverse delwaq his-bestanden en door Sobeksim in mormap.his. Dit laatste bestand wordt naar sub-directory work geschreven en wordt niet opgeslagen in de case-directory (moet nog worden opgenomen in de post-processing van het CMT).

Mormap.his wordt geschreven in subroutine plhimodio.f90 en bevat de volgende resultaten:
- Bed level
- Increase of X-sect. (toename oppervlakte t.o.v. t = 0, in m^2)
- Bed level increase (toename bodemhoogte t.o.v. t = 0, in m)
- X-section level 1
- X-section level 2
- X-section level ..
- X-section level *maxlev*

F.4 Aanpassingen in ini-, inp- en fnm-bestanden

De programma's Sobeksim, DelWAQ2 en Wqinr draaien parallel, hetgeen kan worden bewerkstelligd in Settings na aanpassingen in onderliggende: klik "River" en "Waq" aan en vervolgens de optie "Simultaan". Het plaatje geeft dan "Rural" aan, maar dat komt omdat nog geen plaatje met "River" voorhanden is.

In *sobeksim.ini* moet de regel "OnlineMO = -1" worden toegevoegd (case sensitive). Het aan- en uitzetten van het keyword moet nog worden geregeld door Settings.

In *sobeksim.fnm* moet de volgende regel worden toegevoegd:
"..\work\mormap.his , 112 ; mor-output, change of cs-levels"

In *WQ.inp* is in block #6 onder SEG_FUNCTIONS de regel
'Velo_mor'
toegevoegd.

In *Wqint.ini* is de regel
"Branch velocities=@reachseg.his "
toegevoegd.

F.5 Wijzigingen in Sobeksim

Ten behoeve van de morfologie koppeling zijn de volgende aanpassingen in Sobeksim noodzakelijk:

sobek.f90	variabele *domorf* wordt hard op true gezet omdat ten behoeve van de uitvoer sowres wordt aangeroepen en op een lager niveau uitvoerbestand mormap.his moet worden geïnialiseerd; in call sosim wordt subroutine sosim in file sosimmor.f90 aangeroepen
pluv.f90	! call onlineplott(xycoor, time): online plot switched off
sosdir.f90	toegevoegd; call in file sosimmor.f90; berekenen flowrichting (flwdir)
morpho.f90	array's flwdir en deltaa toegevoegd
sosimmor.f90	subroutine sosim in plaats van die in sosim.f90; communicatie met programma's WQINR en DelWAQ2; indien in sobeksim.ini keyword OnlineMO aanwezig is, wordt variabele *domorf* op true gezet, worden extra arrays gedimensioneerd en startadressen in de memorypool bepaald; als *OnlineWQ* en *domorf* true zijn: lezen van het uitwisselingsbestand *datafromwaqtocf* , het bepalen van de flow-richting (sosdir.f90), het op basis van de initiëel in subroutine segm2grid.f90 bepaalde relatietabel segnr(ngrid) converteren van de deltaVol per segment (parval(1,noseg) naar deltaa(ngrid) op rekenpunt (deltaaVol/reach-lengte); aanpassen van de dwarsprofielen (subroutine *moadcs*.f90 en onderliggende routines) en aanpassen van de bob's (subroutine *botupd*, zie file morph.f90).

F.6 Toegevoegde routines

De routines voor het aanpassen van de dwarsprofielen zijn overgenomen uit de Sobek-RE-source.

In file sosimmor.f90 worden de variabelen *isec* en *ibrtyp* hard op 1 gezet: de optie sedredge wordt uitgeschakeld. Verder wordt variabele *moropt* hard op 2 gezet, hetgeen tot gevolg heeft dat in onderstaande routines de erosie of sedimentatie proportioneel naar locale diepte over het dwarsprofiel plaats vindt. De variabele *roufcode* staat op 0 (geen ruwheidsaanpassing).

De speciale afhandeling van randen is uit de routines verwijderd. De eventuele erosie/sedimentatie van de bodem op de randen is verwerkt in de door DelWAQ berekende toename van het volume.

Zie voor een beschrijving van de oorspronkelijke routines paragraaf F.7.

F.7 Routines voor aanpassing dwarsprofielen

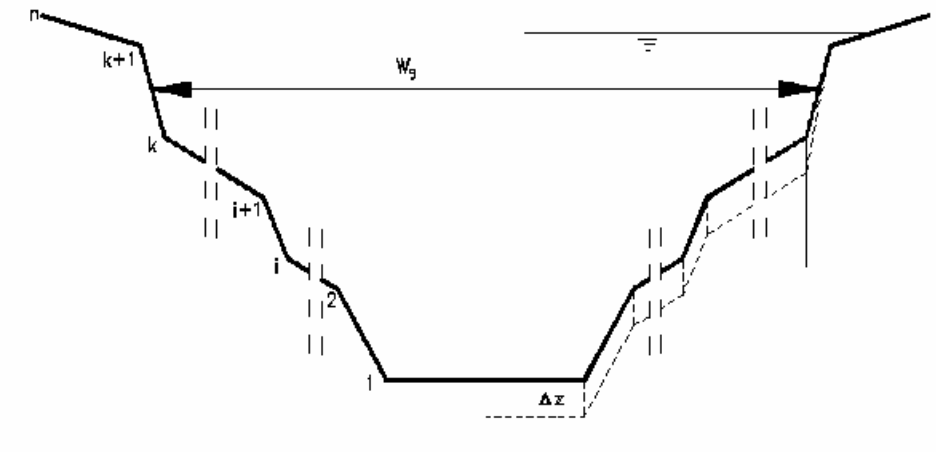
Zoals in voorgaande is beschreven wordt vanuit DelWAQ de volumeveranderingen per segment doorgegeven aan Sobeksim via de Wqinr.
De volgende tekst beschrijft op welke wijze deze volumeveranderingen vervolgens worden doorgegeven aan de dwarsprofielen in Sobeksim.

After transfer of these volumes, it is necessary to adjust the cross-sections, and recompute conveyance and BOBs. The subroutines for these calculations are originally part of the PARSER, as the calculation of cross-sections in hydrodynamic simulations is only required once at the initialisation. The subroutines from the Parser have been introduced in Sobek.

In SOBEK the schematised cross sections will change so that the number of levels by which it has been schematised remains unchanged for each cross section and that the width at each sub-sequential level will remain unchanged. Only the levels itself do change. Naturally, erosion leads to lower levels of the cross section and sedimentation leads to higher levels.
Three different ways of cross section erosion/sedimentation are available (user selection):

1. erosion and sedimentation is spread equally over the sediment transporting width of the cross section
2. erosion and sedimentation is distributed proportional to a local reference depth across the cross section

If the user selects to spread out the erosion and sedimentation equally over the transport width of the cross section, the procedure is as follows.



Figuur F.1 Cross section with n levels

In Figuur F.1 a cross section with *n* levels is given. For adaptation of the cross section the following procedure is followed.

1. Find the highest defined level of the cross section below or corresponding with the actual sediment transporting width (level number k)
2. The level k and all levels below this level are lowered or increased by Δz
3. The value of Δz is determined using the following formula to compute the change of the cross sectional area.

$$\Delta A_1 = -W_1 \Delta z \qquad \text{(F.1)}$$
$$\Delta A_i = -\left(W_i - W_{i-1}\right)\Delta z \quad \left[i = 2,3,...,k\right] \text{ (only if } k \geq 2\text{)}$$
$$\Delta A_{k+1} = \frac{-\left(W_{k+1} - W_k\right)}{2}\Delta z$$
$$\Delta A_t = \sum_{i=1}^{k+1} A_i$$

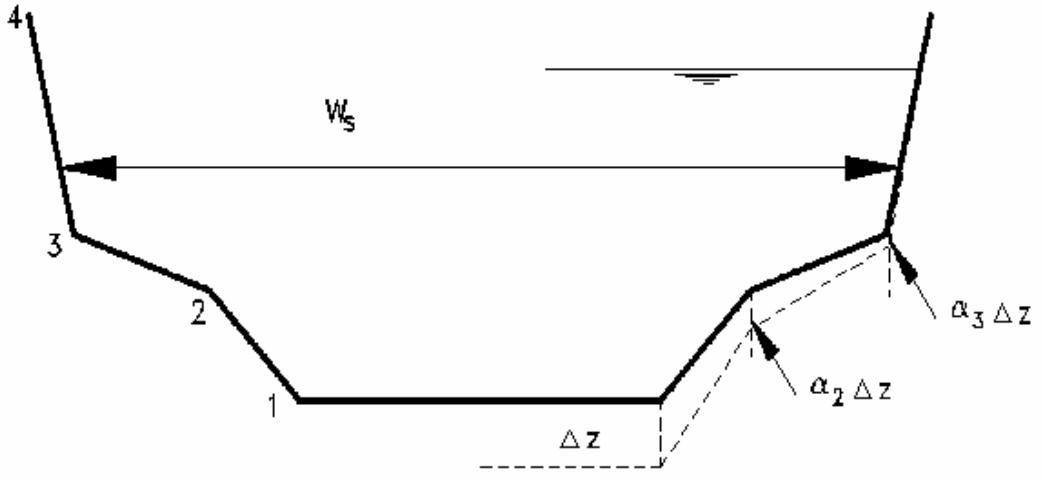
- Note:
  Positive value of ΔA corresponds with negative value of Δz (in other words: an increase of the cross sectional area corresponds with a lowering of the bed level). This leads to the following formula for Δz:

$$\Delta z = -\frac{2\Delta A_t}{\left(W_k + W_{k+1}\right)} \qquad \text{(F.2)}$$

Note:
If the transport width is equal to the flow width and the water level is equal or larger than the highest level in the table schematising the cross section, the level k+1 does not exist, so W_{k+1} is not defined. In that case $W_{k+1} = W_k$ will be used.

SOBEK verifies that all values of z_i remain in ascending order: it may occur that $\Delta z > (z_{k+1} - z_k)$. In that specific case the program terminates the computation giving a message that the aggradation exceeds the maximum allowable aggradation of the cross section.

If the user chooses to distribute the erosion and sedimentation proportional to a local reference depth in the cross section, the following procedure will be applied.



Figuur F.2 Cross section with four levels

In Figuur F.2 a cross section is given with four levels (as example: the procedure can be used for each cross section with $k \geq 2$).
The procedure to compute the adapted cross section is now:

1. Find the highest defined level of the cross section below or corresponding with the actual sediment transporting width (in this example: level number k=3)
2. Level k=3 and all levels below this level are lowered or increased by $\alpha_i \Delta z$
3. The value of a_i is computed as follows:

$$\alpha_1 = 1 \qquad \text{(F.3)}$$

$$\alpha_i = \frac{(z_s - z_i)}{(z_s - z_b)}; \quad [i = 2,3,...,k]$$

4. in which z_b is the lowest level defined in the current cross section and z_s is the level corresponding with the prescribed sediment transporting width.
5. The value of Δz is determined using the following formula to compute the change of the cross sectional area.

$$\Delta A_1 = -\alpha_1 W_1 \Delta z \qquad \text{(F.4)}$$

$$\Delta A_i = -(W_i - W_{i-1})\,\Delta z\,(\alpha_i + \alpha_{i+1}) \quad [i = 2,3,...,k] \quad (\text{only if } k \geq 2)$$

$$\Delta A_{k+1} = \frac{-(W_{k+1} - W_k)}{2}\,\Delta z \alpha_k$$

$$\Delta A_t = \sum_{i=1}^{k+1} A_i$$

6. this leads to the following formula for Δz:

$$\Delta z = -\frac{2\Delta A_t}{\left(W_1 + \sum_{i=1}^{k} \alpha_i W_{i+1} - \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_{i+1} W_i\right)} \qquad \text{(F.5)}$$

7. sobek verifies that all values of z_i remain in ascending order: it may occur that $\alpha_k \Delta z > (z_{k+1} - z_k)$. In that specific case the program terminates the computation while giving a message that the aggradation exceeds the maximum allowable aggradation of the cross section.

<u>In de hiernavolgende tekst is beschreven welke routines zijn gebruikt voor het aanpassen van de dwarsprofielen (overgenomen uit de Sobek-RE-source).</u>

Subroutine *moadcs*

Module description: Adapt cross section dimensions for a cross section.

The following cross section types are possible:

- sedredge cross sections;
- tabulated cross sections.

Cross sections of type circle can not be processed.

For tabulated cross sections this routine will call a cross section adaption routine depending on the users choice. Two choices are possible for tabulated cross sections:

- o erosion/sedimentation spread equally over transport width;
- o option = erosion/sedimentation proportional to local depth.

If a grid point is a boundary and the boundary condition is a bed level and sediment is moving in, no delta z is calculated. In that case the boundary condition is used to adapt the cross section. In all other cases the calculated delta A is used to calculate a delta z. For sedredge cross sections this routine will calculate a delta z and update the bottom of the section involved. In case the grid point is a boundary and the boundary conditions is a bed level and sediment is moving on, no delta z is calculated. The new bottom is interpolated from the boundary conditions table and will be assigned to the section involved.

subroutine *momlev*

Module description: Find highest bed level in cross section which is morphodynamic active.

First the actual transport width is calculated by comparing the actual flow width with the user defined transport width. If the flow width is smaller then the transport width the actual transport width will be adapted.

If the actual transport width has been determined the highest bed level of the cross section is searched below or corresponding with the actual transport width. If a rectangular profile is used the lowest level will be chosen.

subroutine *moeqdz*

Module description: Calculate delta z if morphodynamic option is equally over transport width.

With the level found (*momlev*) a delta bed level is calculated. The delta bed level is used to adapt

the levels in the cross section below the found highest bed level.

subroutine *moeqtw*

Module description: This routine calculates new cross section dimensions.

The algoritm used will spread out the erosion and sedimentation equally over the transport width of the cross section. The delta bed level is used to adapt the levels in the cross section below the found highest bed level.

subroutine *moseci*

Module description: Calculate waterlevel for sed. transporting width

Calculate waterlevel where sediment transporting width is defined. This level is used for the adaption cross section algoritm proportional

subroutine *moprdz*

Module description: Calculate delta z if morphodynamic option is proportional to local depth.

With the level found (*momlev*) a delta bed level is calculated. The delta bed level is used to adapt the levels in the cross section below the found highest bed level.

subroutine *moprld*

Module description: Calculate new cross section proportional to the local water depth

This routine calculates new cross section dimensions. The algoritm used will distribute the erosion and sedimentation proportional to the local water depth in the cross section. The delta bed level is used to adapt the levels in the cross section below the found highest bed level

G Numerical methods for morphology in SOBEK-River

G.1 General

The transport of bed material (bed-load or total transport), i.e. material in the S1-bed layer, follows from transport formulae. The transport rates on "Exchanges" can be considered as sediment fluxes affecting the volume of the considered sediment fraction in the bed layer. In the original DelWAQ version a bed-level change was computed by simply taking the difference of the in- and outflowing transport rates. However, it can be shown that this approach becomes unconditionally instable if applied when bed-level updating is introduced in the hydrodynamic simulations. The selected numerical scheme for SOBEK should satisfy the requirements for numerical stability, accuracy and robustness.

Instability of the approach can for instance be shown on basis of a simplified situation. Consider a quasi-steady flow situation. Looking at small spatial and time scales (small x and t), it is possible to neglect the friction term in the momentum equation for flow. After linearization and combination of the differential equations for flow momentum and mass, and sediment mass, the following simple wave equation is found, which is a convection equation of bed level *z* (Jansen et al, 1979):

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\phi_b}{\alpha_0}\frac{\partial z}{\partial x} = 0 \tag{G.1}$$

in which α_0 = 1- Fr_0^2 , and $\theta_0 = u\left[\frac{ds}{du}\Big/h\right]$ is the celerity of bed disturbances. By applying the proposed (second-order) central differencing, and an explicit Euler time discretisation we obtain:

$$\frac{z_j^{n+1} - z_j^n}{\Delta t} = -\left(\frac{\phi_b}{\alpha_0}\right)\frac{z_{j+1}^n - z_{j-1}^n}{\Delta x} \tag{G.2}$$

For stability of the numerical scheme it is useful to apply a Fourier-series analysis of the numerical solution. This approach reveals whether wave-type solutions show a decaying or growing (instable) behaviour. The approach yields an amplification factor *r* which expresses the rate of change of a solution during progressing in time: $z_j^{n+1} = r \cdot z_j^n$. For verification of the Neumann condition for stability for this scheme we can calculate the amplification factor *r* as:

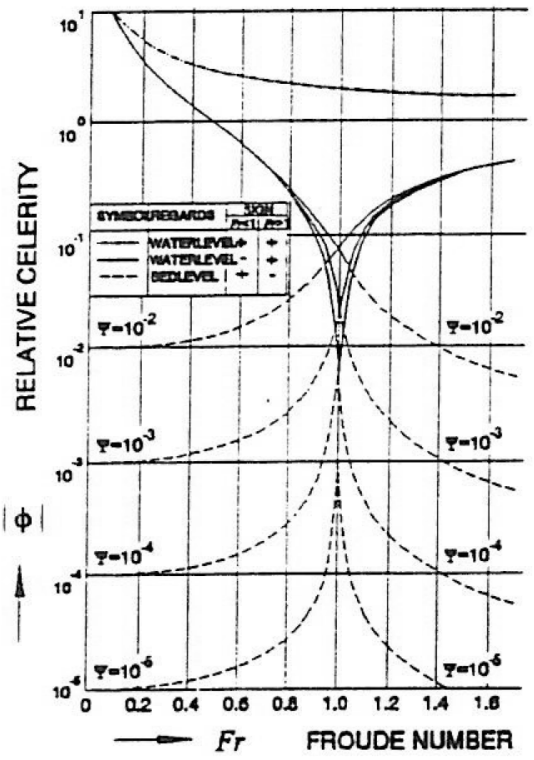
$$r(\sigma,\xi) = 1 - i\sigma\sin\xi\,, \quad \sigma = \left(\frac{\phi_b}{\alpha_0}\right)\frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad \xi = \frac{2\pi\Delta x}{L} \tag{G.3}$$

in which σ is the Courant number. For stability must hold that $|r| \le 1$, however it can be shown that $|r| = 1 + O(\Delta t)$ from which it follows that this scheme is never stable.

For a stable scheme the spatial discretisation above should be combined with another time discretisation, e.g., the midpoint rule which discretises the time derivative as $\left(z_j^{n+1} - z_j^{n-1}\right)/2\Delta t$. However, it is more appropriate to apply a different spatial discretisation method, for instance a first-order upwind scheme (FTBS scheme), or Lax Wendroff type central difference scheme, etc. It is important to apply a discretisation method which can be applied in both 1D and 2D applications (SOBEK-1D and 2D applications). Furthermore the choices might already anticipate on a generic application for non-structured grids foreseen in the future. An important restriction to the regular approaches for discretisation comes from the use of a staggered grid.

The following approach is adopted to the numerical implementation:

- Step 1: compute the transport capacity in the cell center. Apply a first order upwind approach by transferring these transport rates in “upwind” direction towards the cell boundaries/exchanges. Initially the upwind direction can be based on the flow direction.
- Step 2: define upwind direction on basis of the direction of the characteristics. The celerity (wave speed) of small disturbances in the solution can be computed using the method of characteristics. For a fully coupled 1D model for flow, bed-load transport and morphology, three characteristics are found (de Vries, 1969). In Figuur G.1 the celerities (absolute values) are plotted as function of the Froude number (relative celerity is defined as celerity divided by the flow velocity).



Figuur G.1 Relative celerities (de Vries, 1969)

For subcritical flows, i.e. Froude numbers less than 0.9, the two upper lines represent the wave celerities for waves at the water surface. The upper line is a positive celerity, and the lower is a negative celerity. The lowest celerity is related to the wave speed of bed disturbances. In the reach near Froude number equal to 1 (critical flow) the wave speeds of the negative celerity and the low celerity start to interact, and the disturbances in bed and water-surface cannot be separated. At Froude equal to 1 these lines interact, and for Froude numbers larger than 1.1 a clear distinction between bed waves and surface waves can be made again. However, for Froude 1 the two positive celerities can be associated to water waves, and the small negative celerity can be associated to bed disturbances. For upwind direction the following rule will apply:

$$\begin{aligned} \phi_b &= \text{positive} \quad \text{for} \quad Fr < 1 \\ \phi_b &= \text{positive} \quad \text{for} \quad Fr = 1 \\ \phi_b &= \text{negative} \quad \text{for} \quad Fr > 1 \end{aligned} \tag{G.4}$$

- Step 4: numerical discretisation is extended with a central difference (interpolation of the transport rate at an "exchange" from the two connecting segment centers). To prevent oscillations this discretisation requires a damping term, which is preferably defined by flux limiter approach. This involves upwinding of information from cells further upstream.

Preventing instability and inaccuracy starts with accounting for mass conservation. It is important that the flux terms acting on the bed layer are formulated appropriately.

In the following sections more background is given on the chosen numerical approach. Firstly some more background is given on appropriate numerical schemes. Secondly the details of the implemented scheme are treated in section G.3. Finally, in section G.4 some numerical experiments are presented to show the performance of the scheme in some test cases.

G.2 Background of the numerical scheme

As shown in the previous section, consider the differential equation $z_t+cz_x=0$ for width-average bed level z, the explicit scheme (explicit Euler method):

$$z_i^{n+1} - z_i^n = -\sigma\left(z_{i+1}^n - z_{i-1}^n\right) \tag{G.5}$$

is unstable. In this equation σ is the Courant number (CFL number) defined as $c\Delta x/\Delta t$. It can be stabilised by replacing z_i^n by $\left(z_{i+1}^n + z_{i-1}^n\right)/2$ leading to:

$$z_i^{n+1} = \frac{1}{2}\left(z_{i+1}^n + z_{i-1}^n\right) - \sigma\left(z_{i+1}^n - z_{i-1}^n\right) \tag{G.6}$$

which is the Lax-Friedrichs scheme (Lax, 1954). When applied to the conservative form $z_t+s_x=0$ the Lax-Friedrichs scheme becomes (e.g., Hirsch, 1988):

$$z_i^{n+1} = z_i^n - \tau\left(s_{i+1}^n - s_{i-1}^n\right) + \frac{1}{2}\left(z_{i+1}^n - 2z_i^n + z_{i-1}^n\right) \tag{G.7}$$

Where τ is defined as $\Delta x/\Delta t$. Note that the stabilising effect comes from adding a dissipation term proportional to the second derative of U. It can be considered as the discretization of ($\Delta x2/2\Delta tUxx$). The resulting numerical scheme is conditionally stable of satisfying the Courant-Friedrichs-Lewis condition (CFL condition). Unfortunately it can also be shown that this scheme is rather dissipative in situations with low Courant numbers, such that any discontinuity will be strongly smoothened out. Therefore this scheme is not very accurate.

Furthermore, the Lax-Friedrichs scheme as shown above is not appropriate on the staggered grid of SOBEK, because it requires a staggering of fluxes (transport rate) and bed-levels. The bed levels are located on the water-level points, while transport rates are defined at the velocity points. Instead a more general (yet comparable) explicit formulation is proposed, which corresponds to that of Busnelli et al. (2001):

$$z_i^{n+1} = \left(1-\phi\right) z_i^n + \frac{\phi}{2}\left(z_{i+1}^n + z_{i-1}^n\right) - \tau\left(s_{i+1/2}^n - s_{i-1/2}^n\right) \tag{G.8}$$

In this scheme a coefficient ϕ is introduced that adds dissipation to the scheme in a controlled way. When using $\phi = 1$ the scheme is comparable to that of Lax-Friedrichs. However, Busnelli applies reasonably small values for this coefficient (less than 0.1), since stabilising effects from the staggering and the flow field are sufficient. In a fixed coordinate system (horizontal reference) the dissipation term will force the scheme not only to smoothen oscillations, but also to level off the solution. This latter effect can be lessened by using a tilted coordinate system, or to define the dissipation term with bed-level difference relative to the equilibrium or initial bed level.

More accuracy can be obtained by using other types of schemes with a non-linear (or higher-order) approximation of the fluxes, such as the space-centred second-order schemes (e.g., Lax-Wendroff type of schemes), or more advanced upwind-schemes for higher-order space discretisation. The latter type of schemes have also been applied to the numerical solution of the flow in SOBEK-River.

In a space-centred schematisation as used in SOBEK-RE (Lax-Wendroff type of scheme) a difference in upstream and downstream direction of influences can not be distinguished. Therefore it is not fitted to the actual direction of propagation of waves that a characteristic for the solutions of the system of hyperbolic differential equations. Instead of these space-centred schemes it is possible to use a class of upwind numerical schemes in which the disretisation is based on the physical properties of the solutions. The advantage of these approaches is that these can be set-up in such a way that oscillations at discontinuities can be prevented (instead of damping them afterwards).

It can be shown that the unstable scheme above can be stabilized by a one-sided differencing as follows (FTBS scheme, for unstaggered grid):

$$z_i^{n+1} = z_i^n - \sigma\left(z_i^n - z_{i-1}^n\right) \tag{G.9}$$

It is stable only for positive values of the Courant number, i.e. positive celerities (and unstable for negative celerities). Furthermore, it is first-order accurate in space and time. Furthermore it can be shown that truncation error is

$$\varepsilon_T = \frac{c\Delta x}{2}(1-\sigma)\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \tag{G.10}$$

From this formula follows that this viscosity term vanishes for c=0, when characteristic eigenvalues pass through zero, which will occur in stagnation regions and at critical flow conditions (Froude number equal to unity). As a consequence the vanishing viscosity at transitions will lead to sharp discontinuities, but can also lead to non-physical shocks.

In situations with mixed sign eigenvalues it is possible to combine stable upwind schemes for positive and negative celerities by using the following projectings of eigenvalues:

$$c^+ = \max(c,0) = \frac{1}{2}(c+|c|) \quad ; \quad c^- = \min(c,0) = \frac{1}{2}(c-|c|) \tag{G.11}$$

Then the following general form of the first-order accurate upwind scheme written for the linearized scalar form of the equations:

$$z_i^{n+1} - z_i^n = -\tau\left[c^+\left(z_i^n - z_{i-1}^n\right) + c^-\left(z_{i+1}^n - z_i^n\right)\right] \tag{G.12}$$

The formulation above can be used to set-up an TVD numerical approach for a fully coupled system of equations, based on flux splitting techniques. However, in SOBEK-River with DelWAQ morphology the hydrodynamic and morphology are decoupled. Flux limiters based on the flux-splitting approach are therefore not effective, especially for designing a numerical scheme that works also for transcritical flow situations. For that reason it has been decided to start the implementation with a first-order upwind approach as presented by Busnelli et.al. (2001), which can be extended later with flux limiters.

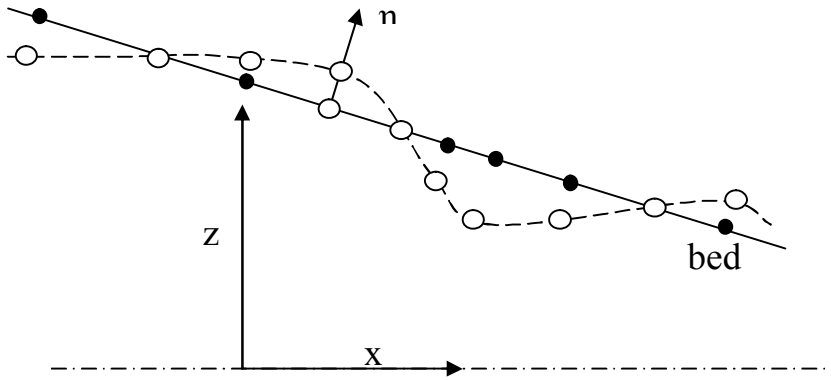
G.3 Numerical scheme for DelWAQ

In the previous section it is proposed to implement a first-order numerical scheme that is comparable to Lax-Friedrichs scheme, but generalised for a staggered grid (Busnelli et al, 2001). The scheme has been generalised more by adding upwind components in the discretisation of the fluxes. In this section the resulting schema, and its characteristics are presented.

The bed-level changes and changes in bed composition for time step Δt are computed from the mass balance of sediment of bed layer S. The procedure is as follows:

1. compute erosion/deposition terms from suspended load simulation per fraction
2. add net bed-load/total-load sediment flux over segment per fraction (multiply the transport capacity with the available volume percentage p_i to get the actual transport rate)
3. add the lateral sediment per fraction (e.g., dredging)

Adding all the fluxes for all fractions, a net change of mass volume of the segment can be computed using the proposed space-discretisation. Based on the bed-level change, combined with eventual change in thickness of the mixing layer, the exchange flux between the active layer S and the underlayers can be defined.

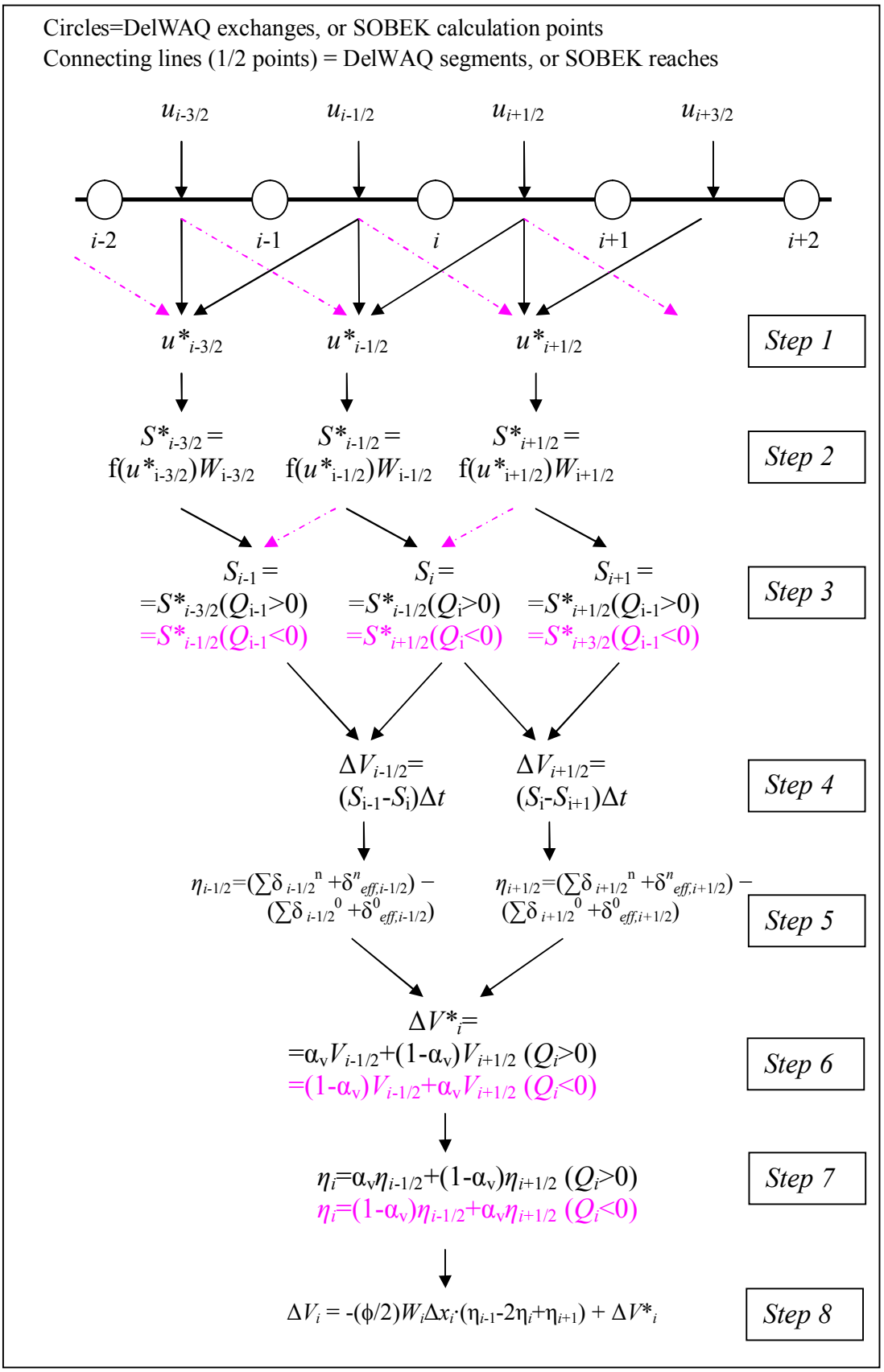


Figuur G.2 Definition of bed level for numerical scheme: circles represent the bed-level points in the numerical grid (black circles are initial bed levels, white circles are bed levels after time *t*)

In Figuur G.2 a schematic presentation is given of bed-level development on a numerical grid. A coordinate η is introduced which represents the bed-level change relative to the initial bed level.

By considering the change in mass per sediment fraction, including the exchange fluxes from below, the result of this computation provides the new sediment distribution of the bed layers. Concluding the update step, a multiplification is applied with the morphological factor (MORFAC). This factor is an input variable to be specified by the user. Although initially only a constant factor is considered, it has to be anticipated that later a time-dependent (or varying) morphological factor will be applied. The performance of simulations (simulation time) can be enhanced if the morphological factor is tuned on the discharge (high factor at low discharge, low factor at high discharge).

In Figuur G.3 a flow-scheme is given to explain the discretisation applied in DelWAQ.



Figuur G.3 Diagram of numerical discretisation steps in DelWAQ (purple arrows refer to negative flows)

- Step 1: interpolation of flow velocities for flux calculation:
  - Because of the highly non-linear fluxes (transport rates as function of flow velocity) a different result is found when the average of transport rates at different segments is compared to the transport rate computed with the averaged flow velocity. Initially it has been tried to calculated the transport rate at segments using the velocity at the segment centers (which results directly from the flow calculations). However, since this scheme led to instable results. Therefore it has been chosen to average (or interpolate) the velocities at upstream and downstream cells first, before using them for transport calculations at the actual segment. A factor α_s ($0<\alpha_s<1$) is introduced, with which the user can specify how much information about the velocity in the downstream segment has to be taken into account. Considering the segment *i*-1/2 (connecting calculation points *i* and *i*-1) the following velocity is defined:

$$u^*_{i-1/2} = \alpha_s \cdot u_{i-1/2} + (1-\alpha_s) \cdot u_{i+1/2} \qquad if \qquad Q_i > 0$$
$$u^*_{i-1/2} = \alpha_s \cdot u_{i-1/2} + (1-\alpha_s) \cdot u_{i-3/2} \qquad if \qquad Q_i < 0 \tag{G.13}$$

    The direction of the discharge at the exchanges determines the direction of interpolation. In the test cases described in these report a factor of $\alpha_s = 0.5$ is used.
- Step 2: calculate the sediment flux at segment centre (transport formula):
  - Using the interpolated velocity, the transport rate *S** (in m^3/s) at the segment centre is calculated. The transport width *W* of the considered segment is used to make it a volumetric transport.
- Step 3: upwind the sediment fluxes to the calculation points:
  - The transport rates S* are moved downstream (upwind) to the nearest calculation point on basis of the flow direction at this point.
- Step 4: net volume change calculated from the sediment balance:
  - The net change of sediment volume is calculated at segment centres by subtracting the fluxes at the segment boundaries (e.g., at the exchanges up- and downstream). Bed porosity and time step has to be included in this step.
- Step 5: relative bed-level change per segment:
  - the relative bed-level change η is determined from the underlayer-administration by adding the thickness of the underlayers (δ_i) and mixing layer (δ_{eff}), and substracting the thickness determined at start of the simulation (*n*=0). This thickness represents the average bed level per DelWAQ segment.
- Step 6: determine volume change at calculation points:
  - To transfer these to changes in cross section area (see section F.7), the values have to be moved to the water level points (calculation points) at which the cross sections are defined. In agreement with the numerical scheme an upwind approach is chosen for this. Again a stability factor (α_V or $\alpha_{DeltaVol}$) is introduced as shown in the following equation for grid point *i*:

$$\Delta V^*_i = \alpha_V \cdot V_{i-1/2} + (1-\alpha_V) \cdot V_{i+1/2} \tag{G.14}$$

  - Test cases (see section G.4) have shown that a value of α_v=0.75 insures stability in cases without bifurcations. If bifurcations are present, a value of α_v=0.5 is used.
- Step 7: determine relative bed-level changes η at calculation points:

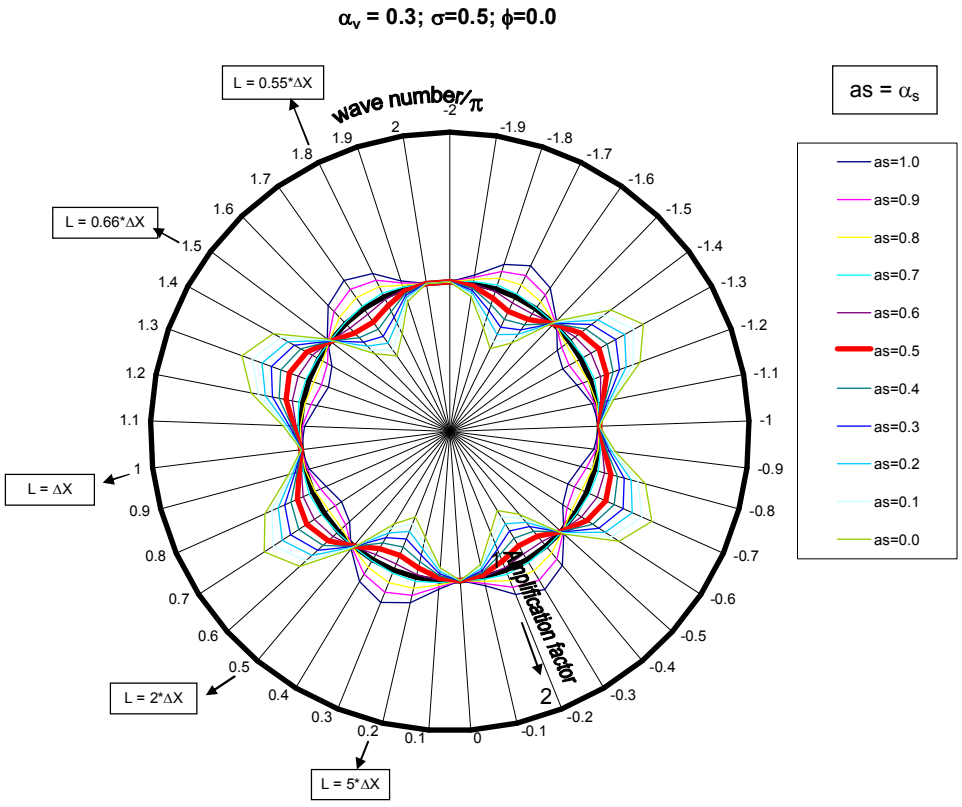
– For defining the dissipation term in the model it is necessary to define the relative bed-level changes for water-level points. Again the stability factor α_V (or $\alpha_{DeltaVol}$) is applied.

- Step 8: net volume change at calculation point:
  – The volume change of step 6 and dissipation term are added to obtain the final volume change that is used for cross-section change:

$$\Delta V_i = -\frac{\phi}{2} W_i \Delta x_i \left(\eta_{i-1} - 2\eta_i + \eta_{i+1}\right) + \Delta V_i^* \tag{G.15}$$

The use of an upwind scheme implies that procedures for handling inflow boundaries and segments following a bifurcation have to be defined. For the time being, the change in cross section area for these profiles is set to the same value as that of the following cross section in the direction of flow.

By applying a Neumann stability analysis for the numerical scheme, when applied to equation (G.1) it is possible to analyse the effect of parameters av and as on the stability of the scheme.



Figuur G.4 Stability diagram for the new numerical scheme in DelWAQ

In Figuur G.4 the value of the amplification factor is shown as function of the wave number (with respect to the numerical grid). In this figure the result is shown for the most stable, yet not too diffusive settings of the parameter values.

It can be seen that at certain wavelengths L the amplification factor appears to become larger than 1, which implies a potential instable solution (growth of the associated waves). However, with these settings still a stable solution can be obtained because of stabilizing effects from the coupling with the flow module. A more complete Neumann analysis (including the numerical scheme for flow) is needed to determine the actual stability criteria.

It should be noted that by using values of α_s or α_V close to unity a relative strong upwinding is introduced. Bed-level changes at node i are then following from transport rates at i-5/2 and i-3/2. The resulting numerical scheme is rather instable, and produces wiggles with wave lengths of more than 3 or 4 times the spatial step. The use of values for these parameters of less than 0.5 corrects this problem, and makes the scheme more accurate. In the following section the results of some numerical experiments are shown to illustrate this.

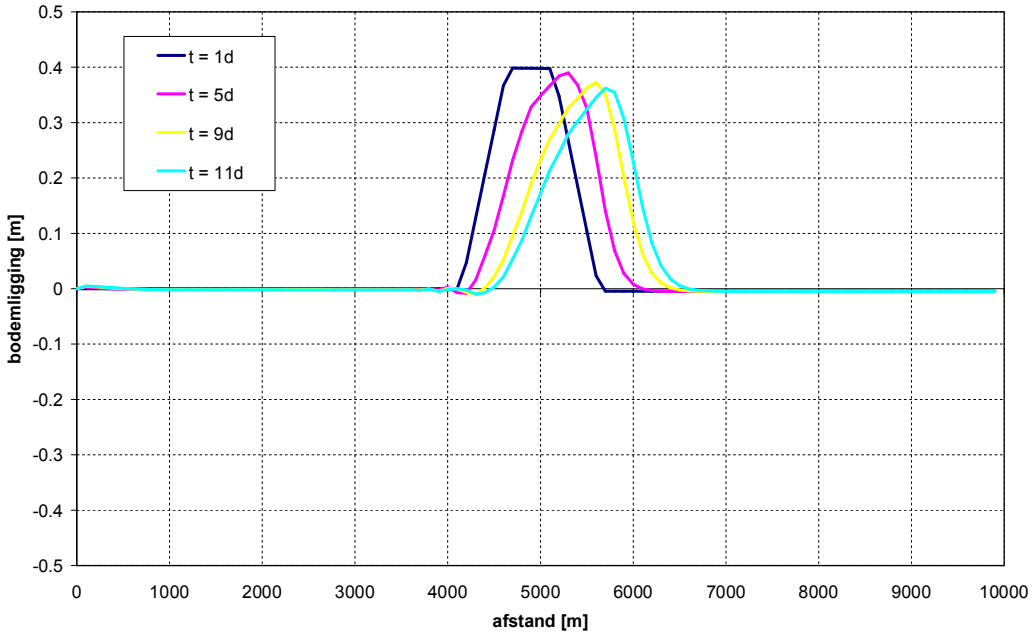
G.4 Numerical experiments

The results of the DelWAQ morphology module were compared to the results of two existing models, each representing a local shoal on a sloped river bed. The flow velocities are subcritical in one model and supercritical in the other model. The model parameters are given in Tabel G.1.

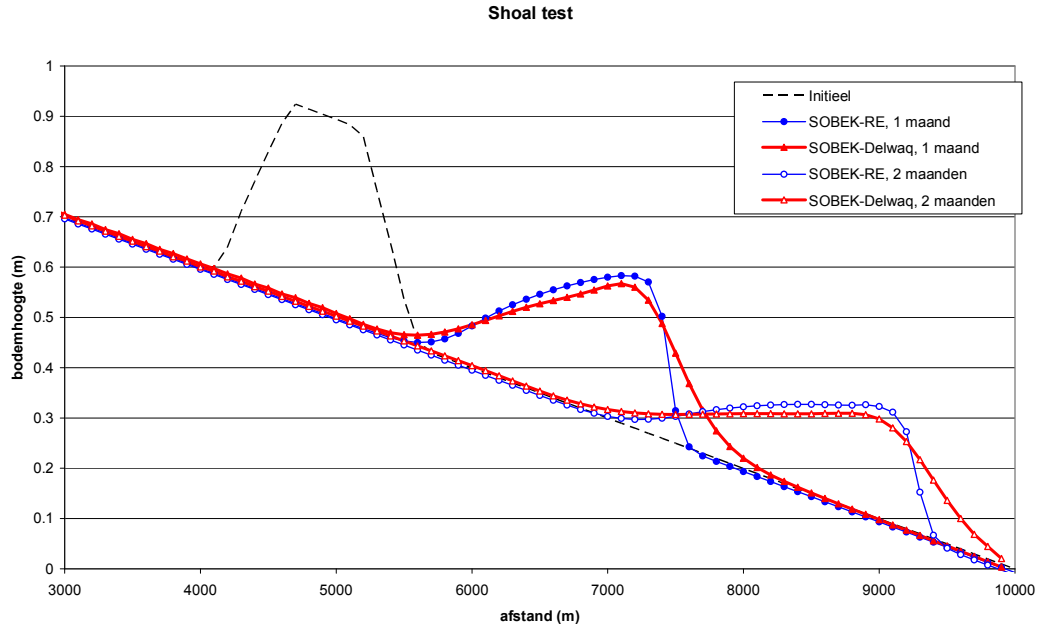
Tabel G.1 Model parameters

	Model 1 (subcritical flow)	**Model 2 (supercritical flow)**
Discharge [m^2/s]	2.0	5.0
Slope [%]	0.01	1.0
Chezy roughness [$m^{1/2}/s$]	50	50
Grain size D_{50} [mm]	0.2	0.3
Shoal height [m]	0.40	0.05

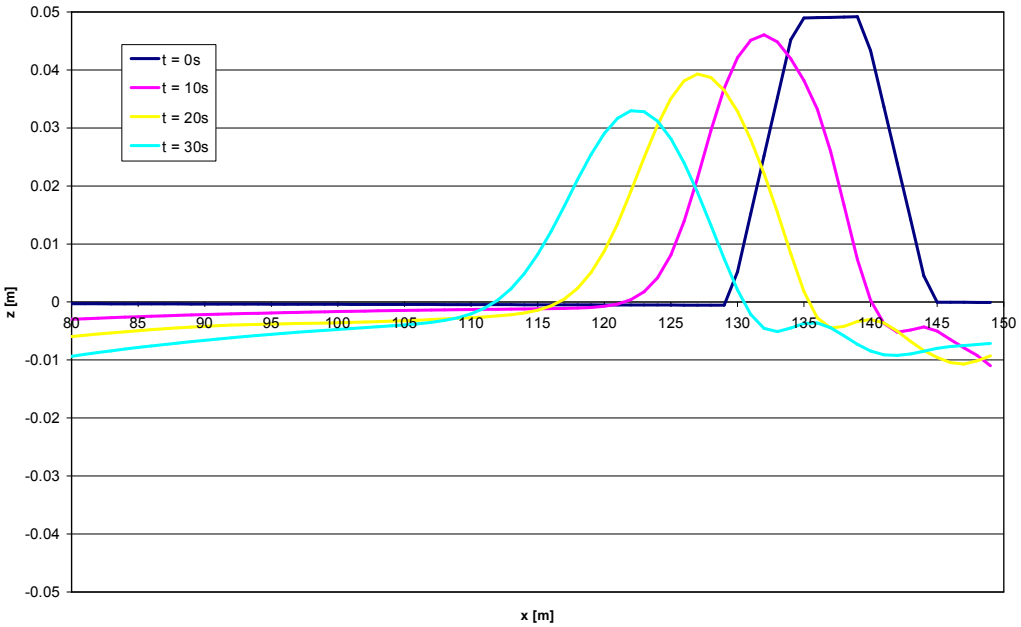
Figuur G.5 and Figuur G.7 show how the shoal moves downstream in the case of subcritical flow and upstream in the case of supercritical flow. These results agree with the results of the existing models. For instance a comparison is shown for the simulation with SOBEK-RE and with SOBEK-River in Figuur G.6.



Figuur G.5 Movement of the shoal in the test model for subcritical flow (Model 1)



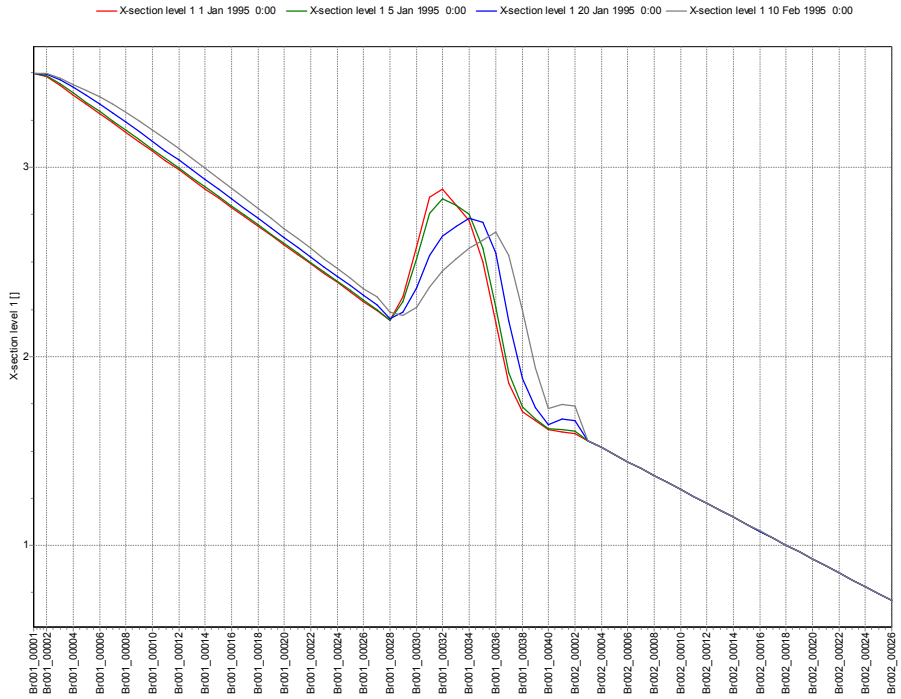
Figuur G.6 Movement of the shoal in the test model for subcritical flow (Model 1)



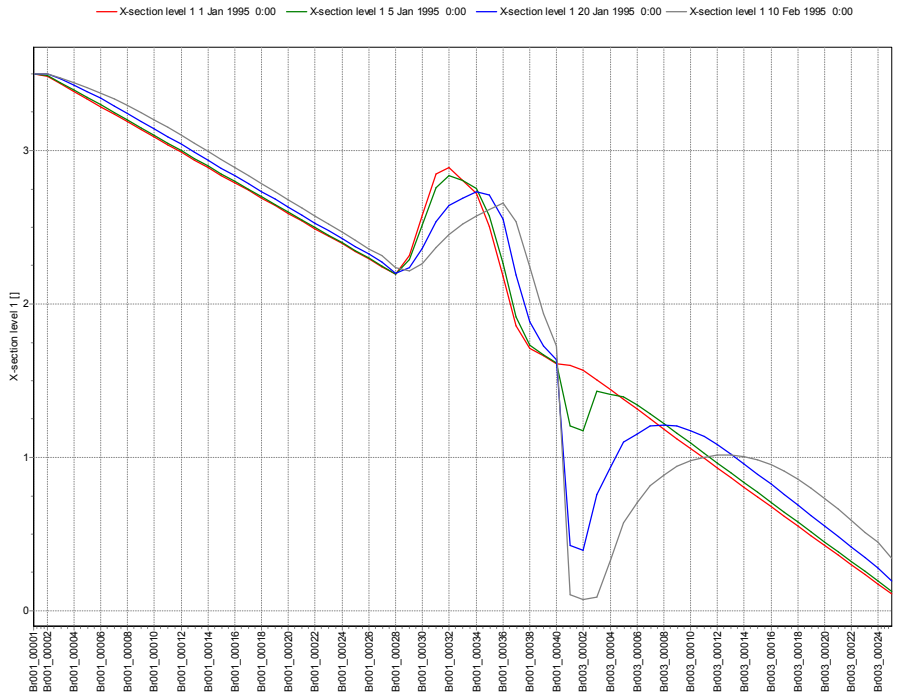
Figuur G.7 Movement of the shoal in the test model for supercritical flow (Model 2)

Furthermore it has been tested how a shoal moves through a bifurcation. The model used consists of a main branch with a shoal (branch 1), which splits up into two branches just behind the shoal. In Figuur G.8 and Figuur G.9 the bed level is shown at four time steps. Branch 3 has a much smaller cross section than branch 1, which results in a strong gradient of flow velocities at the transition from branch 1 to branch 3 and therefore to erosion in the segment just after the bifurcation. The gradient of velocities between branch 1 and branch 2 has the opposite sign, so that at this transition sedimentation takes place.

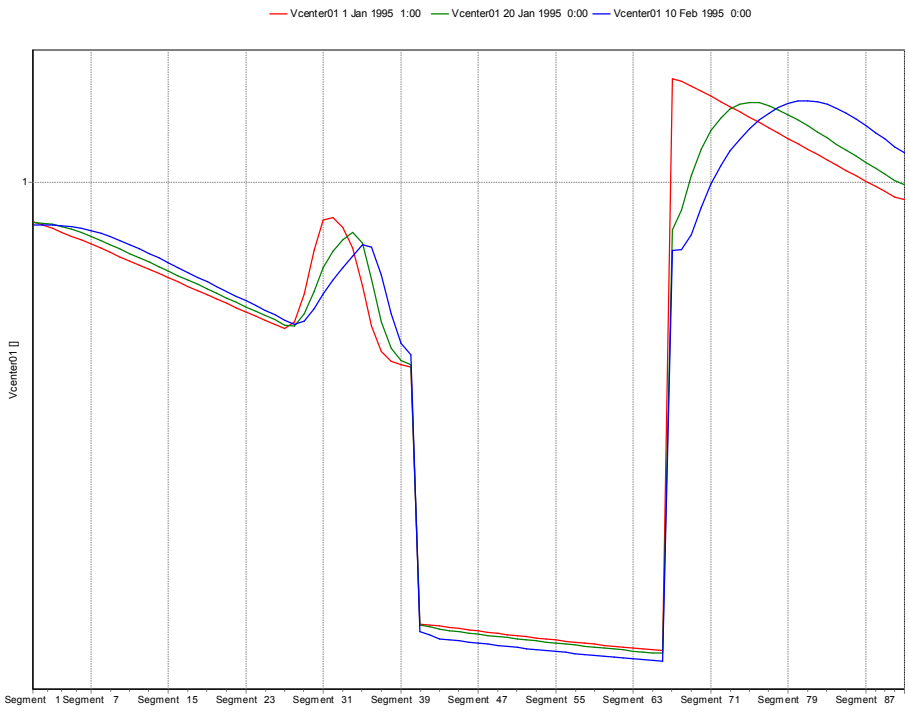
The flow velocities are presented in Figuur G.10, where branch 1 consists of segments 1 to 40, branch 2 of segments 41 to 66 and branch 3 of segments 67 to 91. For the repartition of sediment at the bifurcation, the power function was used with values of 1.0, 0.4 and 0.8 for the factor γ_2/γ_3 and the exponents k and m.



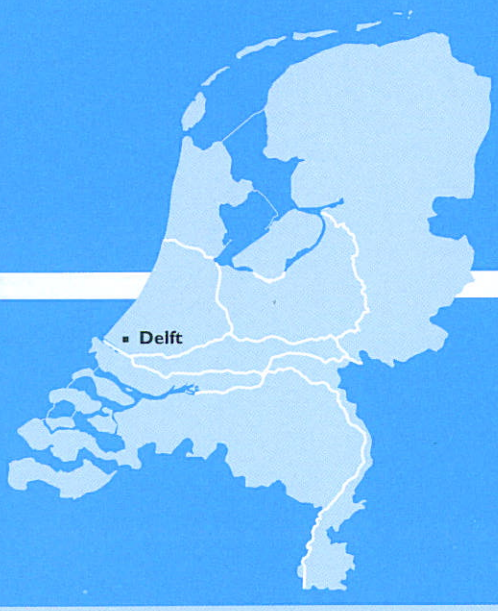
Figuur G.8 Movement of the shoal through the test model for bifurcations (branch 1 and 2)



Figuur G.9 Movement of the shoal through the test model for bifurcations (branch 1 and 3)



Figuur G.10 Flow velocities in all three branches



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

