

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Bouwstenen voor nieuw morfologisch SOBEK-model van de Rijn- Maasmonding

Rapport

november 2005

Opdrachtgever:

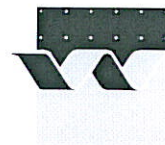
Rijkswaterstaat RIZA

Bouwstenen voor nieuw morfologisch SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding

Erik Mosselman, Johan Crebas, Joost Icke, Kees Sloff & Zheng Bing Wang

Rapport

november 2005



OPDRACHTGEVER:		Rijkswaterstaat RIZA Rotterdam Boompjes 200 3011 XD Rotterdam			
TITEL:		Bouwstenen voor nieuw morfologisch SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding			
SAMENVATTING:		Bestaande morfologische SOBEK-modellen kennen geen functionaliteit voor slibtransport en behoren bovendien tot een oude SOBEK-lijn die wegens technische nadelen in de nabije toekomst verlaten zal worden. Deze tekortkomingen beperken de mogelijkheden van toepassing op de Rijn-Maasmonding. Daarom worden hier bouwstenen uitgewerkt voor de implementatie van een nieuw eendimensionaal morfologisch model van de Rijn-Maasmonding dat nauw aansluit bij de nieuwe SOBEK-lijn en dat in de transportformulering onderscheid maakt tussen zand en slib. Deze bouwstenen worden als volgt benoemd: 1. Omzetten van de morfologische functionaliteit in de oude SOBEK-lijn naar de nieuwe SOBEK-lijn; 2. Advies voor de implementatie van een transportformulering waarbij voor erosie, transport en depositie van sediment onderscheid wordt gemaakt tussen zand en slib. De uitwerking van de bouwstenen leidt tot het advies om het nieuwe morfologische model voor de Rijn-Maasmonding verder te ontwikkelen in de volgende vier stappen: 1. Implementatie van Van Rijn's nieuwe formules voor evenwichtsconcentraties volgens de multi-fractieformulering zonder advection-diffusievergelijkingen; 2. Toepassing van het resulterende model op de Rijn-Maasmonding om te testen in hoeverre het model in staat is de grootschalige zand-slibsegregatie te reproduceren; 3. Implementatie van advection-diffusievergelijkingen voor sedimentconcentraties door DELWAQ te combineren met een terugkoppeling van bodemveranderingen naar de stroming; 4. Inbouw van een combinatie van de formuleringen van Van Ledden en Van Rijn voor slib en zand-slibmengsels. Op langere termijn ligt het voor de hand om ook het transport van zand en grind via DELWAQ te realiseren. Zolang dit echter nog niet volledig gerealiseerd is, dient de uit SOBEK-RE afkomstige morfologiemodule te worden behouden en onderhouden.			
REFERENTIES:		Opdracht 8051829 d.d. 24 oktober 2005			
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.3	E. Mosselman	30 nov. 2005		F.C.M. v.d. Knaap	C.A. Bons
PROJECTNUMMER:		Q4083.00			
TREFWOORDEN:					
AANTAL BLADZIJDEN:					
VERTROUWELIJK:		☒ JA, tot januari 2008		☐ NEE	
STATUS:		☐ VOORLOPIG		☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF	

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Kader.....	1—1
1.2	Doel.....	1—2
1.3	Criteria	1—2
1.4	Modelstructuur.....	1—2
1.5	Organisatie	1—3
1.6	Toelichting op oude en nieuwe SOBEK-lijnen	1—4
2	Modernisering van SOBEK-MOR	2—1
2.1	Opzet van het model	2—1
2.2	IJking van de waterbeweging	2—2
2.3	Omzetting van modules voor zandtransport en morfologie.....	2—5
3	Operationalisering van DELWAQ	3—1
3.1	Opzet van het model	3—1
3.1.1	Functionaliteit van DELWAQ.....	3—1
3.1.2	Randvoorwaarden	3—2
3.1.3	Beginvoorwaarden	3—4
3.1.4	Procescoëfficiënten	3—5
3.1.5	Simulaties	3—6
3.2	Simulatieresultaten	3—7
3.2.1	Schuifspanningen aan de bodem.....	3—7
3.2.2	Concentraties zwevende stof	3—9
3.2.3	Dikte van sliblaag op de bodem.....	3—12

4	Overwegingen voor verdere ontwikkeling.....	4—1
4.1	Inleiding.....	4—1
4.2	Transportformuleringen voor zand	4—1
4.3	Transportformuleringen voor slib en zand-slibmengsels.....	4—3
4.3.1	Inleiding.....	4—3
4.3.2	Zand-slibmodel van Van Ledden	4—4
4.3.3	Sedimenttransportformules van Van Rijn	4—5
4.3.4	Implementatie in SOBEK	4—7
4.4	Ontwikkellijnen voor morfologie met zand en slib in SOBEK.....	4—9
4.4.1	Inleiding.....	4—9
4.4.2	Voor- en nadelen van bestaande ontwikkellijnen.....	4—11
4.4.3	Conclusie ten aanzien van implementatie.....	4—13
4.5	Modellering van zandtransport binnen DELWAQ.....	4—13
5	Conclusies en aanbevelingen.....	5—1
5.1	Product in 2005.....	5—1
5.2	Advies voor vervolgstappen in 2006	5—2
6	Literatuurverwijzingen	6—1

I Inleiding

I.1 Kader

De Rijn-Maasmonding vormt een ingewikkeld stelsel van waterlopen waarin zand en slib getransporteerd worden onder invloed van de zee, de Rijntakken, de Maas en de wind. Het gebied wordt ook wel aangeduid als “Noordelijk Deltabekken” (NDB) of “Benedenrivierengebied” (BER). De ligging en de samenstelling van de bodem veranderen er continu door zowel natuurlijke processen als menselijk ingrijpen, op verschillende schaalniveaus in ruimte en tijd. Houwing & Blom (2001), Snippen et al (2005) en Mosselman & Vermeer (2005) geven inzicht in de voornaamste veranderingen. De ligging en de samenstelling van de bodem zijn voor een groot aantal functies van de Rijn-Maasmonding van belang. Er is een directe relatie met beheerparameters als doorstroomprofiel, diepte, breedte, areaal van intergetijdengebied en bodemtextuur. Per functie kan bijvoorbeeld gedacht worden aan:

- Waterkeren (bescherming tegen hoogwater): stabiliteit van keringen, dijken en oevers;
- Afvoer van water, ijs en sedimenten: doorstroomprofiel;
- Toegankelijkheid van havens: breedte en diepte van vaarwegen;
- Ecologie en waterkwaliteit: arealen van ecotopen, bodemtextuur;
- Oppervlaktedelfstoffenwinning: bodemsamenstelling met bijbehorende locatie en diepte.

Indirect heeft de bodemligging ook invloed op de stroomsnelheden, waterstanden en zoutindringing. Omdat een deel van het sediment (met name het slib) vervuild is, is er ook sprake van een koppeling met waterkwaliteit, waterbodemkwaliteit en ecologie.

Het is derhalve belangrijk dat Rijkswaterstaat Zuid-Holland, als beheerder van de Rijn-Maasmonding, inzicht heeft in deze veranderingen om eventuele problemen op tijd te signaleren en maatregelen erop af te stemmen. Ook is het van belang om de gevolgen van eigen activiteiten en die van anderen te kunnen beoordelen. Daarom heeft Rijkswaterstaat Zuid-Holland aan RIZA opdracht gegeven tot de operationalisatie (ofwel: het in beheer en onderhoud nemen) van een eendimensionaal morfologisch model van de Rijn-Maasmonding. Met het oog op de betrouwbaarheid van de modelresultaten voor de Rijn-Maasmonding, dient het transport van slib nadrukkelijk in het op te leveren model te worden geïmplementeerd. Het ontbreken van functionaliteit voor slibtransport is echter niet de enige tekortkoming van bestaande morfologische SOBEK-modellen. Die modellen zijn namelijk ook verbonden met een verouderde SOBEK-lijn die wegens technische nadelen in de nabije toekomst verlaten zal worden.

Om de tekortkomingen in de bestaande modellen op te lossen, heeft Rijkswaterstaat RIZA op 17 oktober 2005 opdracht verleend aan WL | Delft Hydraulics om bouwstenen op te leveren voor de implementatie van een nieuw eendimensionaal morfologisch SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding. De desbetreffende opdracht heeft het nummer 8051829. Bij WL | Delft Hydraulics heeft het project het nummer Q4083.

I.2 Doel

Het doel van deze opdracht is het opleveren van bouwstenen voor de implementatie van een eendimensionaal morfologisch model van de Rijn-Maasmonding dat aansluit bij de nieuwe SOBEK-lijn en dat in de transportformulering onderscheid maakt tussen zand en slib. Deze bouwstenen worden als volgt benoemd:

1. Omzetten van de morfologische functionaliteit in de oude SOBEK-lijn naar de nieuwe SOBEK-lijn;
2. Advies voor de implementatie van een transportformulering waarbij voor erosie, transport en depositie van sediment onderscheid wordt gemaakt tussen zand en slib.

De voor de eerste bouwsteen benodigde aanpassingen van de software heeft WL | Delft Hydraulics op eigen kosten uitgevoerd (Hoofdstuk 2). Voor slib is DELWAQ binnen de opdracht geoperationaliseerd (Hoofdstuk 3).

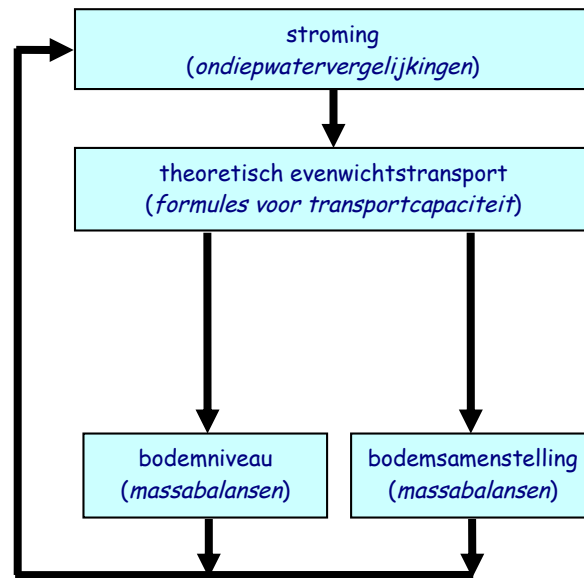
I.3 Criteria

Rijkswaterstaat RIZA heeft de volgende criteria gespecificeerd waaraan het nieuwe morfologische model van de Rijn-Maasmonding zal moeten voldoen:

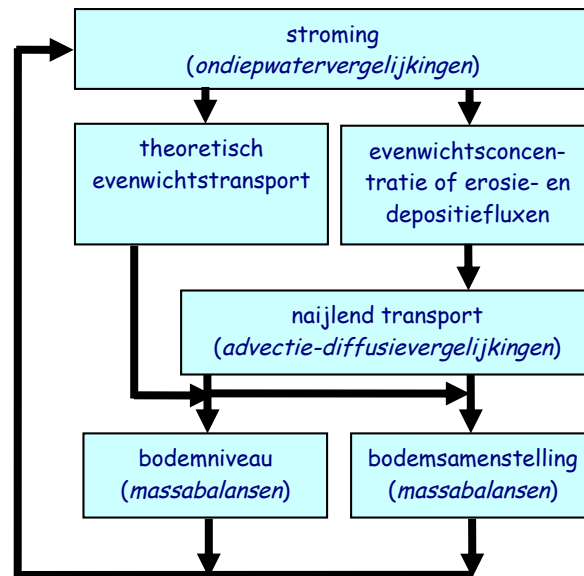
- Het model dient uiteindelijk om de rivierbeheerder inzicht te geven in het morfologische systeem en daarmee inzicht in de relatie tussen ingrepen en effecten op bodemligging en –samenstelling op een grof schaalniveau. Hiermee kunnen eventuele vervolgvragen op een fijner schaalniveau worden gedefinieerd;
- Het model is een procesgebaseerd, eendimensionaal model van de Rijn-Maasmonding dat op basis van de waterbeweging voorspellingen kan doen ten aanzien van de ontwikkeling in de tijd van de bodemhoogte en de bodemsamenstelling;
- Het model dient eenvoudig in te passen te zijn in een voor het gehele Nederlandse riviersysteem toepasbaar modelsysteem dat kan rekenen met mengsels van grind, zand en slib;
- Door *post-processing* van rekenresultaten moet het eenvoudig mogelijk zijn om een sedimentbalans voor een riviertak of een riviersysteem op te stellen;
- De berekende bodemsamenstelling moet op een eenvoudige wijze te bekijken zijn, inclusief de in de bodem optredende gelaagdheid;
- Ervan uitgaande dat voldoende middelen beschikbaar zijn, zou het model medio 2006 operationeel moeten zijn.

I.4 Modelstructuur

Figuur 1.1 toont de structuur van morfologische berekeningen in de oude SOBEK-lijn. Figuur 1.2 toont de structuur van morfologische berekeningen in het beoogde modelsysteem waarin voor erosie, transport en depositie van sediment onderscheid wordt gemaakt tussen zand en slib. Daarin wordt ook rekening gehouden met het naijlende gedrag van transport van fijn sediment, dat zich laat beschrijven met advection-diffusievergelijkingen. Voor deze vergelijkingen kent SOBEK al een koppeling met DELWAQ, maar deze kan nog niet worden toegepast met een terugkoppeling van bodemveranderingen naar veranderingen in de stroming.



Figuur 1.1. Morfologische berekening volgens modules in oude SOBEK-lijn (zand en grind).



Figuur 1.2. Morfologische berekening in beoogde nieuwe modelsysteem (slib, zand en grind).

I.5 Organisatie

De werkzaamheden zijn uitgevoerd door ing. Johan Crebas, ir. Joost Icke, dr. ir. Erik Mosselman, dr. ir. Kees Sloff en dr. ir. Zheng Bing Wang. Dr. ir. Bert Jagers voorzag het team van waardevolle adviezen. De projectleiding was in handen van Erik Mosselman. Drs. Jasper Hugtenburg begeleidde het project namens de opdrachtgever.

I.6 Toelichting op oude en nieuwe SOBEK-lijnen

Bestaande SOBEK-modellen van de Rijn-Maasmonding (Wang, 2001, 2003; Visser & Snippen, 2002; Mol, 2003, 2004) zijn gebaseerd op het oude SOBEK-RE, dat specifieke functionaliteit bevat voor rivierkundige (“R”) en estuariene (“E”) toepassingen: kunstwerken (overlaten, sluizen, stuwen, etc.), morfologie en zoutindringing. In het verleden werd SOBEK-RE vaak aangeduid met “SOBEK-River”. Ten opzichte van het nieuwe SOBEK (SOBEK-Rural) heeft het oude SOBEK-RE verscheidene tekortkomingen die Rijkswaterstaat hebben doen besluiten om verdere ontwikkeling van SOBEK-RE te bevriezen en om gefaseerd over te schakelen op SOBEK-Rural. De belangrijkste voordelen van het nieuwe SOBEK-Rural ten opzichte van het oude SOBEK-RE zijn (zie ook Paragraaf 4.4):

- Het numerieke schema voor de waterbeweging is stabiel en robuuster;
- Naast stromend kan ook schietend water worden doorgerekend, inclusief de overgangen van en naar schietend water;
- Dwarsprofielen behouden binnen SOBEK-Rural hun werkelijke vorm, omdat ze kunnen worden opgegeven via bodemniveaus als functie van de dwarscoördinaat y (“ y,z -coördinaten”) in plaats van natte breedtes als functie van de hoogteligging z (“breedtetabellen”). Dit vergemakkelijkt ook de koppeling met GIS;
- SOBEK-Rural berekent dwarsprofielen voor tussenliggende rekenpunten door middel van een correcte interpolatie tussen als invoer opgegeven dwarsprofielen. In het oude SOBEK-RE is deze interpolatie niet correct, zodat voor de zekerheid vaak voor elk rekenpunt een dwarsprofiel afzonderlijk moet worden opgegeven;
- SOBEK-Rural kent een volledig geïntegreerde koppeling met een tweedimensionaal overstromingsmodel;
- De *user interface* van SOBEK-Rural is een grafische *interface* met meer gebruiksgemak en een directe koppeling met GIS.

Overschakeling op het nieuwe SOBEK-Rural vergt dat de functionaliteit ten aanzien van kunstwerken, morfologie en zoutindringing uit SOBEK-RE wordt overgezet. Voor kunstwerken is dit inmiddels gebeurd. Voor zoutindringing staat dit op de rol voor uitvoering op korte termijn met doelfinanciering. Voor morfologie zet deze opdracht een eerste stap.

Een nadere toelichting op de benamingen voor verschillende SOBEK-versies is nog op zijn plaats. Inmiddels is het gebruik van SOBEK-Rural zozeer gemeengoed geworden, dat het zonder nadere toevoegingen als de standaardversie van SOBEK gezien wordt. Voor verschillende doelgroepen ontstaan echter weer onderscheiden productlijnen die met de toevoegingen “Rural”, “Rivers” en “Urban” worden aangeduid. Van belang is dat al deze toevoegingen feitelijk betrekking hebben op het nieuwe SOBEK-Rural. Tabel 1.1 geeft een overzicht. Omdat de verschillende benamingen mogelijk verwarring wekken, wordt in dit rapport voor de duidelijkheid alleen gesproken over een oude en een nieuwe SOBEK-lijn.

In deze opdracht is gebruik gemaakt van SOBEK-versie 2.72.000.38, die behoort tot de nieuwe SOBEK-lijn.

Tabel 1.1. Overzicht van versies en productlijnen van SOBEK.

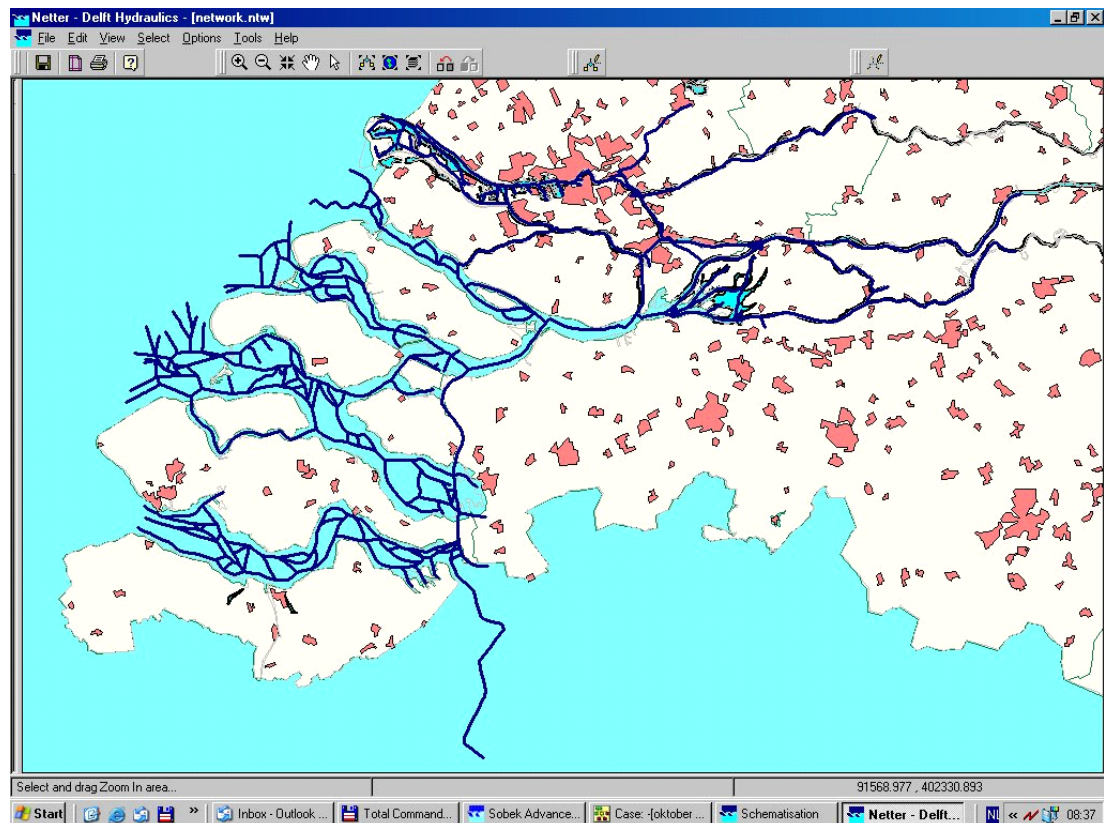
	Oude SOBEK-lijn (het oude SOBEK-River)	Nieuwe SOBEK-lijn (het nieuwe SOBEK-Rural)
Oude terminologie	SOBEK-RE	SOBEK-Rural
Nieuwe terminologie	SOBEK-RE	SOBEK (met onder meer de productlijn SOBEK-Rivers)

2 Modernisering van SOBEK-MOR

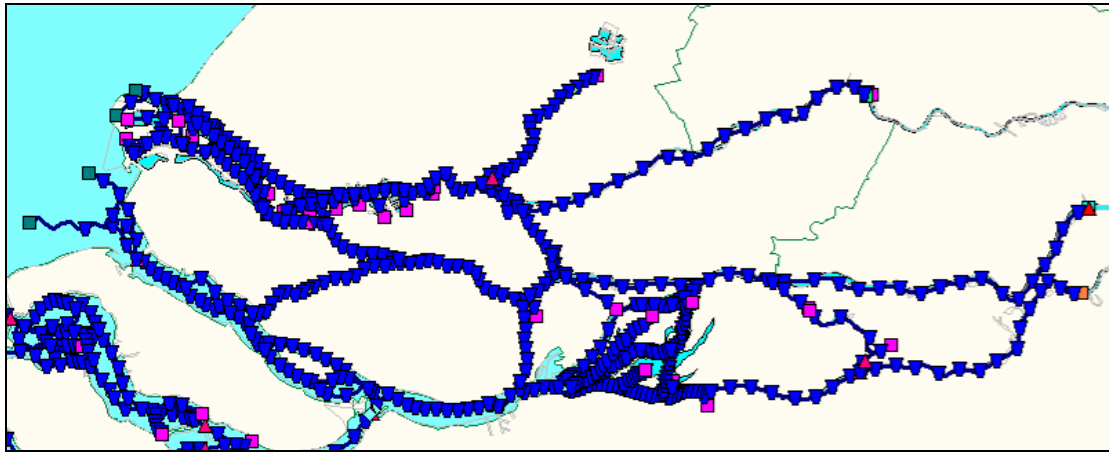
2.1 Opzet van het model

Het SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding is onderdeel van een groter model dat zowel het Noordelijk als het Zuidelijk Deltabekken omvat. Figuur 2.1 toont het volledige model en Figuur 2.2 het deel dat in deze opdracht gebruikt wordt. Er is geen uitsnede uit het model gemaakt, wat inhoudt dat het Zuidelijk Deltabekken meeloopt in de berekeningen voor de Rijn-Maasmonding.

De modelschematisatie heeft een lange voorgeschiedenis. In het kader van het project Deltabreed is deze recentelijk geconverteerd naar de nieuwe SOBEK-lijn. Hiervan is in deze opdracht met vrucht gebruik gemaakt.



Figuur 2.1. Volledige modelschematisatie van Noordelijk en Zuidelijk Deltabekken.



Figuur 2.2. Modelschematisatie van Rijn-Maasmonding.

De dwarsprofielen zijn van het oude model overgenomen in de vorm van tabellen die voor verschillende niveaus boven NAP de waarden geven van de totale en de stroomvoerende breedte (“breedtetabellen”). Voor de Waal, de Lek, de Maas en de takken in de Biesbosch zijn er ook waarden voor de breedte van de uiterwaardsectie. In de toekomst zal het wenselijk zijn om de dwarsprofielen uiteindelijk in te voeren in de vorm van bodemniveaus als functie van de dwarscoördinaat y (“ y,z -coördinaten”).

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.

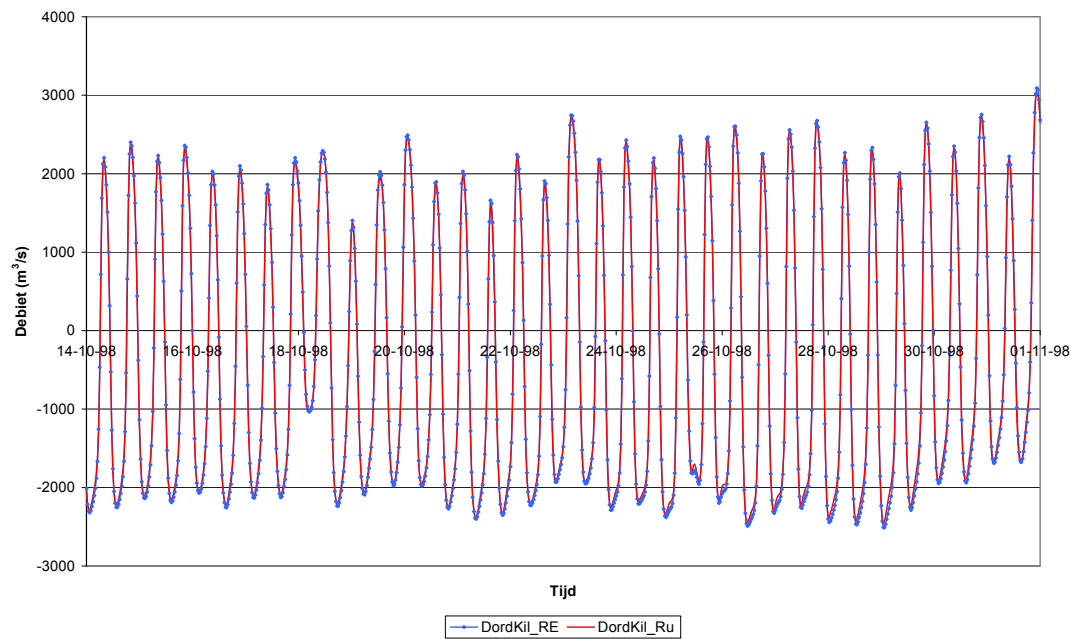
Als bovenstroomse randvoorwaarden worden afvoerreeksen opgelegd in de Lek te Hagestein, in de Waal te Gorinchem, in de Maas te Lith en in de Schelde. Benedenstrooms worden getijrandvoorwaarden opgelegd.

Het model bevat tal van kunstwerken, voorzien van *controllers* en *triggers*. Gedurende de berekeningen van deze opdracht worden ze echter nauwelijks gebruikt. De Brouwersdam, de Grevelingendam en de Krammersluizen blijven dicht. De Oosterschelde-kunstwerken hebben een constante doorlaatopening. Het kunstwerk in het Hartelkanaal blijkt echter in het nieuwe SOBEK-model te gaan klapperen, terwijl het in het oude SOBEK-model een constante opening behield. Verwijdering van de *controllers* geeft geen oplossing. Verwijdering van het gehele kunstwerk leidt tot resultaten die vergelijkbaar zijn met die van het oude SOBEK-model.

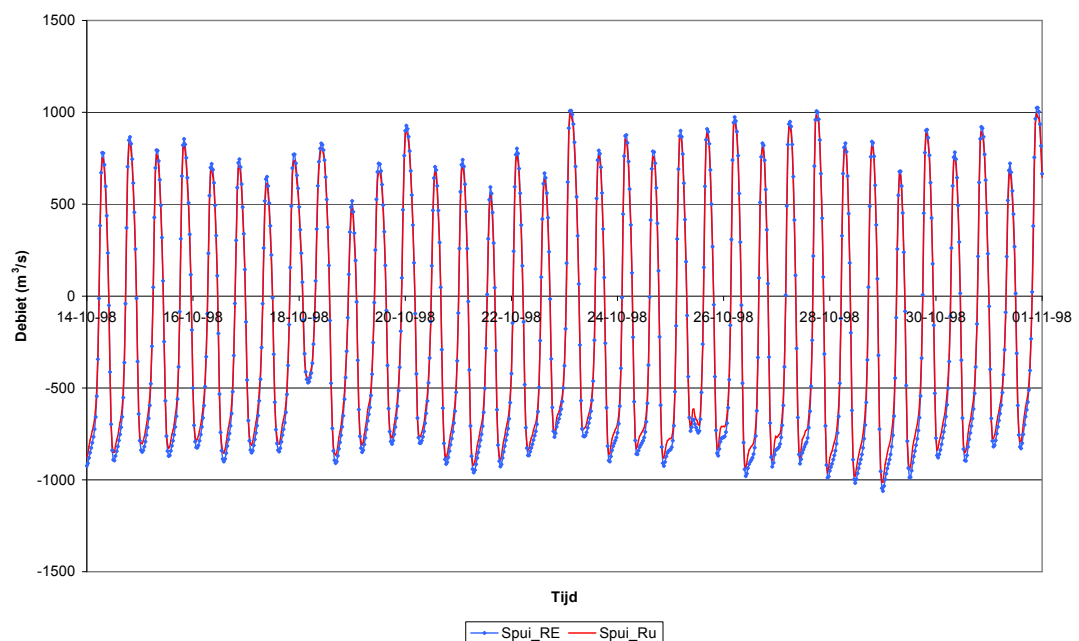
2.2 Ijking van de waterbeweging

De waterbeweging in het nieuwe SOBEK-model is geijkt op resultaten van het oude SOBEK-model voor de maand oktober van het jaar 1998. De daarbij gebruikte debietreeksen zijn dienovereenkomstig van oktober 1998, maar de gebruikte getijreeksen zijn van mei 1995.

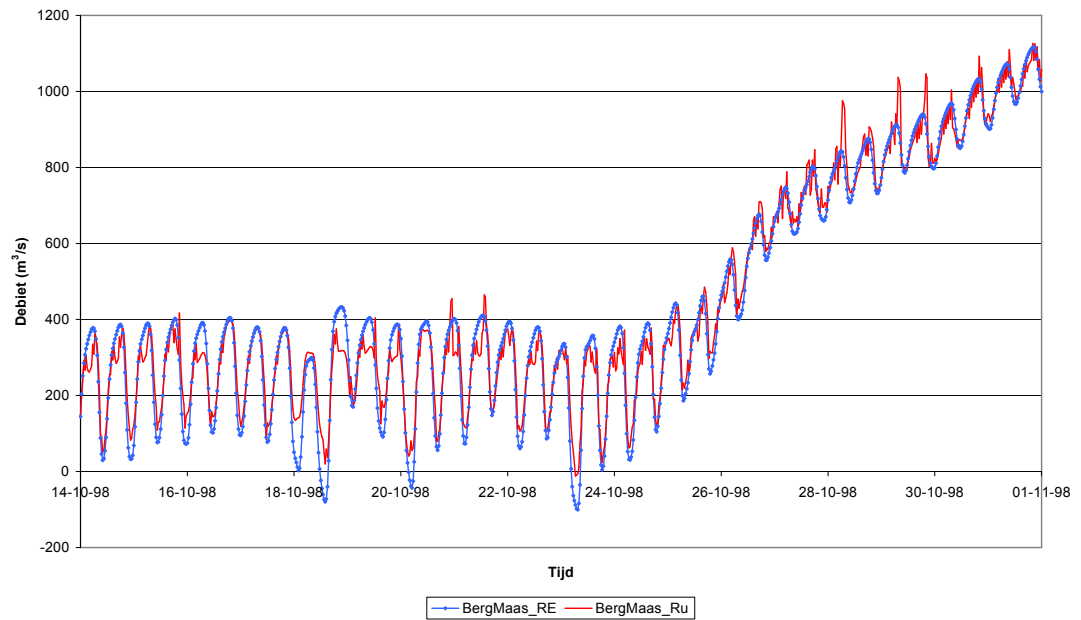
Uitvoer is gegenereerd voor de periode van 14 oktober tot 1 november. Figuren 2.3 tot en met 2.7 geven enkele resultaten.



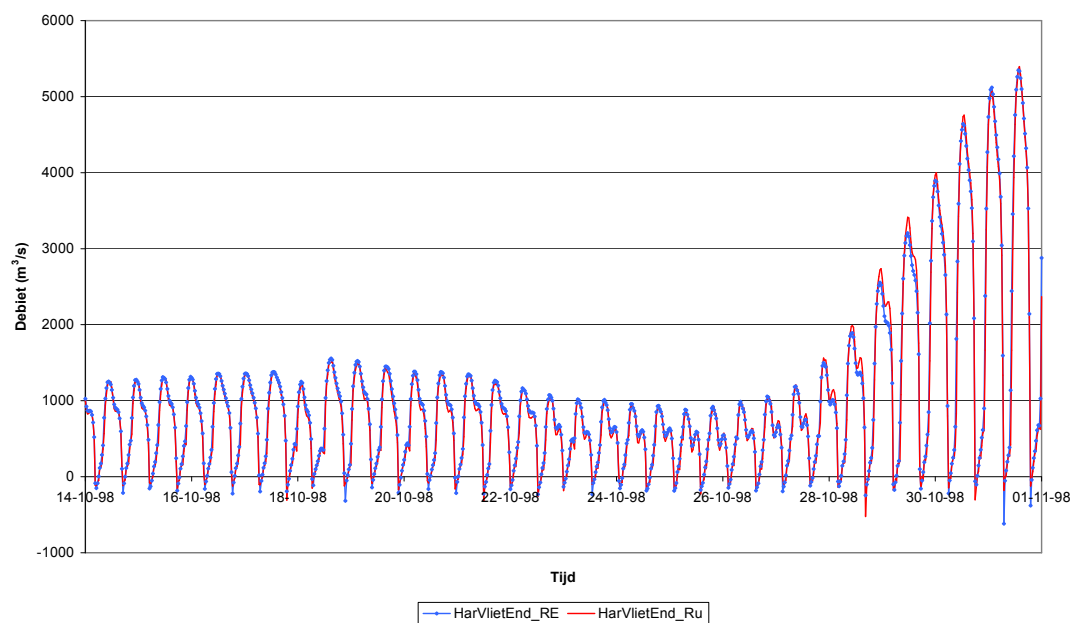
Figuur 2.3. Debietverloop in Dordtse Kil volgens oude (RE) en nieuwe (RU) SOBEK-model.



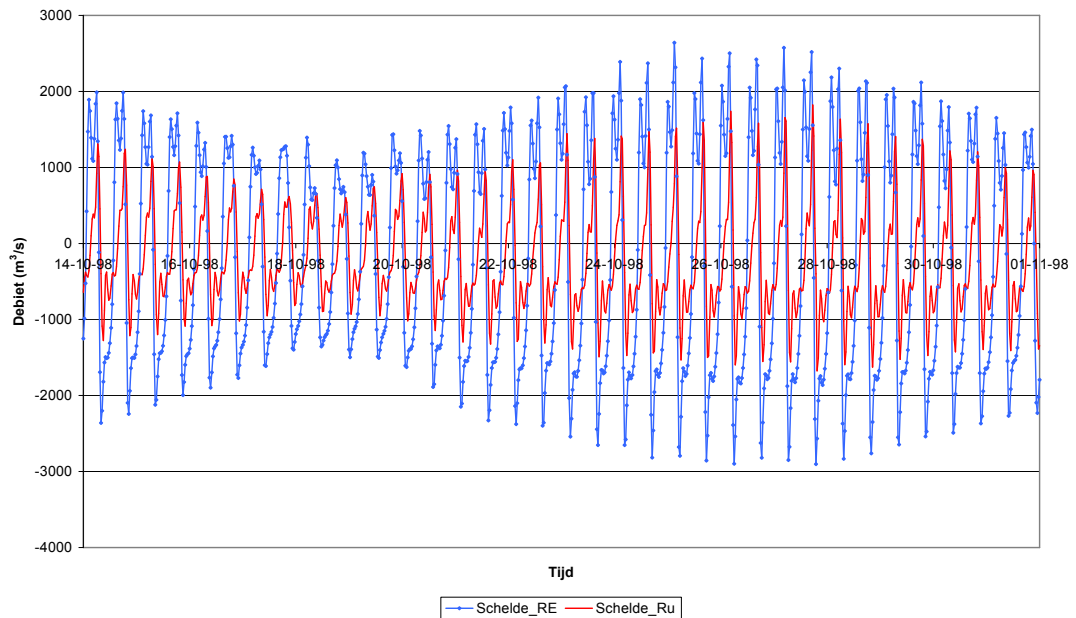
Figuur 2.4. Debietverloop in Spui volgens oude (RE) en nieuwe (RU) SOBEK-model.



Figuur 2.5. Debietverloop in Bergsche Maas beneden Heusdensch Kanaal volgens oude (RE) en nieuwe (RU) SOBEK-model.



Figuur 2.6. Debietverloop in Haringvlietmond volgens oude (RE) en nieuwe (RU) SOBEK-model.



Figuur 2.7. Debietverloop in Schelde volgens oude (RE) en nieuwe (RU) SOBEK-model.

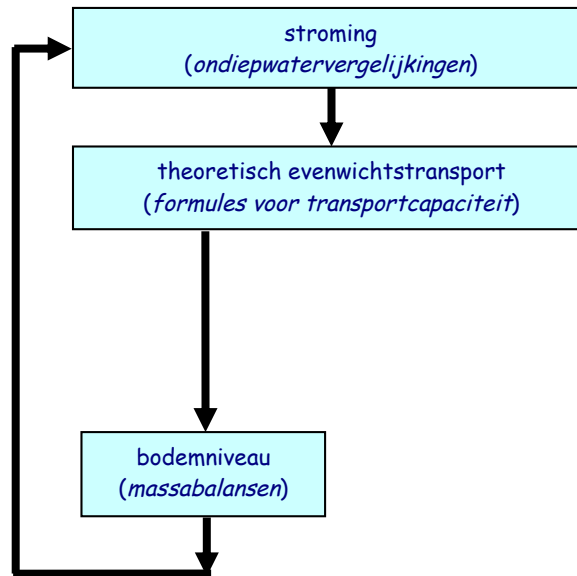
Voor de hier beoogde globale ijking zijn de resultaten bevredigend. Een verdere fijnregeling maakte geen deel uit van de opdracht. In het algemeen worden de debieten goed over de takken verdeeld. Met name de goede overeenstemming in Figuren 2.3 en 2.4 stemt tevreden, omdat de waterbeweging in dwarsverbindingen als de Dordtse Kil en het Spui nauw let voor de morfologische ontwikkeling. Figuur 2.5 laat echter zien dat het debietverloop in de Bergsche Maas zich onrustig gedraagt. De oorzaak blijkt te liggen in het gedrag van de hoogwaterkering in het Heusdens Kanaal. Dit zal in een vervolg nog moeten worden opgelost. Verder blijken de resultaten voor de Westerschelde en de Schelde niet goed overeen te komen, hetgeen te zien is in Figuur 2.7. Dit komt doordat de Westerschelde tijdens de conversie als het ware uit elkaar is getrokken. De Schelde en de Westerschelde vallen echter buiten de door Rijkswaterstaat Zuid-Holland beheerde Rijn-Maasmonding.

De waterstanden stemmen minder goed overeen dan de debieten. Uit de resultaten blijkt dat het gehele nieuwe SOBEK-model meer berging bevat dan het oude, want de waterstanden zijn er ongeveer 10 tot 15 cm lager dan in het oude model. Verder zijn in het nieuwe model de maximum vloeddebieten kleiner en de maximum ebdebieten groter dan in het oude model.

2.3 Omzetting van modules voor zandtransport en morfologie

Flankerend aan deze opdracht heeft WL | Delft Hydraulics de modules voor zandtransport en morfologie uit het oude SOBEK-model geschikt gemaakt voor het nieuwe SOBEK-model en deze vervolgens aan dit nieuwe model gekoppeld. Daarbij moest worden aangesloten op een versprongen numeriek rekenschema waarbij stroomsnelheden op andere plaatsen binnen het rekenrooster worden berekend dan waterstanden en bodemliggingen. Figuur 2.8 toont de structuur van morfologische berekeningen met het resulterende model.

Hoewel eveneens geen onderdeel van de opdracht, is gepoogd om met dit model enkele berekeningen voor de Rijn-Maasmonding uit te voeren om de werking en de consistentie te controleren. Hierbij traden helaas nog problemen op die binnen het tijdsbestek van deze opdracht niet konden worden opgelost. Met iets meer tijd lijken de problemen echter goed oplosbaar.



Figuur 2.8. Morfologische berekening met modules uit SOBEK-RE in de nieuwe SOBEK-lijn (zand).

3 Operationalisering van DELWAQ

3.1 Opzet van het model

3.1.1 Functionaliteit van DELWAQ

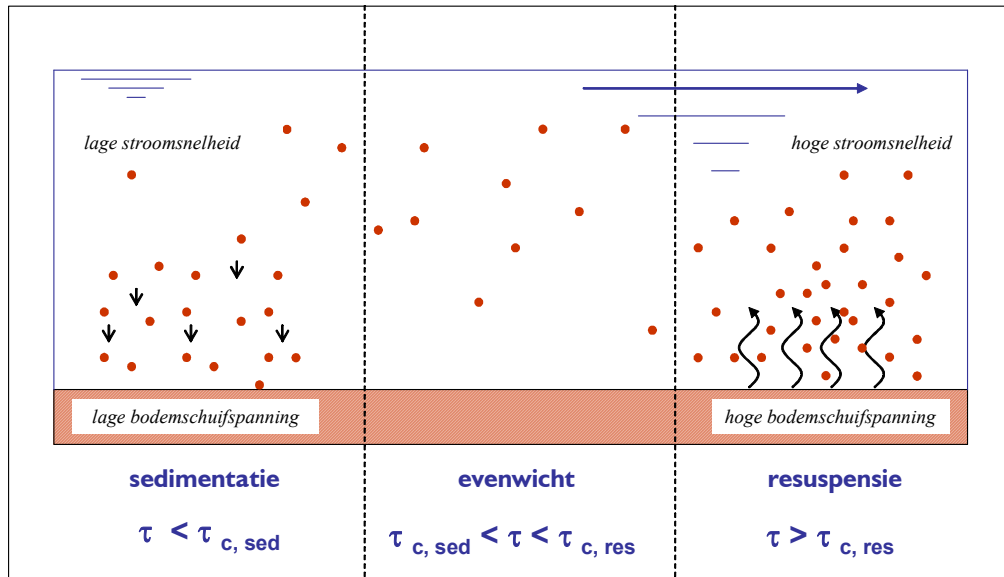
Het uiteindelijk beoogde modelsysteem zal ook naijlende transporten moeten kunnen simuleren met behulp van advection-diffusievergelijkingen. Dergelijke vergelijkingen zijn reeds beschikbaar in SOBEK via de waterkwaliteitsmodule DELWAQ, die functionaliteit biedt voor de berekening van zwevende-stofconcentraties, sedimentatie, erosie en samenstelling en dikte van de sedimentlaag op de bodem. Om na te gaan in hoeverre hiermee transportverschijnselen voor fijn sediment gereproduceerd kunnen worden, wordt DELWAQ hier geoperationaliseerd en toegepast voor de Rijn-Maasmonding.

In DELWAQ kan het zwevende stoftransport berekend worden met de formulerings van Krone en Partheniades. Hierin 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 zwevende-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 3.1. Uitgebreidere procesbeschrijvingen zijn te vinden in Bijlage A van een recente studie voor zwevende-stofmodellering in de Rijn-Maasmonding en de nevengeulen bij Gameren (WL | Delft Hydraulics, 2005).

In rivieren maakt men gewoonlijk binnen het zwevende transport (*suspended load*) onderscheid tussen spoeltransport (*washload*) en transport van bodemmateriaal (*suspended bed-material load*). Dit onderscheid bestaat niet in DELWAQ en is in getijderivieren en estuaria ook niet meer zinvol, omdat het spoeltransport van de rivieren hier tot afzetting kan komen.



Figuur 3.1. Sedimentatie en resuspensie als functie van de bodemschuifspanning.

3.1.2 Randvoorwaarden

Metingen van het zwevende-stofgehalte in de Rijn-Maasmonding zijn schaars. Daarom heeft Rijkswaterstaat RIZA relaties afgeleid tussen het zwevende-stofgehalte en het rivierdebiet (Snippen et al, 2005). Deze zijn gebruikt voor het afleiden van de randvoorwaarden in de Lek, de Waal en de Maas. Voor de periode 1995-2001 zijn met deze relaties tijdreeksen op dagbasis afgeleid uit afvoergegevens en in het model ingevoerd.

Voor de Maas is de relatie:

$$ZS_{Lith} = 10,57 + 0,000015456 \times Q_{Lith}^{2,247} \quad (3-1)$$

waarin:

$$\begin{aligned} ZS_{Lith} &= \text{zwevende-stofconcentratie in de Maas bij Lith (mg/l)} \\ Q_{Lith} &= \text{Maasdebiet bij Lith (m}^3\text{/s)} \end{aligned}$$

Het Maasdebiet voor de desbetreffende periode is overgenomen uit het bestaande hydrodynamische model voor de Rijn-Maasmonding.

De relatie voor de Lek bij Hagestein koppelt het zwevende-stofgehalte ter plaatse niet aan de Lekafvoer maar aan het debiet op de Bovenrijn bij Lobith:

$$ZS_{Hagestein} = -5,14 + 0,0000702 \times Q_{Lobith}^{1,645} \quad (3-2)$$

waarin:

$$\begin{aligned} ZS_{Hagestein} &= \text{zwevende-stofconcentratie in de Lek bij Hagestein (mg/l)} \\ Q_{Lobith} &= \text{Bovenrijnafvoer bij Lobith (m}^3\text{/s)} \end{aligned}$$

Voor de afvoeren bij Lobith zijn daggemiddelde waarden gebruikt voor de periode van 1995 tot 2001.

Voor de Waal wordt het zwevende-stofgehalte niet aan een afvoer gerelateerd, maar aan het zwevende-stofgehalte in de Bovenrijn:

$$ZS_{Vuren} = -34 + 6,07 \times ZS_{Lobith}^{0,65} \quad (3-3)$$

waarin:

$$\begin{aligned} ZS_{Vuren} &= \text{zwevende-stofconcentratie in de Waal bij Vuren (mg/l)} \\ ZS_{Lobith} &= \text{zwevende-stofconcentratie in de Bovenrijn bij Lobith (mg/l)} \end{aligned}$$

Het zwevende-stofgehalte bij Lobith volgt uit de afvoer bij Lobith volgens een relatie die beschreven staat in Bijlage B van Visser & Snippen (2002):

$$ZS_{Lobith} = \beta \cdot (\alpha \cdot Q_{Lobith} + \gamma) \times 10^3 \quad (3-4)$$

met

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{coëfficiënt: } \alpha = 1,455 \cdot 10^{-5} \text{ kgs/m}^6 \\ \beta &= \text{relatieve aandeel van slib in zwevende stof, normaal gesproken op 0,62 gesteld} \\ &\quad \text{maar in deze opdracht gelijk aan 1,00 om het totale zwevende-stofgehalte te} \\ &\quad \text{bepalen} \\ \gamma &= \text{coëfficiënt: } \gamma = 32 \cdot 10^{-3} = \text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

De factor β in deze relatie is aangepast om het totale zwevende-stofgehalte te berekenen, dus het gehalte aan zowel slib als fijn zand.

Figuur 3.2 toont voor het jaar 1998 de met deze relaties berekende zwevende-stofconcentraties in Maas, Lek, Waal en Bovenrijn. De concentraties in de Maas, de Lek en de Waal zijn als randvoorwaarden aan het model opgelegd.

De totale hoeveelheid zwevende stof kent fracties fijn slib, grof slib en fijn zand. Ludikhuizen & Ruijgh (1989) hebben voor de verdelingen van deze fracties de volgende relaties opgesteld:

$$\frac{ZS_{fijnslib}}{ZS_{totaal}} = 0,475 - 0,275 \times \frac{Q_{Lobith}}{10000} \quad (3-5)$$

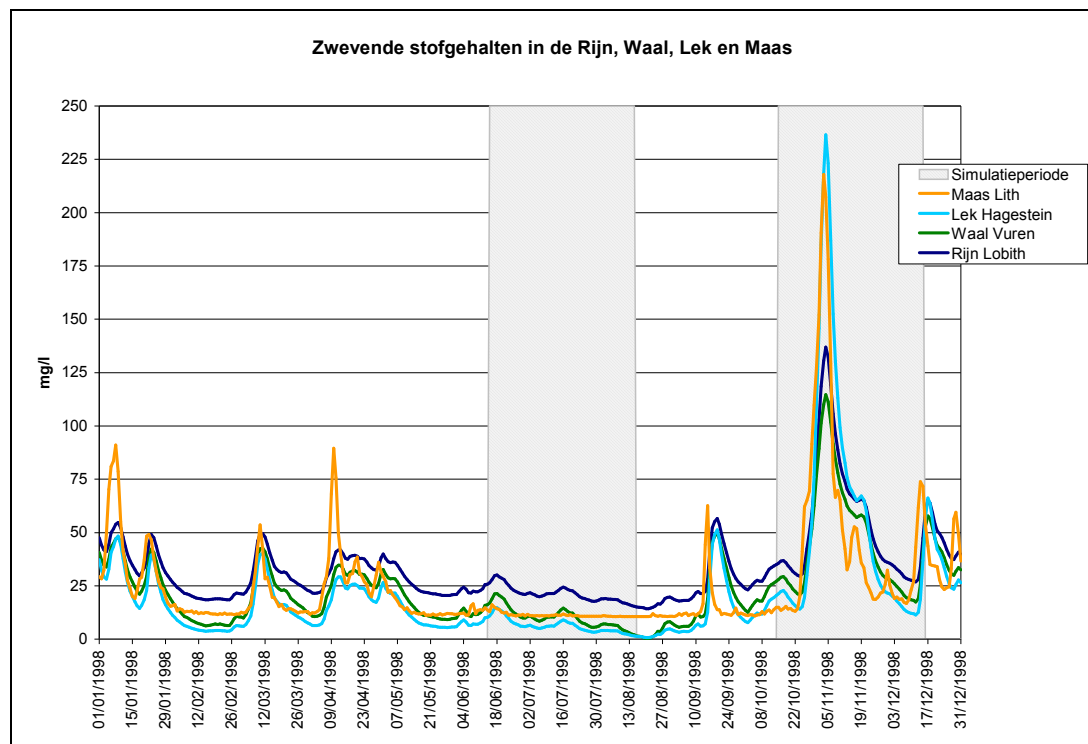
$$\frac{ZS_{grofslib}}{ZS_{totaal}} = 0,475 - 0,275 \times \frac{Q_{Lobith}}{10000} \quad (3-6)$$

$$\frac{ZS_{fijnzand}}{ZS_{totaal}} = 0,05 + 0,55 \times \frac{Q_{Lobith}}{10000} \quad (3-7)$$

met

$ZS_{fijn\ slib}$ = concentratie aan fijn slib (mg/l)
 $ZS_{grof\ slib}$ = concentratie aan grof slib (mg/l)
 $ZS_{fijn\ zand}$ = concentratie aan fijn zand (mg/l)
 ZS_{totaal} = totale concentratie aan zwevende stof (mg/l)

Aangenomen is dat deze fractieverdeling te Lobith ook geldt in de Waal en in de Lek. Voor de Maas is een constante fractieverdeling aangehouden van 40% fijn slib, 40% grof slib en 20% fijn zand.



Figuur 3.2. Zwevende-stofgehalten (mg/l) in de Maas bij Lith, de Lek bij Hagestein, de Waal bij Vuren en de Bovenrijn bij Lobith.

Voor alle overige modelranden, zoals de Noordzee en afwaterende poldergebieden, is aangenomen dat het zwevende-stofgehalte 10 mg/l bedraagt, verdeeld over 4 mg/l fijn slib, 4 mg/l grof slib en 2 mg/l fijn zand.

3.1.3 Beginvoorwaarden

Bij aanvang van de berekening is in het gehele model een 1 cm dikke sedimentlaag neergelegd die bestaat uit 33% fijn slib, 33% grof slib en 33% fijn zand.

3.1.4 Procescoëfficiënten

De procescoëfficiënten in het model zijn aan een beperkte gevoeligheidsanalyse onderworpen. Hiervoor stonden twee sets waarden ter beschikking:

- *Procescoëfficiënten van Visser & Snippen (2002)*. Deze zijn indertijd gebruikt voor een eendimensionale SOBEK-modellering van de Rijn-Maasmonding. Bij de afleiding van de kritieke schuifspanningen voor sedimentatie en erosie is rekening gehouden met de bekende verspreiding van zand en slib in het gebied bij bepaalde karakteristieke afvoeren;
- *Procescoëfficiënten van WL | Delft Hydraulics (2005)*. Deze zijn door middel van een literatuuronderzoek afgeleid voor een tweedimensionaal model van de Rijn-Maasmonding. Uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat de ruimtelijke erosie- en sedimentatiepatronen weinig veranderen wanneer de coëfficiënten gevarieerd worden binnen het bereik (-25% ... +25%).

Beide sets procescoëfficiënten zijn met het model doorgerekend en zo onderling met elkaar vergeleken (zie Paragraaf 3.2). Tabel 3.1 geeft een overzicht.

Tabel 3.1. Procescoëfficiënten voor het DELWAQ-model van de Rijn-Maasmonding.

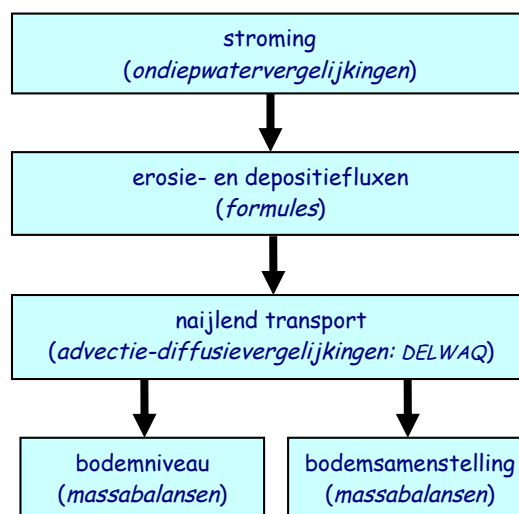
Parameter	Omschrijving	Eenheid	Waarden	
			1D (Visser & Snippen, 2002)	2D (WL Delft Hydraulics, 2005)
VSedIM1	bezinksnelheid fijn slib	m/dag	0,25	0,25
VsedIM2	bezinksnelheid grof slib	m/dag	10	10
VsedIM3	bezinksnelheid fijn zand	m/dag	25	25
TauScIM1	kritieke schuifspanning sedimentatie fijn slib	N/m ²	0,55	0,005
TauScIM2	kritieke schuifspanning sedimentatie grof slib	N/m ²	2,11	0,03
TauScIM3	kritieke schuifspanning sedimentatie fijn zand	N/m ²	4,97	0,1
ZResDM	resuspensieconstante	g/m ² dag	500	500
TauRS1DM	kritieke schuifspanning resuspensie alle fracties	N/m ²	2,11	0,5
RHOIM1	dichtheid fijn slib	kg/m ³	2600	2600
RHOIM2	dichtheid grof slib	g/m ³	2600	2600
RHOIM3	dichtheid fijn zand	g/m ³	2600	2600
PORS1	porositeit sedimentlaag	-	0,80	0,80

Wat opvalt in Tabel 3.1 is dat de kritieke schuifspanningen voor resuspensie en sedimentatie in de twee modellen veel van elkaar verschillen. In het eendimensionale model zijn ze veel hoger dan in het tweedimensionale model. De reden hiervan is dat de stroomsnelheden en schuifspanningen in een eendimensionaal model over de breedte gemiddeld zijn, zodat lokaal in het dwarsprofiel optredende lagere waarden niet worden weergegeven. Om dan toch sedimentatie te verkrijgen, moet met een hogere kritieke schuifspanning voor sedimentatie gewerkt worden. Een tweedimensionaal model geeft wel lokaal in het dwarsprofiel optredende lagere waarden weer en kent daardoor ook bij lagere kritieke schuifspanningen aan de bodem al sedimentatiegebieden.

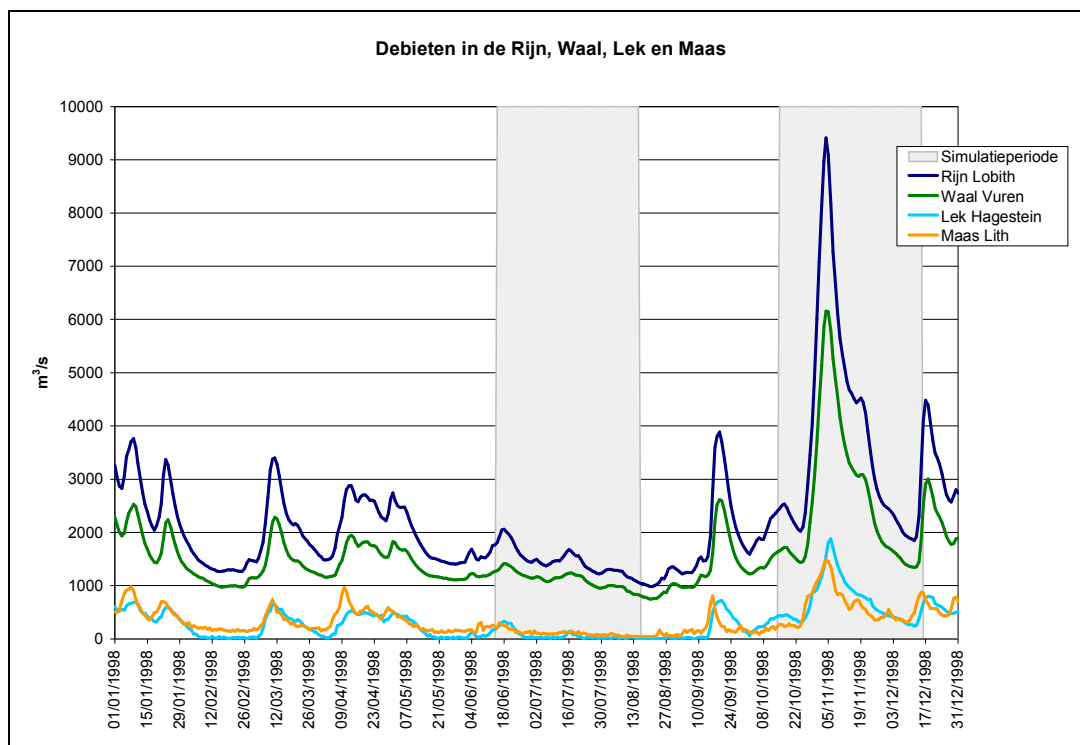
De kritieke schuifspanning voor sedimentatie van fijn zand is in het eendimensionale model bewust hoger gekozen dan de kritieke schuifspanning voor resuspensie. Dit betekent dat bij stroomsnelheden tussen 0,5 en 0,75 m/s fijn zand sedimenteert, terwijl ondertussen alle fracties ook eroderen. De procesformulering in het model moet hier volgens Ludikhuize (zie ook Ludikhuize & Ruijgh, 1989) niet worden vergeleken met de werkelijk in de natuur voorkomende processen. Het is een rareiteit die alleen optreedt in de overgangsgebieden van zand naar slib in Nieuwe Merwede, Beneden Merwede, Bergsche Maas en Amer. Toch is een fysische onderbouwing van deze procesformulering mogelijk. In het genoemde snelheidsbereik komt het namelijk voor, met name in de Nieuwe Merwede, dat de toppen van de op de bodem aanwezige bodemvormen eroderen terwijl tegelijkertijd fijn zand sedimenteert in de troggen. Het eendimensionale model van Snippen & Visser (2002) is indertijd onder meer afgeregeld op het wel of niet optreden van sedimentatie in het Hollandsch Diep, afhankelijk van de afvoer. Om de erosie- en sedimentatieprocessen kloppend te krijgen moesten de waarden van de coëfficiënten in de Nieuwe Merwede en de Amer bij bepaalde afvoeren erosie en bij andere afvoeren sedimentatie bewerkstelligen (Hugtenburg, 2005).

3.1.5 Simulaties

Figuur 3.3 toont de structuur van de simulaties met de combinatie van DELWAQ en het nieuwe SOBEK-model. Een terugkoppeling van bodemveranderingen naar de stroming ontbreekt hierin. Op deze manier zijn een zomerperiode en een herfstperiode in 1998 doorgerekend. De zomerperiode liep van 15 juni tot 15 augustus, de herfstperiode van 15 oktober tot 15 december. De zomerperiode kenmerkt zich door lage afvoeren en lage zwevende-stofgehalten. In de herfstperiode trad een afvoergolf op met Bovenrijnafvoeren boven 9000 m³/s en hoge zwevende-stofgehalten. Figuur 3.4 toont de bijbehorende debietverlopen. De debieten van de Maas, de Lek en de Waal zijn als randvoorwaarden aan het model opgelegd.



Figuur 3.3. Semi-morfologische berekening met de combinatie van DELWAQ en de nieuwe SOBEK-lijn (slib).



Figuur 3.4. Debieten (m^3/s) in de Maas bij Lith, de Lek bij Hagestein, de Waal bij Vuren en de Bovenrijn bij Lobith.

Voor elke periode is een simulatie gemaakt met waarden voor de procescoëfficiënten volgens zowel Visser & Snippen (2002) als WL | Delft Hydraulics (2005). Dit leidt tot de vier simulaties in Tabel 3.2.

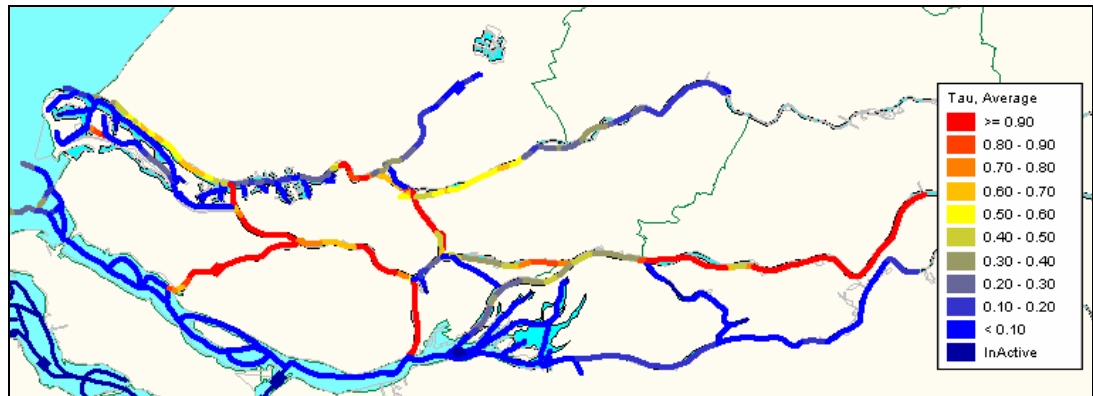
Tabel 3.2. Overzicht van modelsimulaties.

Periode in 1998	Waarden van procescoëfficiënten	
	Visser & Snippen (2002)	WL Delft Hydraulics (2005)
15 juni – 15 augustus	Simulatie 1	Simulatie 2
15 oktober – 15 december	Simulatie 3	Simulatie 4

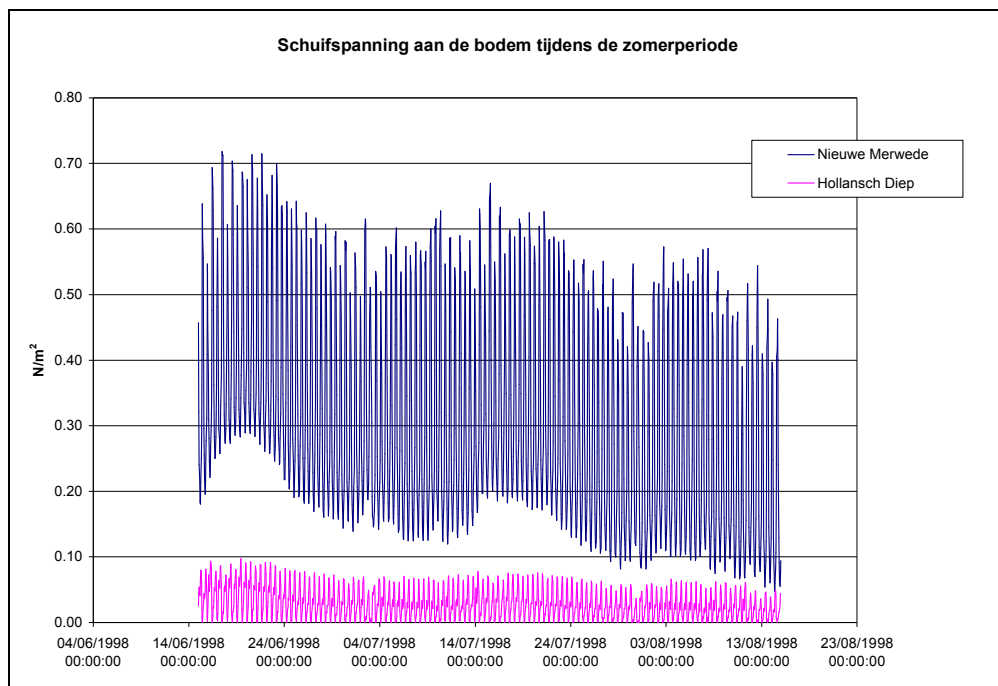
3.2 Simulatieresultaten

3.2.1 Schuifspanningen aan de bodem

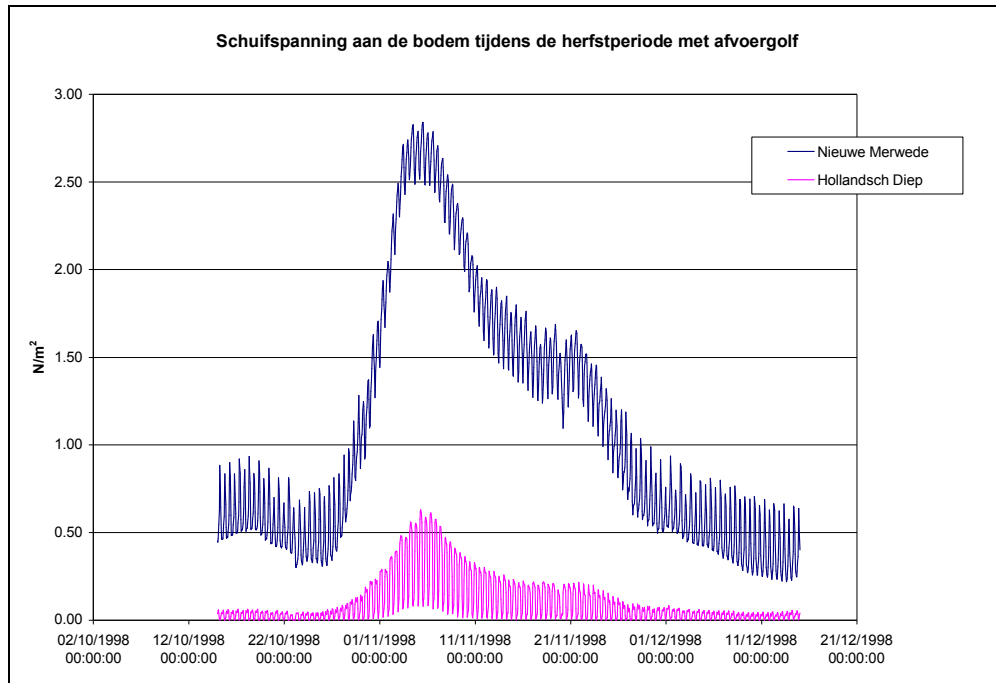
Figuur 3.5 toont de berekende ruimtelijke verdeling van de gemiddelde bodemschuifspanning tijdens de zomerperiode met lage afvoeren. Op het traject Waal – Nieuwe Merwede – Hollandsch Diep is een duidelijke gradiënt zichtbaar. Deze is echter deels een artefact, omdat de schuifspanningen in het gebied door getij-invloed sterk kunnen variëren in de tijd. Daarom is het van belang om met het getij rekening te houden. Figuren 3.6 en 3.7 tonen voor twee locaties het verloop van de bodemschuifspanning in de tijd in respectievelijk de droge zomer en de natte herfst van 1998.



Figuur 3.5. Gemiddelde bodemschuifspanning (N/m^2) in de Rijn-Maasmonding tijdens de zomerperiode van 15 juni tot 15 augustus 1998.



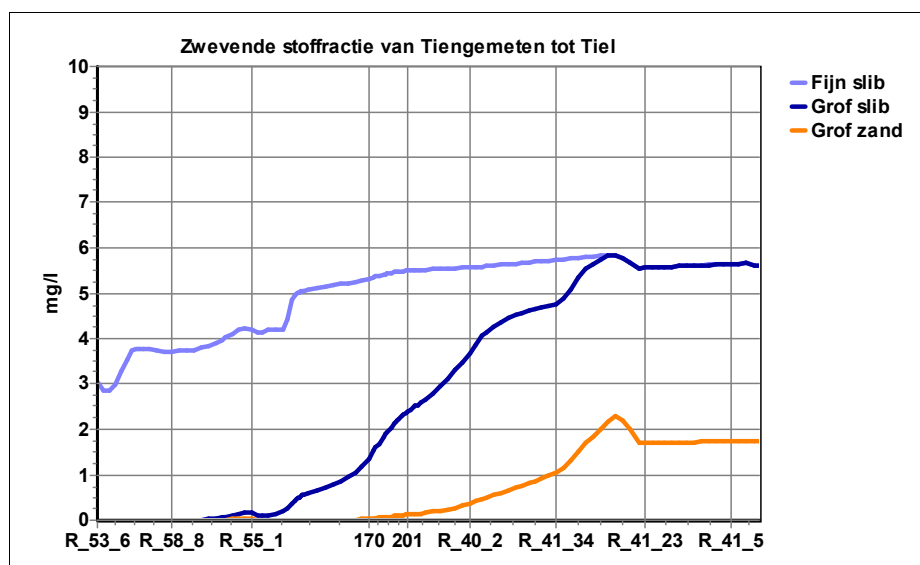
Figuur 3.6. Verloop van bodemschuifspanning (N/m^2) in Nieuwe Merwede bij Werkendam en Hollandsch Diep bij Moerdijk tijdens de zomerperiode van 15 juni tot 15 augustus 1998.



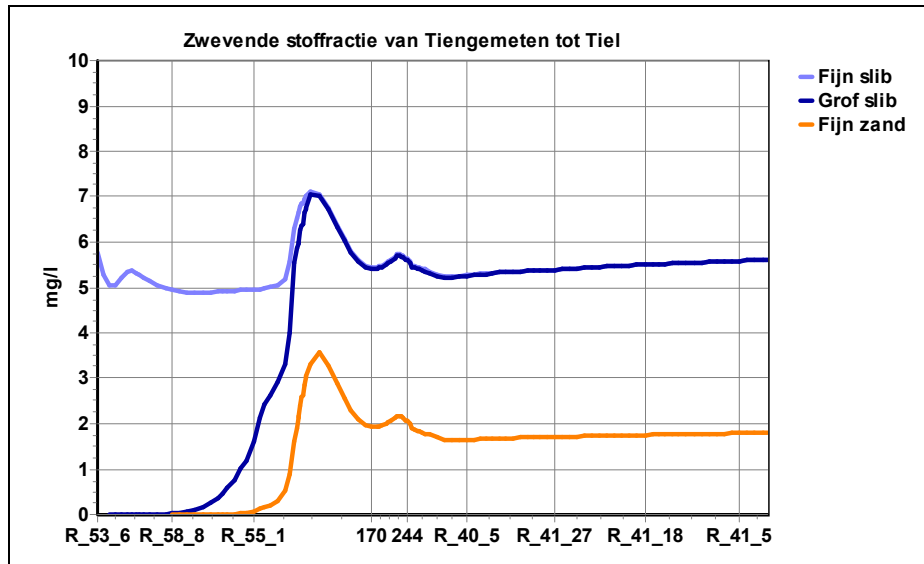
Figuur 3.7. Verloop van bodemschuifspanning (N/m^2) in Nieuwe Merwede bij Werkendam en Hollandsch Diep bij Moerdijk tijdens de herfstperiode van 15 oktober tot 15 december 1998.

3.2.2 Concentraties zwevende stof

Figuren 3.8 en 3.9 tonen de berekende ruimtelijke concentratieverdelingen van de drie fracties zwevende stof op 15 juli 1998 op het traject Waal – Nieuwe Merwede – Hollandsch Diep – Haringvliet tussen Tiel en Tiengemeten. Figuur 3.8 is gebaseerd op de procescoëfficiënten volgens Visser & Snippen (2002), Figuur 3.9 op de procescoëfficiënten volgens WL | Delft Hydraulics (2005).



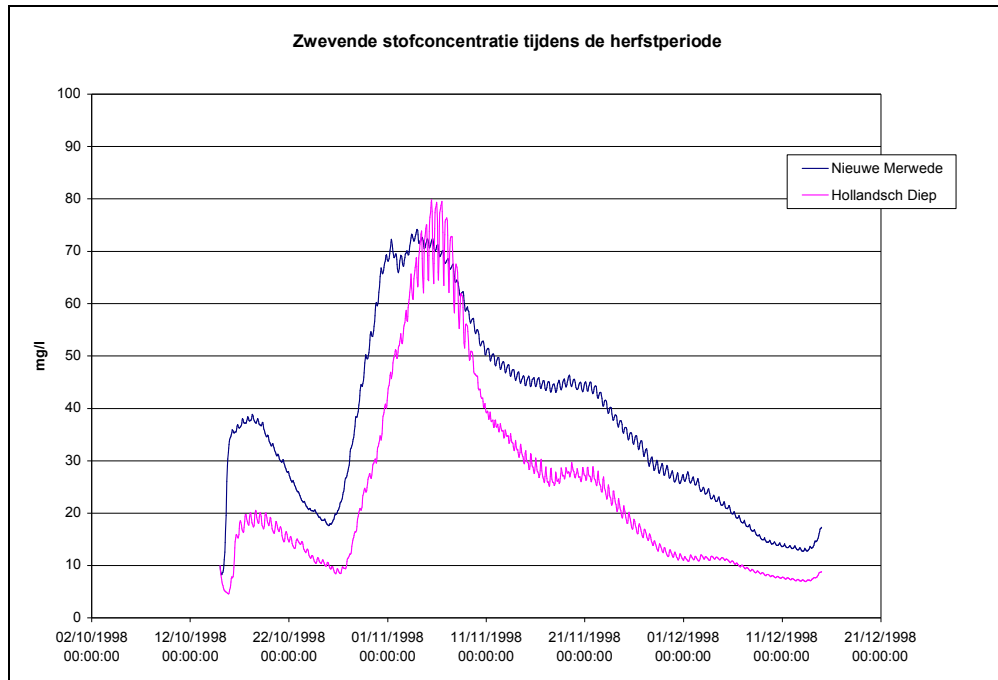
Figuur 3.8. Verdeling van concentraties fijn slib, grof slib en fijn zand (mg/l) op 15 juli 1998 tussen Tiel (rechts) en Tiengemeten (links) uit berekening met procescoëfficiënten volgens Visser & Snippen (2002).



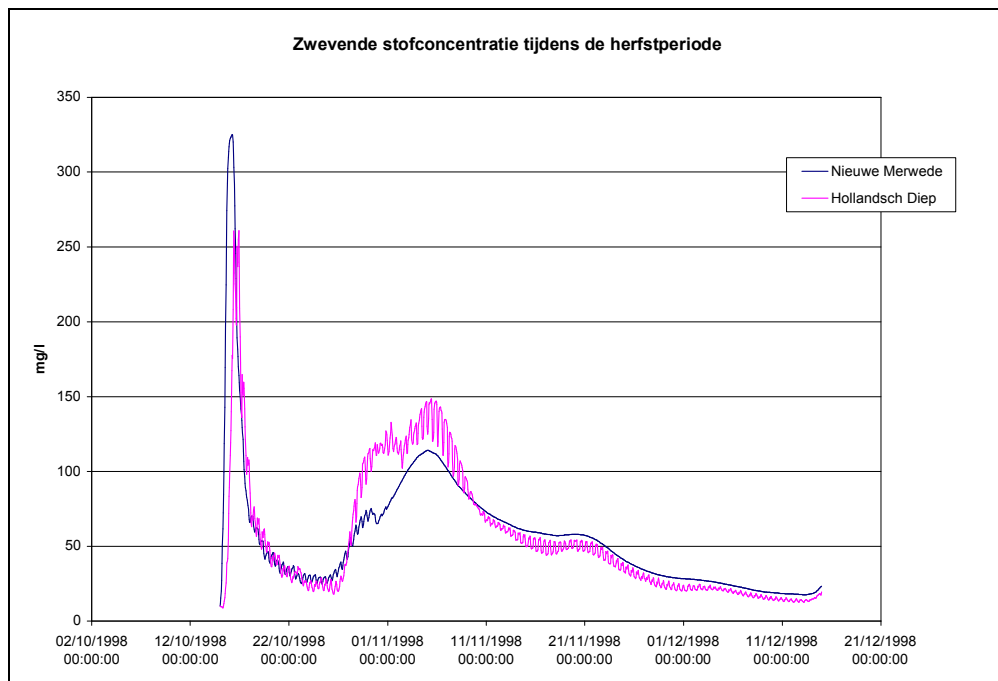
Figuur 3.9. Verdeling van concentraties fijn slib, grof slib en fijn zand (mg/l) op 15 juli 1998 tussen Tiel (rechts) en Tiengemeten (links) uit berekening met procescoëfficiënten volgens WL | Delft Hydraulics (2005).

De procescoëfficiënten van Visser & Snippen (2002) leiden tot een geleidelijke sortering van het materiaal. Het fijne zand bezinkt in de Waal, het grove slib bezinkt in de Waal en de Nieuwe Merwede en het fijne slib bezinkt slechts voor een deel, vooral in het Hollandsch Diep en het Haringvliet. De procescoëfficiënten van WL | Delft Hydraulics (2005) leiden echter tot een tamelijk abrupte sedimentatie van grof slib en fijn zand ter hoogte van het Hollandsch Diep. Stroomopwaarts blijven het grove slib en het fijne zand in suspensie. Het fijne slib bezinkt nauwelijks en blijft overal in suspensie.

Figuren 3.10 en 3.11 tonen voor twee locaties het berekende verloop van de zwevende-stofconcentratie tijdens de herfstperiode van 15 oktober tot 15 december 1998. Figuur 3.10 is gebaseerd op de procescoëfficiënten volgens Visser & Snippen (2002), Figuur 3.11 op de procescoëfficiënten volgens WL | Delft Hydraulics (2005). In Figuur 3.11 schiet de zwevende-stofconcentratie aan het begin van de simulatie fors omhoog door erosie van de sliblaag, die initieel in de hele Rijn-Maasmonding op een dikte van 1 cm was gesteld. Dit is een inspeleffect. In het algemeen leiden de coëfficiënten van WL | Delft Hydraulics (2005) tot hogere concentraties aan zwevende stof.



Figuur 3.10. Verloop van zwevende-stofconcentraties (mg/l) tijdens de herfstperiode in Nieuwe Merwede bij Werkendam en Hollandsch Diep bij Moerdijk uit berekening met procescoëfficiënten volgens Visser & Snippen (2002).

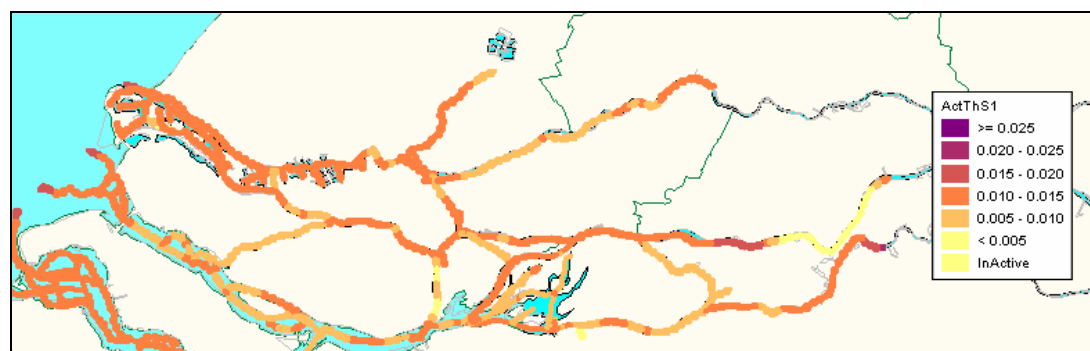


Figuur 3.11. Verloop van zwevende-stofconcentraties (mg/l) tijdens de herfstperiode in Nieuwe Merwede bij Werkendam en Hollandsch Diep bij Moerdijk uit berekening met procescoëfficiënten volgens WL | Delft Hydraulics (2005).

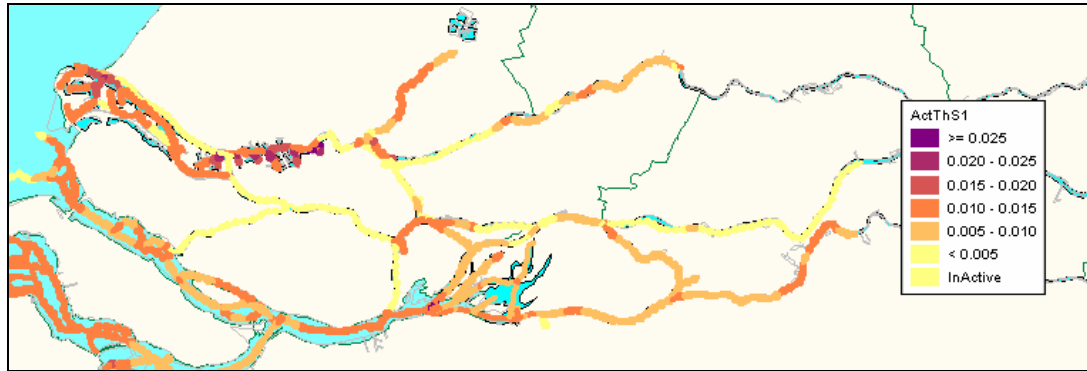
3.2.3 Dikte van sliblaag op de bodem

De simulatie voor de zomerperiode is op 15 juni 1998 gestart met in het hele gebied een uniforme sliblaag van 1 cm. Figuren 3.12 en 3.13 tonen de berekende dikte van de sliblaag aan het einde van de zomerperiode, op 15 augustus 1998. Figuur 3.12 is gebaseerd op de procescoëfficiënten volgens Visser & Snippen (2002), Figuur 3.13 op de procescoëfficiënten volgens WL | Delft Hydraulics (2005). De coëfficiënten van Visser & Snippen leiden tot het ontstaan van een uniforme sliblaag in het hele gebied. Met de coëfficiënten van WL | Delft Hydraulics erodeert echter de initieel in het gebied aanwezige 1 cm slib op diverse plaatsen, terwijl sedimentatie optreedt in het Hollandsch Diep en het Rotterdamse havengebied.

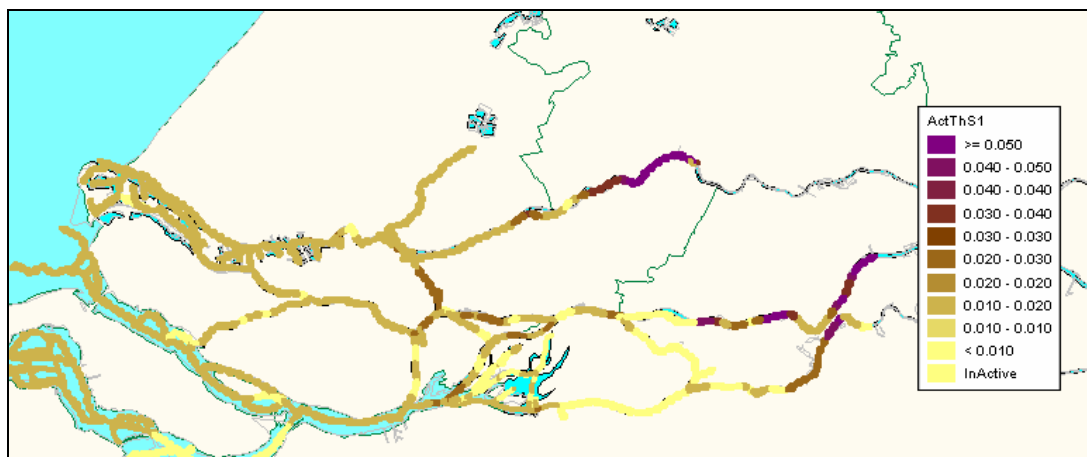
Ook voor de herfstperiode vanaf 15 oktober 1998 is de simulatie gestart met in het hele gebied een uniforme sliblaag van 1 cm. Figuren 3.14 en 3.15 tonen de berekende dikte van de sliblaag aan het einde van de herfstperiode, op 15 december 1998. Figuur 3.14 is gebaseerd op de procescoëfficiënten volgens Visser & Snippen (2002), Figuur 3.15 op de procescoëfficiënten volgens WL | Delft Hydraulics (2005). De coëfficiënten van Visser & Snippen geven de meeste bezinking in het gebied. Het meeste sediment bezinkt vrijwel onmiddellijk nadat dit het model is binnengestroomd. Dit leidt tot dikke sliblagen vlakbij de bovenranden in Lek, Waal en Maas, een aanwijzing dat de kritieke schuifspanningen van Visser & Snippen (2002) eigenlijk te hoog zijn. Met de coëfficiënten van WL | Delft Hydraulics wordt het sediment vooral afgezet in het Hollandsch Diep, de Biesbosch en het Rotterdamse havengebied. In de bovenstroomse rivierarmen treedt geen sedimentatie op. Het is echter aannemelijk dat de kritieke schuifspanningen van WL | Delft Hydraulics (2005) voor dit eendimensionale model eigenlijk te laag zijn, omdat ze zijn overgenomen uit een tweedimensionaal model.



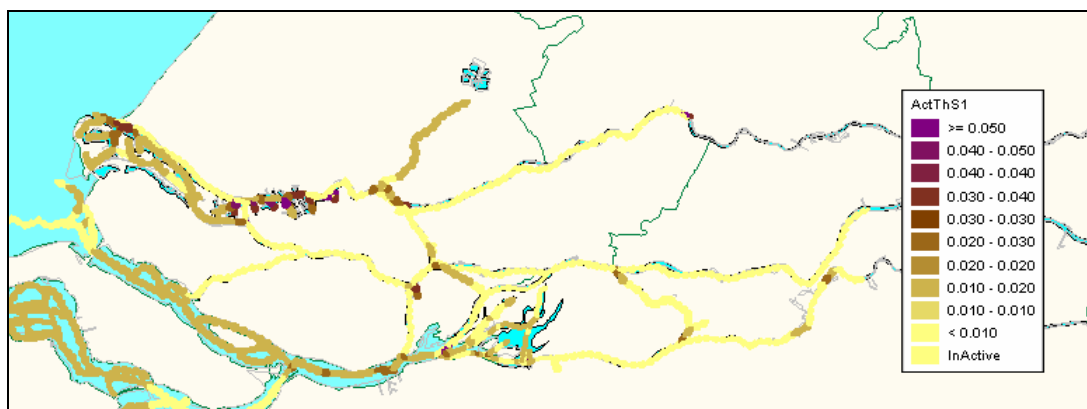
Figuur 3.12. Dikte van sliblaag (m) op de bodem op 15 augustus 1998 uit berekening met procescoëfficiënten volgens Visser & Snippen (2002), uitgaande van een 1 cm dikke sliblaag op 15 juni 1998.



Figuur 3.13. Dikte van sliblaag (m) op de bodem op 15 augustus 1998 uit berekening met procescoëfficiënten volgens WL | Delft Hydraulics (2005), uitgaande van een 1 cm dikke sliblaag op 15 juni 1998.



Figuur 3.14. Dikte van sliblaag (m) op de bodem op 15 december 1998 uit berekening met procescoëfficiënten volgens Visser & Snippen (2002), uitgaande van een 1 cm dikke sliblaag op 15 oktober 1998.



Figuur 3.15. Dikte van sliblaag (m) op de bodem op 15 december 1998 uit berekening met procescoëfficiënten volgens WL | Delft Hydraulics (2005), uitgaande van een 1 cm dikke sliblaag op 15 oktober 1998.

4 Overwegingen voor verdere ontwikkeling

4.1 Inleiding

In de Rijn-Maasmonding komen zowel zand als slib voor in de bodem (b.v. Van Dreumel, 1995; Snippen et al, 2005). De bodem van het bovenstroomse deel bestaat vooral uit niet-cohesief zand, terwijl de bodem van het benedenstroomse deel vooral uit slib bestaat. Verder zijn er overgangsgebieden tussen het zanddeel en het slibdeel, zoals de Nieuwe Merwede, waarin zowel zand als slib voorkomen.

In het op SOBEK gebaseerde morfologische model voor het gebied is tot nu toe alleen het zandtransport meegenomen en is geen rekening gehouden met slib (b.v. Mol, 2003). Dit heeft tot gevolg dat het model alleen voor het zanddeel van het gebied kan worden gebruikt. In een groot deel van het gebied speelt slib een essentiële rol en is het model dus niet van toepassing. Om het model voor de hele Rijn-Maasmonding te kunnen toepassen is het noodzakelijk dat het model wordt uitgebreid met functionaliteit voor slibtransport. Verder is het noodzakelijk dat het model naast de bodemligging ook de bodemsamenstelling berekent in termen van de zand-slibverhouding.

4.2 Transportformuleringen voor zand

Zand en slib verschillen onderling fundamenteel in de manier waarop hun transport van de stroming afhangt. Het transport van zand wordt bepaald door de capaciteit van de stroming om het zand rollend, springend of zwevend mee te voeren. Hoe harder het stroomt, des te meer zand er getransporteerd wordt. Dit wordt beschreven met semi-empirische sedimenttransportformules die in feite formules zijn voor de sedimenttransportcapaciteit. Ze koppelen in het algemeen een dimensieloze Einsteinparameter voor transportcapaciteit Φ aan een dimensieloze Shieldsparameter voor de door de stroming uitgeoefende schuifspanning θ op de bodem:

$$\Phi = \Phi(\theta) \quad (4-1)$$

met

$$\theta = \frac{\tau_b}{\rho g \Delta D} \quad (4-2)$$

$$\Phi = \frac{q_s}{\sqrt{g \Delta D^3}} \quad (4-3)$$

waarin:

D	=	korreldiameter van sediment (m)
g	=	zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
q_s	=	sedimenttransportcapaciteit per eenheid van breedte (m^2/s)
Δ	=	relatieve soortelijke massa van sediment onder water: $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$ (-)
θ	=	Shieldsparameter (-)
ρ	=	soortelijke massa van water (kg/m^3)
ρ_s	=	soortelijke massa van sediment (kg/m^3)
τ_b	=	bodemschuifspanning (N/m^2)
Φ	=	Einsteinparameter (-)

Strikt genomen past het daadwerkelijk optredende zandtransport zich met enige vertraging aan aan de transportcapaciteit, maar in grootschalige riviermorfologische beschouwingen kan deze naijling worden verwaarloosd, zodat het daadwerkelijk optredende transport gelijk gesteld kan worden aan q_s . Voor het fijnere zand van de Rijn-Maasmonding voldoet een exponentiële relatie tussen de Einstein- en de Shieldsparameter

$$\Phi = a\theta^b \quad (4-4)$$

waarin de exponent b de mate van niet-lineariteit weerspiegelt en de coëfficiënt a nog kan afhangen van de hydraulische ruwheden van bodemribbels en individuele zandkorrels. In morfologische berekeningen beïnvloedt de coëfficiënt a alleen de snelheid waarmee morfologische veranderingen zich voltrekken, terwijl de exponent b een grote invloed heeft op de morfologische vormen en patronen die ontstaan.

Voor stationaire uniforme stroming bestaat een rechtstreeks verband tussen de bodemschuifspanning τ_b en de over de diepte gemiddelde stroomsnelheid u :

$$\tau_b = \rho g \frac{u^2}{C^2} \quad \text{en dus} \quad \theta = \frac{u^2}{C^2 \Delta D} \quad (4-5)$$

waarin:

C	=	Chézycoëfficiënt voor hydraulische ruwheid ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
u	=	dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)

Bij lokaal verhoogde turbulentie of sterke wervels, zoals bijvoorbeeld bij kribkoppen, is τ_b overigens groter dan uit deze relatie volgt. De relatie maakt het mogelijk om de sedimenttransportformule te schrijven als een relatie tussen het daadwerkelijk optredende zandtransport en de over de diepte gemiddelde stroomsnelheid:

$$q_s = mu^n \quad (4-6)$$

met

$$m = \frac{ag^{1/2}}{C^n \Delta^{(n-1)/2} D^{(n-3)/2}} \quad (4-7)$$

$$n = 2b \quad (4-8)$$

Een bekend voorbeeld is de formule van Engelund & Hansen (1967) met $a = 0,05.C^2/g$ en $n = 5$. De exponent n ligt voor zandtransport in de regel tussen 3 en 5. Dat betekent dat een 10% hogere stroomsnelheid leidt tot 30 à 60% meer zandtransport. Dat hoeft op zich overigens nog geen erosie te veroorzaken, omdat tegelijkertijd de zandaanvoer van bovenstrooms toe kan nemen. Alleen als gradiënten in de stroming maken dat de transporten van plaats tot plaats verschillen, zal erosie of aanzanding optreden. Dit is de essentie van het concept voor zandtransport en morfologie in SOBEK.

4.3 Transportformuleringen voor slib en zand-slibmengsels

4.3.1 Inleiding

Slib kan bestaan uit silt en lutum. Silt laat zich nog evenals zand karakteriseren met korrelgroottes, maar voor lutum is vooral de mineralogische samenstelling van belang. Bij lutum zijn korrelgroottes irrelevant voor erosie en variabel voor transport en sedimentatie. In het laatste geval kunnen kleideeltjes immers tot grotere vlokken samenkiten. Zijn de te verwachten vlokafmetingen bekend, dan kunnen op korrelgrootte of valsnelheid gebaseerde concepten voor transport en sedimentatie toch goed op kleideeltjes worden toegepast.

Voor slibtransport is meestal niet de transportcapaciteit van de stroming maar het aanbod van slib de beperkende factor. Transportcapaciteitformules als die voor zand spelen daarom bij slib geen rol, al kan voor de siltfractie van slib soms nog een uitzondering gemaakt worden. Zolang niet specifiek *fluid mud* beschouwd wordt, kijkt men bij slib niet naar bodemtransport maar uitsluitend naar zwevend transport. Het gaat dan om de depositie- en erosieflux voor de uitwisseling tussen de bodem en de waterkolom. Depositie treedt op wanneer de bodemschuifspanning onder een bepaalde kritieke waarde ligt en erosie treedt op als de bodemschuifspanning een kritieke waarde overschrijdt. De kritieke bodemschuifspanning voor erosie ligt hoger dan die voor depositie. Dat feit alleen al laat zien dat het gebruik van een transportcapaciteit als functie van de bodemschuifspanning problematisch is. Ook een formulering van de transportcapaciteit als functie van de slibconcentratie geeft problemen, omdat erosie vaak niet van de concentratie afhangt.

Van Ledden (2003) is waarschijnlijk de eerste die een morfodynamisch model heeft geformuleerd voor de situatie waarbij in de bodem zand-slibmengsels kunnen voorkomen. Hij modelleert zandtransport en slibtransport apart, waarbij de samenstelling van de bodem een cruciale rol voor beide speelt. In het buitenland zijn er ook onderzoekers die het transport van silt op dezelfde manier als het transport van zand modelleren op basis van een transportcapaciteit.

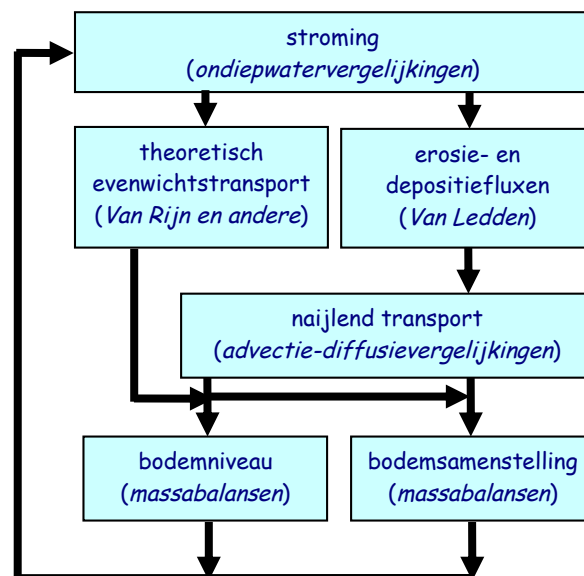
Geïnspireerd door deze onderzoekers heeft Van Rijn onlangs zijn bekende zandtransporttheorie (Van Rijn, 1984a,b,c) uitgebreid, zodat zij voor zowel fijn als grof sediment kan worden gebruikt (Van Rijn 2005a, 2005b, 2005c, Van Rijn et al., 2005).

In de volgende twee subparagrafen worden de theorieën van respectievelijk Van Ledden en Van Rijn in het kort beschreven. Vervolgens wordt in de subparagraaf daarna aangegeven hoe de twee theorieën eventueel kunnen worden gecombineerd en geïmplementeerd in de SOBEK-software.

4.3.2 Zand-slibmodel van Van Ledden

Om de grootschalige zand-slibsegregatie in estuaria en zeegaten te begrijpen en te voorspellen, heeft Van Ledden (2003) een morfodynamisch model ontwikkeld waarin zowel het zandtransport als het slibtransport zijn meegenomen. Het model is geïmplementeerd in een onderzoeksversie van het Delft3D-systeem en toegepast op verschillende geschematiseerde en realistische gevallen. De modelformuleringen zijn nu uitgewerkt voor twee- en driedimensionale modellen, maar kunnen ook worden gebruikt voor eendimensionale modellering.

Figuur 4.1 illustreert hoe zijn model in berekeningen gebruikt zou moeten worden. Voor zand alleen bestaan er zowel transportmodellen als morfodynamische modellen (Figuur 1.1). Voor slib alleen is er nog geen morfodynamisch model bekend. Men rekent hooguit de initiële patronen van erosie en sedimentatie uit nadat het slibtransportveld is berekend (Figuur 3.3). In het model van Van Ledden worden het zandtransport en het slibtransport samen gemodelleerd.



Figuur 4.1. Morfologische berekening met het zand-slibmodel van Van Ledden (slib, zand, grind).

Een sleutelement in Van Ledden's model is een erosieformulering voor zand-slibmengsels. Het model houdt er rekening mee dat het erosiegedrag van zand-slibmengsels dramatisch kan veranderen wanneer een kleine hoeveelheid slib wordt toegevoegd aan een zandbodem of een kleine hoeveelheid zand aan een slibbodem. Daarvoor introduceert Van Ledden een classificatie voor het gedrag van zand-slibmengsels die gebaseerd is op geschikte parameters voor cohesie en de netwerkstructuur van deze mengsels. Volgens deze classificatie gaat de bodem over van niet-cohesief naar cohesief gedrag bij een lutumpercentage van 5-10%. Maar om praktische redenen wordt een kritiek slibpercentage gebruikt in plaats van een kritiek lutumpercentage, gebruik makend van het feit dat de lutum-siltverhouding in de slibfractie van een bepaald watersysteem vaak constant is. Bij niet-cohesieve bodem wordt de erosie van de zandfractie gemodelleerd volgens de 'oude' sedimenttransporttheorie van Van Rijn (1984a,b,c), waarbij de kritieke bodemschuifspanning afhankelijk wordt gesteld van het slibpercentage. De erosieflux van de slibfractie volgt dan uit het slibpercentage aan het oppervlak van de bodem. Voor cohesieve bodem wordt een erosieformulering vergelijkbaar met die van Krone-Partheniades gebruikt, waarbij zowel de kritieke bodemschuifspanning als de erosieparameters afhankelijk zijn van de zand-slibverhouding aan het oppervlak van de bodem.

Het model houdt rekening met de tijdsafhankelijke en de ruimtelijke (horizontale en verticale) variaties in het slibpercentage. De module voor de bodemsamenstelling is gebaseerd op de massabalans van de zand- en de slibfracties. De bodemsamenstelling verandert in de tijd door erosie en depositie van beide fracties aan het bodemoppervlak en door menging van sediment in de bodem. Een verticale diffusiecoëfficiënt karakteriseert deze menging, die wordt beïnvloed door zowel fysische processen (zoals beweging van beddingvormen) als biologische processen (bioturbatie).

4.3.3 Sedimenttransportformules van Van Rijn

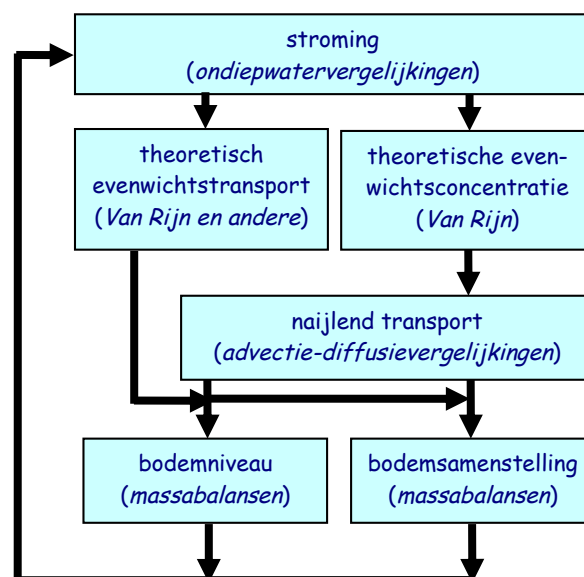
Ruim twintig jaar geleden ontwikkelde Van Rijn een zandtransporttheorie voor rivierstromingen. Met deze theorie kan men het bodemtransport (Van Rijn, 1984a), het zwevend transport (Van Rijn, 1984b) en de bodemruwheid (Van Rijn, 1984c) voorspellen aan de hand van eigenschappen van de stroming en de zandbodem. De theorie is niet van toepassing voor sediment fijner dan 63 μm (slib). Onlangs heeft Van Rijn deze theorie in twee opzichten uitgebreid. Ten eerste is de theorie geschikt gemaakt voor een veel breder scala van sedimentkorrelgroottes, namelijk van silt tot grind. Ten tweede is de theorie zodanig uitgebreid dat zij ook voor de kustzone kan worden gebruikt waar ook getijstroming en korte golven van belang zijn. De nieuwe theorie van Van Rijn, die inmiddels in het Delft3D-systeem is geïmplementeerd, is beschreven in vier artikelen die ter publicatie zijn aangeboden bij het ASCE Journal of Hydraulic Engineering. Deel 1 (Van Rijn, 2005a) behandelt het begin van beweging, de bodemruwheid en het bodemtransport. Deel 2 (Van Rijn, 2005b) behandelt het zwevende transport. Gegradeerd sediment, dat kan bestaan uit mengsels van silt, zand en grind, wordt behandeld in deel 3 (Van Rijn, 2005c). Deel 4 (Van Rijn et al, 2005) beschrijft de implementatie van de theorie in Delft3D met een aantal voorbeelden van toepassingen.

Voor het eendimensionale morfologische model van de Rijn-Maasmonding is vooral de eerste uitbreiding van belang, namelijk het voor silt toepasbaar maken van de formules voor bodemtransport en de capaciteit van zwevend transport.

Van groot belang is ook de manier waarop de formules kunnen worden toegepast voor mengsels van verschillende sedimentfracties (“multi-fractiemodel”).

Voor een gedetailleerde beschrijving van de theorie wordt verwezen naar de vier artikelen van Van Rijn. Hier volgen slechts enkele opmerkingen:

- De theorie is naar verhouding veel beter getest voor grof sediment dan voor fijn sediment, waarschijnlijk vanwege de beschikbaarheid van data;
- De theorie betreft alleen sediment grover dan 8 μm . De sedimentfractie kleiner dan 8 μm is niet in beschouwing genomen. Dit geldt ook voor het multi-fractiemodel voor gegradeerd sediment. Het nadrukkelijke verschil tussen niet-cohesieve en cohesieve bodems dat Van Ledden (2003) hanteert, komt in deze theorie niet terug. Volgens Van Ledden is het juist de lutumfractie, met korrelgroottes kleiner dan 5 μm , die het verschil uitmaakt tussen cohesief en niet cohesief gedrag;
- Voor het zwevende transport berekent de transportformule de lokale transportcapaciteit die niet per se gelijk hoeft te zijn aan het werkelijke transport. Bij zwevend transport is namelijk de naijling van belang, zodat het transport niet alleen afhangt van de lokale instantane omstandigheden, maar ook van de omstandigheden in het verleden en bovenstrooms. Van Rijn et al (2005) schrijven dat dit effect moet worden meegenomen door het gebruik van de advectie-diffusievergelijking, waarbij de theorie wordt gebruikt voor het bepalen van de bodemrandvoorwaarde. Dit leidt tot het stroomschema in Figuur 4.2. Alleen als de lengte- en tijdschalen van het probleem veel groter zijn dan de aanpassingslengte en –tijd voor de sedimentconcentratie, geldt bij benadering dat het daadwerkelijk optredende transport gelijk is aan de transportcapaciteit.

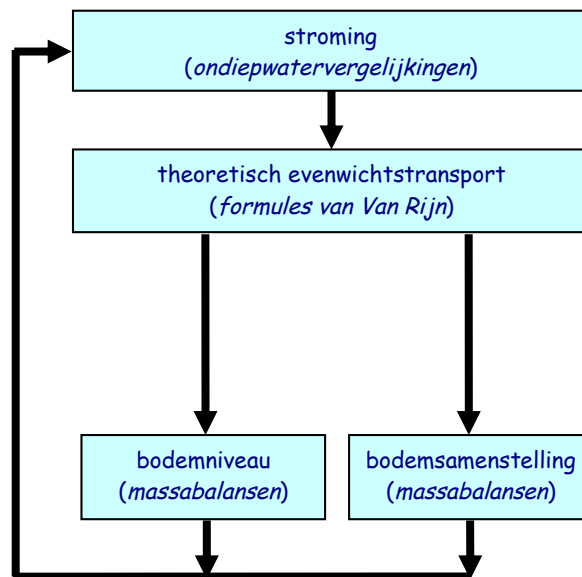


Figuur 4.2. Morfologische berekening met het zand-slibmodel van Van Rijn (slib, zand, grind).

4.3.4 Implementatie in SOBEK

Geadviseerd wordt om een combinatie van het model van Van Ledden en de theorie van Van Rijn in te bouwen in het nieuwe morfologische SOBEK-model voor de Rijn-Maasmonding. Dit advies is gebaseerd op de volgende overwegingen:

- De theorie van Van Rijn alleen is niet voldoende om tot een morfodynamisch model te komen, omdat deze geen formulering bevat voor de bodemsamenstelling. Voor de bodemsamenstelling zijn de formuleringen van Van Ledden direct te gebruiken als het sediment slechts in een zandfractie en een slibfractie wordt verdeeld. Bij gebruik van meer dan twee fracties moet het model worden uitgebreid, maar een dergelijke uitbreiding is al eerder geïmplementeerd in SOBEK voor gegradeerd sediment met betrekking tot mengsels van zand en grind;
- Een voordeel van het sedimenttransportmodel van Van Rijn ten opzichte van de formulering van Van Ledden is dat deze beter aansluit bij de bestaande modelformulering. Het model gaat ervan uit dat een transportcapaciteit kan worden gedefinieerd, ook voor de fijne fractie van het sediment. Dit maakt het mogelijk het model in stappen te implementeren, eerst alleen met de transportformules en later met een module voor het zwevende sedimenttransport op basis van een advection-diffusievergelijking voor de sedimentconcentratie. De eerste stap leidt tot het stroomschema in Figuur 4.3. Alleen voor gevallen waarbij de lengte- en tijdschalen van het probleem veel groter zijn dan de aanpassingslengte en -tijd voor de sedimentconcentratie is de eerste versie van het model van toepassing. De aanpassingslengte en -tijd liggen respectievelijk in de orde Uh/w_s en h/w_s , waarbij U de gemiddelde stroomsnelheid is, h de waterdiepte en w_s de valsnelheid van sedimentkorrels. Voor de slibfractie zal het er in de praktijk op neerkomen dat de advection-diffusievergelijking voor sedimentconcentratie altijd nodig is. Toch is het aan te bevelen de implementatie in stappen uit te voeren. Ten eerste is de eerste stap van de implementatie relatief eenvoudig. Ten tweede kan men door het model na de eerste implementatiestap toe te passen al een idee krijgen over de potentiële toepasbaarheid van het model, door te analyseren in hoeverre het model in staat is de verschijnselen op grote ruimte- en tijdschalen weer te geven;
- Bij het model van Van Ledden is het oplossen van de advection-diffusievergelijkingen voor de zand- en slibconcentraties noodzakelijk, omdat de formulering geen transportcapaciteit voor slib kent. Een voordeel van het model van Van Ledden is wel dat Nederlandse watersystemen bij de formulering van het model als referentiegebieden zijn gebruikt. Het model is al met succes toegepast voor een aantal Nederlandse gebieden, inclusief de Rijn-Maasmonding in een sterk geschematiseerde vorm. Het model van Van Rijn is daartegen alleen getest tegen data uit de Yangtze en de Gele Rivier in China. Van Rijn's model is niet toegepast voor sedimentfracties fijner dan $8\ \mu\text{m}$, die volgens Van Ledden (2003) juist van cruciaal belang zijn voor het erosiegedrag van de bodem. De toepasbaarheid van Van Rijn's nieuwe transportformules op de Rijn-Maasmonding staat dus nog niet 100% vast en zal nog nader getest moeten worden.



Figuur 4.3. Snel te realiseren morfologische berekening met evenwichtstransport volgens Van Rijn (slib, zand, grind).

Geadviseerd wordt om de implementatie in drie stappen uit te voeren:

1. Implementatie van Van Rijn's nieuwe transportformules voor bodemtransport en zwevend transport volgens de multi-fractieformulering. Hierbij kan de binnen SOBEK bestaande functionaliteit voor gegradeerd sediment als basis dienen. De stap beperkt zich dan tot een aanpassing van de sedimenttransportformules;
2. Toepassing van het resulterende model op de Rijn-Maasmonding om te testen in hoeverre het model in staat is de grootschalige zand-slibsegregatie te reproduceren. Het model hoeft de veldwaarnemingen nog niet precies te reproduceren, maar moet wel in staat zijn de algemene kenmerken van het systeem weer te geven;
3. Implementatie van de advectie-diffusievergelijkingen voor de sedimentconcentraties. Afhankelijk van de uitkomsten van de test in stap 2 worden voor de uitwisselingen tussen bodem en waterkolom de formuleringen van Van Rijn of Van Ledden gebruikt. Omschakelen tussen de twee methoden is in principe relatief eenvoudig.

De volgende punten zijn voor de implementatie van belang:

- Er moet een oplosser gekozen worden voor de advectie-diffusievergelijkingen voor de sedimentconcentraties, onafhankelijk van de keuze voor Van Ledden's of Van Rijn's model. Hiervoor kan men het beste gebruik maken van een oplosser die al bestaat binnen het SOBEK systeem: (1) de oplosser van DELWAQ die ook in Hoofdstuk 3 voor de slibmodellering in de Rijn-Maasmonding is gebruikt (cf. WL | Delft Hydraulics, 2005), of (2) de oplosser in SOBEK voor zoutgehalten. Gekozen wordt voor DELWAQ, omdat dat het meeste perspectief biedt om te voldoen aan het criterium in Paragraaf 1.3 dat medio 2006 een operationeel model wordt opgeleverd, ervan uitgaande dat voldoende middelen beschikbaar zijn;

- Van Ledden's formulering van de bron-puttermen voor de sedimentuitwisseling tussen bodem en waterkolom moet geschikt gemaakt worden voor eendimensionale modellering. Ook het model van Van Rijn is nog niet direct geschikt voor eendimensionale modellering, omdat daarvoor alle termen moeten worden uitgedrukt in dwarsprofielgemiddelde concentraties in plaats van concentraties dichtbij de bodem. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de formuleringen van Galappatti (1983; zie ook Galappatti & Vreugdenhil, 1985, en Wang, 1989);
- In het algemeen valt af te raden om te proberen allerlei tweedimensionale aspecten, zoals bijvoorbeeld de breedte van de vaarbaan, in een eendimensionaal model weer te geven. Kribvakken verdienen echter speciale aandacht omdat deze een belangrijke rol spelen bij de slibhuishouding in met name de overgangstrajecten tussen zandbodems en slibbodems;
- Een van de mogelijkheden om kribvakken te behandelen kan zijn dat men voor erosie een andere rivierbreedte gebruikt dan voor depositie, namelijk de stroomvoerende of sediment transporterende breedte voor de erosieterm en de bergende of totale breedte voor de depositieterm.

4.4 Ontwikkelijnen voor morfologie met zand en slib in SOBEK

4.4.1 Inleiding

Functionaliteit voor morfologie met zand en slib kan in de nieuwe SOBEK-lijn worden ingebracht door, naast de formuleringen van Van Ledden en Van Rijn, uit te gaan van een combinatie van de modules voor zandtransport en morfologie uit Hoofdstuk 2 en de bestaande DELWAQ-functionaliteit voor slib uit Hoofdstuk 3. De twee te combineren ontwikkelijnen worden in deze paragraaf nader geanalyseerd. Op basis hiervan wordt een aanpak aanbevolen.

De kenmerken van de twee voor de Rijn-Maasmonding relevante ontwikkelijnen voor sedimenttransport en morfologie zijn:

1. *Morfologisch rekenen met de morfologiemodule van SOBEK-RE (Hoofdstuk 2):* De desbetreffende module is nu ingebracht in de nieuwe SOBEK-lijn. De module is geschikt voor het simuleren van transport van zand en grind, maar simuleert niet de naijlingen die optreden bij zwevend transport van fijn sediment zoals silt en lutum. Het is vooral inzetbaar voor simulaties ten behoeve van grootschalig morfologisch gedrag in zandige rivieren, waarbij "grootschalig" duidt op beddingvormen met een lengteschaal in de orde van kilometers. Voor dergelijke toepassingen is de module uitvoerig gevalideerd. De recent gerealiseerde koppeling aan de nieuwe SOBEK-lijn is echter nog weinig toegepast.
2. *Morfologisch rekenen met de DELWAQ-module van SOBEK, die is ontwikkeld voor het modelleren van waterkwaliteitsprocessen (Hoofdstuk 3):* De beschikbare functionaliteit voor transport, dispersie en interactie van zwevende stof leent zich vooral voor het simuleren van het gedrag van fijn sediment zoals silt en lutum. Omdat in de huidige versie van de module de berekende bodemveranderingen niet na iedere morfologische tijdstap worden teruggekoppeld, is DELWAQ strikt genomen geen morfologiemodule.

Desondanks rekent het wel de erosie- en depositiefluxen aan de bodem uit, waardoor het ook informatie levert over de potentiële netto bodemverandering (“semi-morfologische module”). DELWAQ kan met een groot aantal processen (en hun interacties) rekenen, waarvan de concentratie zwevende stof slechts een onderdeel is.

Tabel 4.1 vergelijkt de twee ontwikkellijnen volgens de huidige stand van zaken (november 2005).

Tabel 4.1. Vergelijking tussen twee bestaande ontwikkellijnen voor sedimenttransport en morfologie in SOBEK.

Aspect	Ontwikkellijn voor sedimenttransport en morfologie	
	SOBEK-RE-morfologie in SOBEK	DELWAQ in SOBEK
Terugkoppeling van bodemligging naar waterbeweging	Ja	Nee
Sedimenttransport	Bodemtransport of totaaltransport met transportformule (transportcapaciteit direct afhankelijk van lokale stroomcondities)	Transport van zwevende stof met behulp van advection-diffusievergelijking met termen voor resuspensie en depositie aan de bodem. Zeer beperkte mogelijkheid voor bodemtransport
Invoer door gebruikers	Aansturing vanuit ASCII-file	Aansturing vanuit <i>user interface</i> (via DELWAQ-processen), interactie met andere processen in DELWAQ
Sediment	Zand, grind (één of meerdere fracties)	Fijn zand, slib (één of meerdere fracties)
Numerieke implementatie	1D expliciet numeriek schema voor (gegradeerd) sedimenttransport en advectieve bodemvergelijking in “ <i>channel flow</i> ”	Diverse 1D en 2D numerieke schema’s (bijvoorbeeld <i>finite volume</i>) voor advection-diffusieproces in zowel “ <i>channel flow</i> ” als 2D inundatiemodellering

Tabel 4.1 maakt onderscheid tussen bodemtransport en zwevend transport. Het onderscheid uit zich in de op te lossen vergelijkingen. De morfologische processen in een 1D model worden beschreven met behulp van de volgende continuïteitsvergelijking voor de totale hoeveelheid sediment (de som van alle sedimentfracties):

$$(1 - \varepsilon_p) W_s \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial S_b}{\partial x} + \left[\frac{\partial A C_s}{\partial t} + \frac{\partial Q C_s}{\partial x} \right] = S_{lat} \quad (4-9)$$

waarin:

A	=	doorstroomoppervlak (m ²)
C_s	=	volumeconcentratie zwevende stof (-)
H	=	waterdiepte (m)
Q	=	afvoer (m ³ /s)
S_b	=	bodemtransport volgens transportformule zonder poriën (m ³ /s)
S_{lat}	=	interne sedimentbron of -put (baggeren, suppletie of laterale in- of uitstroming) (m ² /s)
W_s	=	sedimenttransporterende breedte (m)
z_b	=	over transportbreedte gemiddelde bodemligging (m+NAP)
ε_p	=	porositeit (-)

Het gedeelte tussen haken in vergelijking (4.9) is de bijdrage van het zwevend sediment aan de bodemverandering.

Het eerste deel van vergelijking (4.9) wordt ook wel de Exner-vergelijking genoemd, die voor situaties met bodemtransport en totaaltransport in principe zowel in SOBEK-RE als in DELWAQ wordt toegepast.

Voor zwevend sediment rekent DELWAQ met de volgende advection-diffusievergelijking:

$$\frac{\partial AC_s}{\partial t} + \frac{\partial QC_s}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) = s_{bron} \quad (4-10)$$

waarin:

D = diffusiecoëfficiënt (m²/s)

s_{bron} = bronterm voor zwevend sediment per eenheid van lengte (m²/s)

Deze vergelijking wordt niet alleen toegepast voor de over de waterdiepte gemiddelde concentratie, maar ook voor het volume van iedere fractie afzonderlijk die zich in de bodem bevindt. Voor de bodemlagen wordt op deze wijze de concentratie mede bepaald door processen als “*burial*”, “*digging*” en bioperturbatie. Indirect volgt hieruit per tijdstap de netto aanzanding en erosie voor de fijne fracties. Met deze aanpak is vergelijking (4.9) alleen nog relevant voor de fracties die als bodemtransport worden gesimuleerd.

Het advection-diffusiegedrag van zwevend sediment kan relevant worden geacht wanneer de beschouwde lengteschalen kleiner zijn dan de aanpassingslengte van de zwevendestofconcentratie. Bijvoorbeeld met een valsnelheid van 0,3 mm/s, zal bij een waterdiepte van 10 m en een stroomsnelheid van 1 m/s de lengteschaal ruwweg in de orde van 30 km liggen. Dergelijke condities zijn kenmerkend voor de Rijn-Maasmonding. Modelberekeningen met roosterafstanden in de orde van 1 km worden dan het best uitgevoerd door rekening te houden met het suspensiegedrag.

4.4.2 Voor- en nadelen van bestaande ontwikkelingen

Voor beide ontwikkelingen zijn voor- en nadelen te noemen in relatie tot de toepassing op de Rijn-Maasmonding. Deze hangen samen met de problematiek waarvoor het instrument is bedoeld (bijvoorbeeld bevaarbaarheid of verontreiniging van de waterbodem), de beheersvraag die moet worden beantwoord (bijvoorbeeld vergroten veiligheid of verbeteren van kwaliteit), en de technische aspecten (bijvoorbeeld numerieke implementatie, *user interface*).

De aan de nieuwe SOBEK-lijn gekoppelde morfologiemodule uit SOBEK-RE heeft als belangrijk voordeel dat deze de morfologische veranderingen terugkoppelt naar de stromingsberekening. Daarentegen zijn de beperkte integratie in de *user interface*, wat leidt tot onvoldoende gebruiksgemak, en het ontbreken van functionaliteit voor zwevendestofmodellering belangrijke nadelen. Tabel 4.2 somt een aantal belangrijke voor- en nadelen op.

Tabel 4.2. Voor- en nadelen van morfologiemodule uit SOBEK-RE.

Morfologiemodule uit SOBEK-RE	
Voordelen	Nadelen
Koppeling bodemligging en waterbeweging op iedere tijdstap. Na iedere bodemverandering rekent SOBEK de aangepaste waterbeweging opnieuw uit	De modules blijven gescheiden (ondanks de koppeling) en hebben niet dezelfde numerieke schema's. Vooral het versprongen rooster voor de waterbeweging vereist interpolaties in de koppeling
Ruime keuze aan sedimenttransportformules (bodemtransport en totaaltransport) en gerelateerde processen	Invoer via ASCII-file en niet via de <i>user interface</i> van SOBEK. Bediening is daardoor lastig
Rekenen met gegradeerd sediment kan met behulp van het opdelen van de zeebkromme in klassen, met medenemen van interacties tussen de fracties ("<i>hiding and exposure</i>")	Rekenen met gegradeerd sediment is alleen bedoeld voor zand-grindmengsels en strekt zich niet uit tot slib
De gegradeerd-sedimentoptie biedt de mogelijkheid de bodem in lagen op te delen waarbij een boekhoudsysteem de samenstelling bijhoudt	In het toegepaste lagenconcept voor gegradeerd sediment is de uitkomst erg gevoelig voor de gekozen dikte van de transportlaag (toplaag)
Gebruik van een morfologische factor om de morfologie te voorspellen is mogelijk door verhoging van de kalibratiefactor van de transportformule (echter met beperkingen)	In de koppeling met SOBEK kunnen de vroegere quasi-stationaire aanpak en estuariumaanpak met getijmiddelingen niet meer worden toegepast
Het modelconcept geeft de in morfologie veel voorkomende discontinue oplossingen met hoge resolutie weer (strakke fronten)	Het modelconcept is niet eenvoudig uit te breiden naar 2 dimensies (ten behoeve van toepassing in "<i>overland flow</i>")

Voor morfologische simulaties met de DELWAQ-module is op dit moment nog geen terugkoppeling van bodemveranderingen naar stromingsberekeningen mogelijk. Het model leent zich echter wel voor de zwevend-transportaspecten die belangrijk zijn bij fijn zand en slib. Daarnaast is de module volledig geïntegreerd in de laatste SOBEK-versie en dus ook aan te sturen via de *user interface*. Tabel 4.3 noemt de voor- en nadelen die van toepassing zijn op DELWAQ bij gebruik voor morfologische berekeningen.

Tabel 4.3. Voor- en nadelen van de semi-morfologische module in DELWAQ.

Semi-morfologische module in DELWAQ	
Voordelen	Nadelen
DELWAQ is flexibel toe te passen voor zowel 1D ("<i>channel flow</i>") als 2D ("<i>overland flow</i>") simulaties in SOBEK	Met DELWAQ berekende erosie en depositie worden niet teruggekoppeld naar de waterbewegingsberekening (hetzelfde geldt voor bodemruwheid).
Zwevende-stofconcentratie wordt beschouwd als een waterkwaliteitsproces en biedt daardoor de mogelijkheid allerlei interacties met andere waterkwaliteitsprocessen te simuleren (inclusief verontreinigingen en ecologische processen)	Hoewel zand en slib tegelijk gesimuleerd kunnen worden, zijn specifieke zand-slibinteracties als het effect van zand op de resuspensie van slib en vice versa nog niet aanwezig
Het modelconcept is gebaseerd op oplossing van een advectie-diffusiemodel voor de zwevende-stofconcentratie. Het is daarmee bij uitstek geschikt voor modellen van fijn zand en slib	De advectie-diffusieaanpak leent zich minder goed voor bodemtransport (oplossen van de "<i>vergelijking van Exner</i>"). Dit vergt wellicht een aangepaste numerieke aanpak. Verder zijn er weinig keuzemogelijkheden in het te gebruiken suspensiemodel (beschikbaar is Krone-Partheniades)
DELWAQ is volledig geïntegreerd in de <i>user interface</i> van SOBEK. Daarmee zijn gebruikersvriendelijkheid en afstemming met hydraulica gewaarborgd	Uitbreiding van de module vraagt niet alleen een investering in het rekenhart, maar ook in de <i>user interface</i>

Semi-morfologische module in DELWAQ	
Voordelen	Nadelen
In DELWAQ kan gebruik worden gemaakt van een lagenmodel met boekhouding van eigenschappen in de lagen. Het concept hiervoor wijkt echter af van dat van SOBEK-RE	Bij toepassing van meerdere lagen kan alleen van een in de tijd vaste laagdikte worden uitgegaan. Veranderingen door bijvoorbeeld consolidatie zijn dan nog niet beschouwd

4.4.3 Conclusie ten aanzien van implementatie

Beide ontwikkellijnen zijn van belang voor de Rijn-Maasmonding. Aanbevolen wordt om de ontwikkelingen voor de Rijn-Maasmonding vooral te concentreren op de DELWAQ-module, gegeven het belang van zwevende-stofconcentraties en zand-slibproblematiek. Daarbij is het van belang om de bodemfluxen en bodemveranderingen uit de DELWAQ-module terug te koppelen naar de waterbewegingsberekening. Er wordt van uitgegaan dat hiervoor onderdelen of ervaringen van de toepassing van de morfologiemodule uit SOBEK-RE gebruikt kunnen worden. In de volgende paragraaf wordt inhoudelijk dieper ingegaan op de acties die nodig zijn om morfologie met zandtransport via DELWAQ te realiseren. Zolang dit echter nog niet volledig gerealiseerd is, dient de morfologiemodule uit SOBEK-RE te worden behouden en onderhouden.

4.5 Modelleren van zandtransport binnen DELWAQ

Voor uitbreiding van DELWAQ met functionaliteit voor zandtransport vergen verschillende aspecten nog verdere ontwikkeling. Het gaat daarbij om aspecten ten aanzien van de koppeling, de sedimenttransportprocessen en het numerieke rekenschema.

Aspecten ten aanzien van de koppeling

- De koppeling tussen DELWAQ en de stromingsberekening met SOBEK dient flexibel en efficiënt te zijn. Hiervoor zou bij voorkeur gebruik gemaakt moeten worden van de OpenMI-architectuur. OpenMI biedt een protocol voor een expliciete beschrijving, definitie en dataoverdracht tussen componenten die parallel rekenen. Het concept wordt ontwikkeld en toegepast in het kader van het HarmonIT-project dat wordt uitgevoerd met EU-financiering. Uit reeds bestaande ervaringen met terugkoppelingen tussen SOBEK en DELWAQ (bijvoorbeeld ten aanzien van sturing van kunstwerken en vegetatieruwheid) is geconcludeerd dat hierbij ook het effect van rekentijd een belangrijk criterium is;
- De morfologische veranderingen zijn te berekenen uit de depositie- en erositermen (eventueel transportgradiënten) in DELWAQ. Het ligt voor de hand deze berekening al binnen de DELWAQ-module uit te voeren in plaats van het doorgeven van depositie- en erositermen aan SOBEK. De resultaten bepalen niet alleen de bodemverandering, maar ook de bodemsamenstelling die wordt opgenomen in de bodemadministratie van de DELWAQ-module;
- De wijze waarop bodemveranderingen vanuit DELWAQ ingevoerd worden in het SOBEK-profiel zijn nog een bron van zorg. In SOBEK-RE was slechts sprake van twee mogelijkheden: een uniforme bodemverandering over de gehele sediment-transporterende breedte of een evenredig met de waterdiepte verdeelde bodemverandering voor ieder punt in het dwarsprofiel. Een meer generieke aanpak voor y,z-

profielen zou kunnen worden gebaseerd op een “stroken-aanpak” waarbij voor ieder segment in een dwarsprofiel de bodemverandering evenredig is aan de “*conveyance*” van dat segment. De *conveyance* K_j is een maat voor de afvoercapaciteit die in SOBEK als volgt gedefinieerd is:

$$Q_j = K_j i^{1/2} \quad \text{met} \quad K_j = C_j A_j R_j^{1/2} \quad (4-11)$$

waarin:

A_j	=	doorstroomoppervlak van segment j (m^2)
C_j	=	Chézycoëfficiënt van segment j ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
i	=	energieverhang of waterspiegelverhang (-)
K_j	=	<i>conveyance</i> of afvoercapaciteit van segment j (m^3/s)
R_j	=	hydraulische straal van segment j (m)

Aspecten ten aanzien van sedimenttransportprocessen

- De uitbreiding van DELWAQ met sedimenttransportformules is eenvoudig, en in een aantal gevallen wellicht met de open processenbibliotheek van DELWAQ, snel te realiseren. In principe kan elke modelleur zelf processen toevoegen en hiermee experimenteren. In de processenbibliotheek kunnen combinaties van processen en coëfficiënten naar wens aan- en uitgeschakeld worden. Aandacht verdienen het hanteren van een lagensysteem in de bodem en de interacties tussen verschillende sedimentfracties, zoals de blootstellingscorrectie voor niet-cohesief gegradeerd sediment (“*hiding and exposure*”);
- De modelconcepten voor fijn zand en zand-slibmengsels in Paragraaf 4.3 zijn grotendeels gebaseerd op 3D concepten en moeten dus nog geschikt gemaakt worden voor een 1D model.

Numerieke aspecten

- De gewenste terugkoppeling van morfologie naar stroming vereist een robuust en stabiel numeriek schema dat voorkomt dat de oplossing wordt verstoord door ongewenste oscillaties of ongewenste numerieke damping. Met name in situaties met zandtransport is sprake van een sterk niet-lineaire interactie tussen stroomsnelheid en sedimenttransport. De oplossingen worden gekenmerkt door migrerende banken en schokgolven in de bodemligging. De numerieke oplossingsmethode moet in staat zijn hiermee om te gaan. Een complicatie is ook dat de rekenroosters van DELWAQ en de waterbewegingsberekening in SOBEK verschillen, waardoor het niet mogelijk is standaardmethoden in te zetten.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Product in 2005

Op basis van een onlangs voor de nieuwe SOBEK-lijn beschikbaar gekomen schematisatie van het Noordelijk en het Zuidelijk Deltabekken, zijn morfologische modellen gemaakt met transportformuleringen voor zowel zand als slib. Voor zandtransport zijn daartoe de riviermorfologische modules uit het oude SOBEK aangepast en in de nieuwe lijn opgenomen. Voor slibtransport is DELWAQ aan het nieuwe SOBEK-model gekoppeld.

Hoewel de opdracht alleen een model voor het Noordelijk Deltabekken (Rijn-Maasmonding) betrof, is het Zuidelijk Deltabekken in de schematisatie gehandhaafd. Dit laatste deel kan eventueel worden verwijderd, maar dan moet wel bekend zijn welke randvoorwaarden ter plaatse van de snede moeten worden opgegeven.

De waterbeweging is geijkt op basis van de resultaten van het oude SOBEK-model. Daarbij is voor de meeste takken een goede weergave van de debietverlopen bereikt. Een uitzondering vormen de resultaten voor de Schelde en de Westerschelde, maar die behoren ook tot het Zuidelijk Deltabekken en niet tot de Rijn-Maasmonding. De waterstanden stemmen minder goed overeen dan de debieten. In het nieuwe model zijn ze ongeveer 10 tot 15 cm lager dan in het oude model. Verder zijn in het nieuwe model de maximum vloeddebieten kleiner en de maximum ebdebieten groter dan in het oude model.

De morfologische modules van het oude SOBEK-model zijn geschikt gemaakt voor de nieuwe SOBEK-lijn en vervolgens in deze nieuwe SOBEK-lijn opgenomen. De eerste berekeningen voor de Rijn-Maasmonding liepen echter nog vast en het lukte niet om dat probleem binnen het tijdsbestek van deze opdracht op te lossen. De problemen lijken echter met iets meer tijd oplosbaar.

Het is goed mogelijk gebleken om zwevend-sedimentberekeningen te maken met DELWAQ als onderdeel van het nieuwe SOBEK. De kritieke schuifspanningen voor resuspensie en sedimentatie vergen echter nog een betere kalibratie. De hoge kritieke schuifspanningen voor sedimentatie van Visser & Snippen (2002) veroorzaken teveel sedimentatie nabij de bovenranden van het model in de Lek, de Waal en de Maas. Het is echter waarschijnlijk dat de lage waarden van WL | Delft Hydraulics (2005) de sedimentatie in het gebied onderschatten en de erosie overschatten.

Verschillende transportformuleringen voor slib en zand-slibmengsels zijn geëvalueerd. Tevens is geanalyseerd wat de mogelijkheden zijn om eventueel zandtransport en morfologie onder te brengen in DELWAQ. Op basis daarvan is een advies opgesteld voor een verdere implementatie van transportconcepten voor zand en slib in het SOBEK-model voor de Rijn-Maasmonding. Dit leidt tot het hierna volgende advies voor de te nemen vervolgstappen in 2006.

5.2 Advies voor vervolgstappen in 2006

Geadviseerd wordt om het nieuwe morfologische model voor de Rijn-Maasmonding verder te ontwikkelen in de volgende vier stappen:

1. Implementatie van Van Rijn's nieuwe transportformules voor bodemtransport en zwevend transport volgens de multi-fractieformulering. Hierbij kan de binnen SOBEK bestaande functionaliteit voor gegradeerd sediment als basis dienen. Het model rekent dan met de evenwichtsconcentraties zonder het advection-diffusiegedrag. De eerste stap beperkt zich zo tot een aanpassing van de sedimenttransportformules;
2. Toepassing van het resulterende model op de Rijn-Maasmonding om te testen in hoeverre het model in staat is de grootschalige zand-slibsegregatie te reproduceren. Het model hoeft de veldwaarnemingen nog niet precies te reproduceren, maar moet wel in staat zijn de algemene kenmerken van het systeem weer te geven;
3. Implementatie van de advection-diffusievergelijkingen voor de sedimentconcentraties door DELWAQ te combineren met een terugkoppeling van bodemveranderingen naar de stroming. Verwacht wordt dat nog enige ontwikkeltijd nodig is om een goede terugkoppeling te realiseren;
4. Inbouw van een combinatie van de formuleringen van Van Ledden en Van Rijn voor slib en zand-slibmengsels. Afhankelijk van de uitkomsten van de test in stap 2 worden voor de uitwisselingen tussen bodem en waterkolom de formuleringen van Van Rijn of Van Ledden gebruikt. Omschakelen tussen de twee methoden is in principe relatief eenvoudig.

De bodemmodule in DELWAQ biedt de mogelijkheid te rekenen met onderlagen met variabele samenstelling. De functionaliteit is vergelijkbaar met de bodemlagenaanpak in SOBEK-RE, maar niet geheel identiek. Ook door van Ledden is een alternatieve aanpak ontwikkeld. Aanbevolen wordt hier aandacht aan te besteden en een goede keuze te maken voor een aanpak voor het afhandelen van de bodemsamenstelling.

Deze aanpak is helemaal gericht op het ontwikkelen van een procesgebaseerd, eendimensionaal model van de Rijn-Maasmonding dat op basis van de waterbeweging voorspellingen kan doen ten aanzien van de ontwikkeling in de tijd van de bodemhoogte en de bodemsamenstelling. Dit geeft de rivierbeheerder een instrument om inzicht te krijgen in het morfologische systeem en de relatie tussen ingrepen en effecten op bodemligging en -samenstelling op een grof schaalniveau. Het op termijn voorziene samensmelten van DELWAQ met de functionaliteit van de morfologische modules uit SOBEK-RE (Paragraaf 4.5) levert uiteindelijk een voor het gehele Nederlandse riviersysteem toepasbaar modelsysteem dat kan rekenen met mengsels van grind, zand en slib.

Voor de kalibratie verdienen de volgende punten aandacht:

- De instellingen van modelparameters in de nieuwe modelschematisatie zijn gebaseerd op kennis en ervaringen uit oude modellen. De resultaten met het nieuwe model zijn door veranderde modelconcepten en gewijzigde inzichten niet meer geheel in overeenstemming met de resultaten van de oude modellen. Een herkalibratie hoort daarom tot de aanbevelingen;
- De hydraulische berekeningen met het nieuwe SOBEK-model geven lagere waterstanden dan de berekeningen gemaakt in de oude SOBEK-lijn. De verschillen zijn waarschijnlijk

deels gerelateerd aan afwijkingen in de geometrie (vorm van dwarsprofielen en effectieve lengte van de takken) als gevolg van een gewijzigde afhandeling van dwarsprofielen. Aanbevolen wordt de nieuwe schematisatie te vergelijken met de oude schematisatie en na te gaan welke gevolgen verschillen hebben voor de berekening;

- Bij herkalibratie zal gekozen moeten worden of wordt gestreefd naar overeenstemming met waterstanden uit het oude model of met waterstanden gemeten in het veld;
- Aanbevolen wordt om het DELWAQ-model opnieuw te kalibreren met speciale aandacht voor de kritieke schuifspanningen voor resuspensie en sedimentatie. Vervolgens verdient het aanbeveling om een langere periode door te rekenen en het model te initialiseren zonder sliblaag op de bodem. De resultaten van deze meerjarige simulatie kunnen gebruikt worden om de sedimentbalans van het gebied te berekenen. Omdat zwevende-stofmetingen in het gebied schaars zijn, verdient het aanbeveling om bij de modelkalibratie gebruik te maken van alle beschikbare informatie over de sedimentbalans van de Rijn-Maasmonding. Het rapport van Snippen et al (2005) biedt hiertoe goede aanknopingspunten;
- Het oude model van Mol is gekalibreerd aan de hand van data van de periode 1990-2000. De kalibratie is alleen voor het bovenstroomse zandige deel uitgevoerd. Het model moet dus nog worden gekalibreerd voor het benedenstroomse slibdeel van het gebied en voor de dwarsverbindingstakken (Spui, Dordtse Kil, Noord, etc.) waarin forse erosie is opgetreden na de bouw van de Haringvlietsluizen;
- In de praktijk wordt vaak een morfologische factor MORFAC gebruikt om de rekentijd te bekorten. Hoewel is overwogen deze factor ook toe te passen voor de Rijn-Maasmonding, concludeerde Mol (2003) na een aantal pogingen dat het voor dit model niet mogelijk is de beoogde verkorting van de rekentijd en verbetering van de weergave van het getij te realiseren door gebruik te maken van een grotere waarde van MORFAC. Dit heeft te maken met de keuze om gebruik te maken van de echte tijdseries van rivierafvoeren bij de bovenstroomse randen. Hierdoor moet het model zowel het getij op benedenranden als hoogwatergolven op bovenranden simuleren. Beide verschijnselen hebben een vergelijkbare tijdschaal in de orde van dagen die zich slecht verhoudt met grote waarden van MORFAC. Door randvoorwaarden over langere perioden goed te middelen, zouden methoden met een grote MORFAC wel moeten werken;
- Meestal simuleren morfodynamische modellen in de beginfase onrealistische morfologische veranderingen. Dit schrijft men vaak toe aan de schematisatiefouten in het model: aan het begin probeert het model oneffenheden in de bodemschematisatie uit te vlakken. Er is echter ook een systematische component die niet aan schematisatiefouten gewijt kan worden. De dwarsprofielen in bochten zijn namelijk te ruim en hebben daardoor de neiging om in het model te sedimenteren. In een rivierbocht is de waterdiepte in de buitenbocht vaak groter dan in de binnenbocht. Hierdoor is de snelheidsverdeling over de breedte schever dan in een recht stuk rivier. Door de sterke niet-lineaire relatie tussen sedimenttransport en stroomsnelheid, is het totale sedimenttransport door een profiel groter bij een schevere snelheidsverdeling met dezelfde gemiddelde stroomsnelheid. Voor het transporteren van evenveel sediment kan de rivier in een bocht dus met een kleinere gemiddelde stroomsnelheid volstaan dan in een recht stuk. Die kleinere gemiddelde stroomsnelheid hangt samen met een ruimer profiel. Met dit inzicht moet het mogelijk zijn dit 2D effect grotendeels mee te nemen in het 1D model;
- Overwogen moet worden of de zoutindringing wel of niet wordt meegenomen bij de morfodynamische modellering. Bij het meenemen van zout in een morfologische

simulatie moet men zich realiseren dat veel inspeeltijd nodig is om een foute initiële zoutverdeling weg te werken;

- Kleine zijtakjes als de Afgedamde Maas bij Nederhemert kunnen voor numerieke problemen zorgen bij morfodynamische simulaties. Door hun relatief kleine afmetingen wordt de berekening daar al snel instabiel. Een oplossing is om deze takjes morfologisch inactief te maken. De weergave is dan lokaal niet realistisch, maar de invloed hiervan op de rest van het model is verwaarloosbaar. Deze oplossing is te gebruiken zolang deze kleine takjes zelf niet tot het interessegebied behoren;
- De rivieren in de Rijn-Maasmonding kennen verscheidene tunnels. Deze kunnen worden beschouwd als niet-erodeerbare lagen. De tunnels worden over het algemeen aangelegd op enkele meters onder de alluviale bedding en afgedekt met een bekleding van asfalt of stortsteen. Aan boven- en benedenstroomse zijde loopt deze bekleding door met een lengte die ongeveer gelijk is aan de breedte van de tunnel en met een talud van circa 1:10 à 1:20. De totale lengte ligt in de orde van 150 tot 300 m. In het model kan een dergelijke constructie worden gemodelleerd door middel van een vaste niet-erodeerbare laag. Omdat de lengte van deze constructie kleiner is dan de gemiddelde roosterafstand in het model ($>$ orde 500 m), zal deze laag beperkt blijven tot een enkel roosterpunt. Bij erg grote roosterafstanden kan worden overwogen een extra roosterpunt toe te voegen;
- De sedimenttransporterende breedte van het model wordt in eerste instantie gelijk genomen aan de breedte van de hoofdgeul in het dwarsprofiel. De sedimenttransporten worden immers ook gebaseerd op de stroomsnelheden in de hoofdgeul ("*main channel*"). Lokaal blijft het echter mogelijk deze breedte groter of kleiner te kiezen als dat voor de ijking noodzakelijk blijkt. Deze keuze heeft vooral invloed op de aanpassing van het dwarsprofiel en de invloed daarvan op waterbeweging. Sterke langsgradiënten in sedimenttransporterende breedte kunnen verder van invloed zijn op de sedimenttransportgradiënt en daarmee indirect op de morfologie.

6 Literatuurverwijzingen

- 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 transport. Report no. 83-7, Delft University of Technology, Dept. of Civil Engrg.
- Galappatti, R. & C.B. Vreugdenhil (1985), A depth integrated model for suspended sediment transport. J. of Hydr. Res., IAHR, Vol.23, No. 4, pp.359-377.
- Houwing, E.J. & G. Blom (2001), Sedimenttransport en morfologische ontwikkeling van het Noordelijk Deltabekken. RIZA rapport 2001.021, Rijkswaterstaat RIZA/WST, ISBN 90 3695 375 8, Dordrecht, maart 2001.
- Hugtenburg, J. (2005), Persoonlijke mededeling. Rijkswaterstaat RIZA.
- Ludikhuize, D. & E.W.F. Ruijgh (1989), Waterkwaliteitsonderzoek van het Noordelijk Deltabekken; Slibtransport Hollands Diep / Haringvliet. Rapport T262, Waterloopkundig Laboratorium.
- Mol, A.C.S. (2003), Morfologische gevolgen van rivierverruimende maatregelen langs de Merweden; Opzet en toepassing van een SOBEK-model. Rapport afstudeeropdracht, Rijkswaterstaat RIZA en Universiteit Twente.
- Mol, A.C.S. (2004), Morfologische effecten Ruimte voor de Rivier in het Benedenrivierengebied. CE&M research report 2004R-007/WEMO10, University of Twente, ISSN 1568-4652, July 2004.
- Snippen, E., A. Fioole, H. Geelen, A. Kamsteeg, A. van Spijk & T. Visser (2005), Sediment in (be)weging; Sedimentbalans Rijn-Maasmonding periode 1990-2000. Concept rapport Rijkswaterstaat RIZA, afdeling WRE, 11 mei 2005.
- Van Dremel, P.F. (1995), Slib- en zandbeweging in het Noordelijk Deltabekken in de periode 1982-1992. Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, Afdeling Watersysteemkennis.
- Van Ledden, M. (2003), Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins. Doctoral thesis, Delft University of Technology.
- Van Rijn, L.C. (1984a), Sediment transport, Part I: Bed-load transport. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 110., No. 10, pp.1431-1456.
- Van Rijn, L.C. (1984b), Sediment transport, Part II: Suspended load transport. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 110., No. 11, pp.1613-1641.
- Van Rijn, L.C. (1984c), Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 110., No. 12, pp.1733-1754.
- Van Rijn, L.C. (2005a), A unified view on sediment transport, Part I: Initiation of motion, bed roughness and bed-load transport. Submitted to J. Hydr. Engrg., ASCE.
- Van Rijn, L.C. (2005b), A unified view on sediment transport, Part II: Suspended transport. Submitted to J. Hydr. Engrg., ASCE.
- Van Rijn, L.C. (2005c), A unified view on sediment transport, Part III: Graded bed. Submitted to J. Hydr. Engrg., ASCE.
- Van Rijn, L.C., D.J.R. Walstra & M. Van Ormondt (2005), A unified view on sediment transport, Part IV: Implementation in Delft3D morphodynamic model. Submitted to J. Hydr. Engrg., ASCE.
- Vermeer, K. & E. Mosselman (2005), Morfologische effecten in de Rijn-Maasmonding; Achtergronddocument bij de PKB Ruimte voor de rivier. Rapport PR1026, HKV Lijn in Water & WL | Delft Hydraulics (WL: Q4041).
- Visser, A.Z. & E. Snippen (2002), Een SOBEK-slibmodel van het Noordelijk Deltabekken; Fase 1: Pilottoepassing model; Deel 1: Opbouw slibmodel en gevoeligheidsanalyse. RIZA werkdokument 2002.142x.
- Wang, Z.B. (1989), Mathematical modeling of morphological processes in estuaries. Doctoral thesis, Delft University of Technology.
- Wang, Z.B. (2001), Een 1D netwerk morfodynamisch model voor het Noordelijk Deltabekken; Opzet van het model. Verslag Z3146, WL | Delft Hydraulics, Delft, december 2001.

- Wang, Z.B. (2003), 1D morfologische modellering van het zanddeel van NDB; Evaluatie SOBEEK model. Rapport Z3689, WL | Delft Hydraulics.
- WL | Delft Hydraulics (2005), Zwevende-stofmodellering; Nevengeulen bij Gameren en Rijn-Maasmonding. Rapport Q4013, WL | Delft Hydraulics.