

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Onderzoek Morfologie Rijn, Maas en Benedenrivieren

Bezinning op slib

Rapport

februari 2008

WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

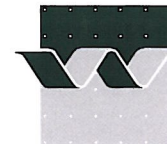
Onderzoek Morfologie Rijn, Maas en Benedenrivieren

Bezinning op slib

Kees Sloff en Christiaan Erdbrink

Rapport

februari 2008



Opdrachtgever:	Rijkswaterstaat RIZA				
Titel:	Onderzoek Morfologie Rijn, Maas en Benedenrivieren				
Samenvatting:					
<p>De deelstudie "Bezinning op slib" is uitgevoerd om de huidige kennis ten aanzien van slib te mobiliseren en een advies te geven ten aanzien van verdere ontwikkeling van de slibmodellering voor de beoogde grootschalige morfologische modellering en sedimentinteracties in de Rijn-Maasmonding en de overgangsgebieden. Daarvoor is een literatuurstudie uitgevoerd, en zijn deskundigen geraadpleegd. Vervolgens is een plan van aanpak geformuleerd voor ontwikkeling van instrumenten voor slibvragen in het betreffende gebied. Hier is gekozen voor een aanpak waarbij wordt uitgegaan van een uitgebreide systeembeschrijving, en uitwerking van een aantal concrete beheervragen. De beheervragen worden daarvoor onderverdeeld naar korte- en lange-termijn beheer. Beantwoorden van de vragen vereist een combinatie van modelinstrumenten, laboratoriummetingen en veldmetingen.</p>					
Referenties:		RIZA overeenkomst RI-4787, Fase 1b SAP bestelnummer 4500094296			
Ver	Auteur	Datum	Opmerk.	Review	Goedkeuring
0.1	Kees Sloff	30/11/2007		F.vd Knaap	
0.2	Kees Sloff	26/02/2008		Z.B. Wang	A.G. Segeren
Projectnummer:		Q4400.20			
Trefwoorden:		slib, sedimenttransportmodellen, veldmetingen, Rijn-Maasmonding			
Aantal bladzijden:		60			
Classificatie:		Geen			
Status:		Definitief			

Inhoud

1	Inleiding	1-1
1.1	Aanleiding.....	1-1
1.2	Doelstelling.....	1-2
1.3	Organisatie	1-2
1.4	Leeswijzer	1-3
2	Slibstudies	2-1
2.1	Inleiding.....	2-1
2.2	Slibstudies in het Rijn-Maasmonding gebied	2-1
2.2.1	Afbakening	2-1
2.2.2	Morfologie en sedimentbalans.....	2-3
2.2.3	Slib in de Rijn-Maasmonding	2-4
2.2.4	Veldmetingen	2-7
2.2.5	Beheervragen Rijn-Maasmonding gebied	2-12
2.3	Relevante concepten voor modellering van slib en zand-slib.....	2-14
2.3.1	Definities en eigenschappen van slib.....	2-14
2.3.2	Laboratoriumexperimenten.....	2-18
2.3.3	Lopend onderzoek	2-20
2.3.4	Transport van slib	2-20
2.4	Modellen voor de Rijn-Maasmonding	2-23
2.5	Beschikbare instrumentaria.....	2-29
3	Plan van aanpak voor slibmodellering	3-1
3.1	Inleiding.....	3-1
3.2	Systeembeschrijving	3-3
3.3	Uitwerking voor beheervragen	3-3
4	Conclusies en aanbevelingen	4-1
5	Literatuur	5-1
Bijlagen		
A	Bespreekverslag Rijkswaterstaat DZH	A-1
B	Raamwerk systeembeschrijving	B-1

I Inleiding

I.1 Aanleiding

Ten behoeve van het beheer van de rivieren is behoefte aan grootschalige rekenmodellen waarmee prognoses kunnen worden gemaakt van toekomstige morfologische ontwikkelingen, en het gedrag van het systeem kan worden geanalyseerd. Daarvoor is behoefte aan een integrale modellering van grind, zand en slibfracties en de integrale aanpak van de problematiek van overgangsgebieden van rivier naar zee. Daarmee zijn ook de interacties tussen verschillende beheersgebieden te beschrijven, wat kan worden gebruikt voor afstemming van het beheer van verschillende regionale diensten.

In het huidige modelinstrumentarium zijn onderdelen en concepten beschikbaar voor de afzonderlijke processen, maar houden deze nog onvoldoende rekening met de onderlinge interacties die in overgangsgebieden relevant zijn. Voor de ontwikkeling van grootschalige morfologische modelsystemen is een uitbreiding van bestaande kennis en modelfunctionaliteit noodzakelijk. In dit kader heeft de Waterdienst een ontwikkeltraject gedefinieerd dat zal leiden tot een instrumentarium voor modellering van grootschalige morfologie van de Rijn, Maas en Benedenrivieren. In het door de Waterdienst beoogde ontwikkeltraject worden op basis van verkenningen en implementaties de benodigde componenten voor dit instrumentarium gedefinieerd en ontwikkeld. Daarvoor wordt uitgegaan van de modelsystemen SOBEK-River (eendimensionaal) en Delft3D (twee- en driedimensionaal).

De beoogde kennisbehoefte ten aanzien van grootschalige modellen is een gevolg van de ontwikkeling om de voorspelkracht van de instrumenten voor lange-termijn ontwikkelingen te vergroten door de uitbreiding van het beschouwde riviertraject. Deze ontwikkeling is nodig voor simulatie van lange-termijn morfologische ontwikkelingen op een tijdschaal variërend van orde tientallen jaren tot honderden jaren. Voor dergelijke ontwikkelingen in het deltagebied zijn de invloeden met grote ruimteschalen namelijk niet verwaarloosbaar. Verschijnselen die ver bovenstrooms het morfologische gedrag beïnvloeden zullen op lange termijn ook hun invloed op de delta hebben. Bijvoorbeeld veranderingen in het aanbod van sediment in Duitsland zijn op lange termijn merkbaar in het aanbod van sediment op de bovenrand van het Rijn-Maasmonding gebied. Daarnaast beïnvloeden ook benedenstroomse verschijnselen en ingrepen op lange termijn de morfologie stroomopwaarts, bijvoorbeeld een door zandwinning gegenereerde terugschrijdende erosie.

Een belangrijke consequentie van de uitbreiding van de modellen is dat de verschillende manieren van sedimenttransport van korrelgroottefacties, en hun ruimtelijke variaties moeten worden gecombineerd. Daarmee wordt bijvoorbeeld bedoeld dat een dergelijk model in staat moet zijn de fijne sedimentfracties in de bovenloop van de rivier als spoeltransport (geringe interactie met de bodem) te simuleren, en in de benedenloop als bodemtransport (volledig in contact met de bodem) te simuleren.

Om de toekomstige ontwikkeling van instrumenten in goede banen te leiden, is een bezinning gewenst waarbij de huidige kennis wordt gemobiliseerd, en waarbij aandacht moet worden besteed aan een aantal specifieke onderdelen. Deze studie “Bezinning op slib”

is gedefinieerd als Fase 1b van het onderzoek “*Onderzoek Morfologie Rijn, Maas en Benedenrivieren*” van de Waterdienst. Deze studie sluit onder andere aan op de “Onderzoeksagenda Morfologie” waarbij kennisbehoefte en onderzoek ten aanzien van morfologie voor de Rijn-Maasmonding is vastgesteld in relatie met de beheervragen in het gebied (Wijbenga en Mosselman, 2007).

1.2 Doelstelling

De deelstudie “Bezinning op slib” is onderdeel van een overkoepelend project van Rijkswaterstaat, dat tot doel heeft de modellering van grootschalige riviertrajecten mogelijk te maken, ten behoeve van een betere (lange-termijn) voorspelling van bodemontwikkeling in de verschillende Maas- en Rijntakken. Het project omhelst onder andere de integrale modellering van grind, zand en slibfracties. De deelstudie ten aanzien van slib heeft tot doel de huidige kennis ten aanzien van slib te mobiliseren en een advies te geven ten aanzien van de ontwikkeling van de slibmodellering ten behoeve van de beoogde grootschalige morfologische modellering en sedimentinteracties in de Rijn-Maasmonding en de overgangsgebieden.

De studie “Bezinning op slib” heeft geleid tot:

- een overzicht van afgesloten en lopende relevante studies;
- een advies ten aanzien van de ontwikkeling en implementatie van slibmodellering;
- een plan van aanpak om te komen tot goede en bruikbare modellen, met een afstemming op de beheervragen van Rijkswaterstaat.

1.3 Organisatie

Het project is uitgevoerd door Kees Sloff en Christiaan Erdbrink, in samenwerking met Han Winterwerp (allen WL | Delft Hydraulics / Deltares). De projectleiding was in handen van Kees Sloff. Het project werd begeleid door Arjan Sieben, in samenwerking met Almer de Swaaf (beide RIZA / Waterdienst).

Het onderzoek is uitgevoerd door middel van:

- literatuurstudie/overzicht relevante studies: verzamelen van onderzoeksrapporten, publicaties e.d., zowel binnen als buiten WL | Delft Hydraulics;
- gesprekken met experts op het gebied van slib en slib in de Rijn-Maasmonding, zowel binnen als buiten WL | Delft Hydraulics.

De volgende personen zijn tijdens deze studie geraadpleegd:

- Han Winterwerp, Zheng Bing Wang, Erik Mosselman (WL | Delft Hydraulics en TU Delft)
- Thijs van Kessel, Joost Icke, Nathalie Asselman, Mindert de Vries (WL | Delft Hydraulics)
- Michel de Nijs, Francesca Mietta, Walter Jacobs (TU Delft)
- Tido Vellinga (Havenbedrijf Rotterdam en TU Delft)

- Arjan Sieben, Almer de Swaaf, Marcel Bruggers (RIZA / Waterdienst)
- Arie van Spijk, Ard Kamsteeg, Wim Bijl (Rijkswaterstaat ZH)

I.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gepresenteerd van slibstudies en de kennis op het gebied van slibmodellering. Het betreft de resultaten van literatuurstudie en gesprekken met experts. Een onderverdeling is gemaakt naar studies gericht op het Rijn-Maasmonding gebied (paragraaf 2.2), kennis en kennisontwikkeling ten behoeve van concepten voor modellering van slib en zand-slib processen (paragraaf 2.3), beschikbare modellen voor het Rijn-Maasmonding gebied (paragraaf 2.4) en beschikbare instrumentaria (paragraaf 2.5).

In hoofdstuk 3 wordt vervolgens een plan van aanpak gepresenteerd voor slibmodellering ten behoeve van een aantal specifieke beheervragen.

Tenslotte worden in hoofdstuk 4 de conclusies en aanbevelingen van deze studie gepresenteerd.

2 Slibstudies

2.1 Inleiding

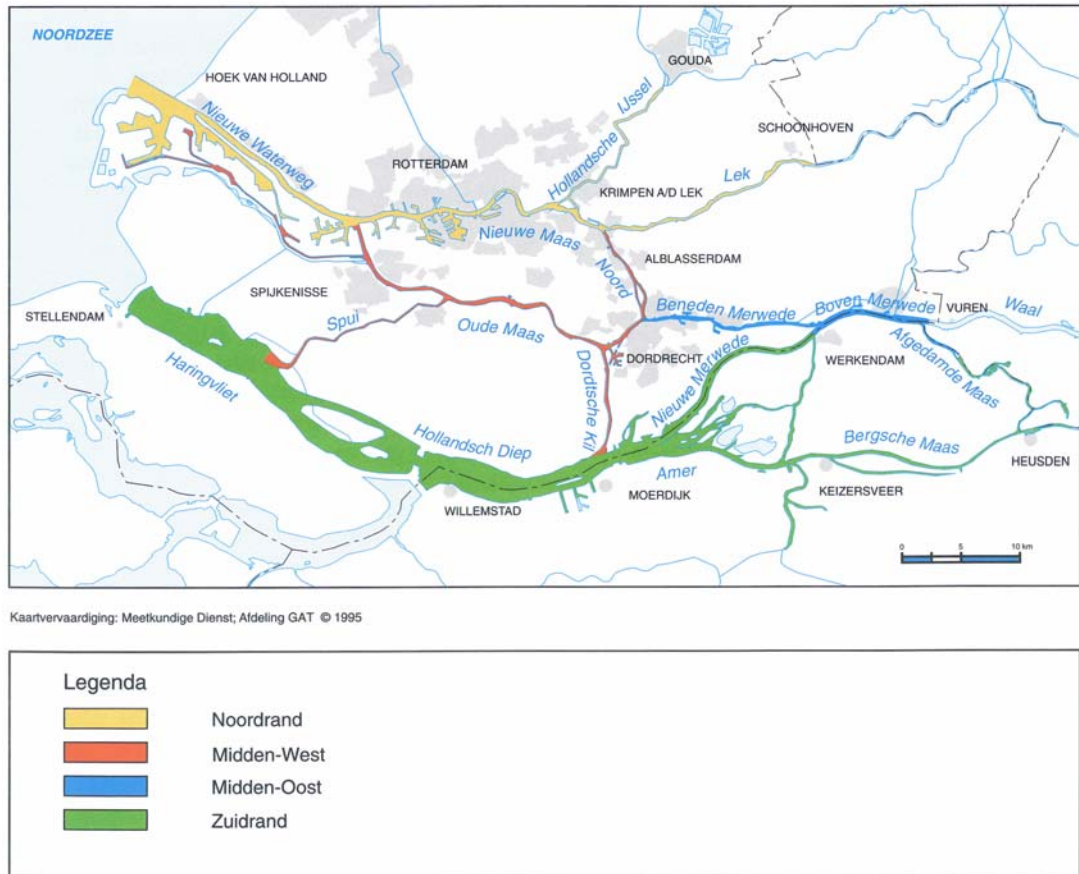
Om de kennis van slib, en meer specifiek: de kennis ten behoeve van slibmodellering in het Rijn-Maasmonding gebied te mobiliseren is een literatuurstudie uitgevoerd en zijn diverse deskundigen geraadpleegd. In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van de stand van zaken ten aanzien van relevante kennis. Een onderverdeling is gemaakt naar studies gericht op het Rijn-Maasmonding gebied (paragraaf 2.2), kennis en kennisontwikkeling ten behoeve van concepten voor modellering van slib en zand-slib processen gerelateerd aan het gebied van de Rijn-Maasmonding (paragraaf 2.3), beschikbare modellen voor het Rijn-Maasmonding gebied (paragraaf 2.4) en beschikbare instrumentaria (paragraaf 2.5).

2.2 Slibstudies in het Rijn-Maasmonding gebied

2.2.1 Afbakening

De Rijn-Maasmonding wordt gevormd door het beheersgebied van Rijkswaterstaat directie Zuid-Holland met inbegrip van de daarmee in open verbinding staande havens en kanalen en aangevuld met de bovenstrooms daarvan gelegen wateren die onderhevig zijn aan getijdenwerking. Het voor deze studie relevante gebied heeft daarom betrekking op de benedenloop van de Rijn en van de Maas.

Door de afsluiting van het Volkerak (1969) en Haringvliet (1970) is het Noordelijk Deltabekken (NDB) ontstaan, zie Figuur 2.1. In de huidige studies wordt dit gebied vaak aangeduid met de Rijn-Maasmonding. Voor morfologische studies is een opdeling gemaakt in Noordrand, Middengebied en Zuidrand. In Figuur 2.1 van Van Dreumel (1995) is deze opdeling met kleuren aangegeven.



Figuur 2.1 Gebiedsindeling ten behoeve van morfologie volgens Van Dreumel (1995)

Het systeem wordt vanuit het oosten met slib en zand gevoed vanuit de rivieren de Lek, de Waal en de Maas. Door de getijdestroming en rivierafvoer wordt het slib stroomafwaarts afgevoerd. Figuur 2.2 toont de kleurverschillen die zijn toe te schrijven aan concentratieverschillen van zwevend sediment (met name slib) in de afzonderlijke takken. Door de open verbinding met de Noordzee (via Hartelkanaal/Beerkanaal en Nieuwe Waterweg) vindt met het tweemaal-daags getij ook een voeding van slib en van zout plaats vanuit zee. De zouttong dringt ver door in het Rijn-Maasmonding gebied, en leidt ter plaatse tot een zeer complexe interactie tussen stroming en sediment. De aanslibbing in dit door zout beïnvloede gebied is zeer sterk afhankelijk van de zoutindringing. In het Haringvliet treedt op dit moment in principe geen zout en slib binnen vanuit de zee omdat via kering alleen water wordt gespuid tijdens eb. Wanneer echter plannen voor opening van de Haringvlietssluis (de Kier) worden uitgevoerd zal dit veranderen, en zal ook in de Zuidrand sprake zijn zout-zoet interacties.



Figuur 2.2 Samenvloeiing van slibrijke stroming vanuit Oude Maas en slibarme stroming uit het Spui (bron: Google Earth).

Het gebied dat ligt tussen het door getij gedomineerde gebied en het door rivierstroming gedomineerde gebied is het overgangsgebied. Onder gemiddelde omstandigheden ligt dit overgangsgebied ongeveer ter hoogte van de Merwedebank. Naarmate de rivierafvoer toeneemt, ligt het overgangsgebied meer zeewaarts.

2.2.2 Morfologie en sedimentbalans

Door zowel de rivierstroming als door getijstromingen en uitwisselingsstromen door dichtheidseffecten wordt sediment in de Rijn-Maasmonding continu verplaatst. Het type getransporteerd materiaal varieert van zand tot slib. Door gradiënten in deze transporten en uitwisseling van sediment met de bodem (bijvoorbeeld door opwerveling) treden morfologische veranderingen op. Ook baggerwerkzaamheden en andere riviergerelateerde ingrepen resulteren in morfologische veranderingen. Een zinvolle beschrijving van morfologische effecten vraagt dus een analyse van zowel transporten, uitwisselingsfluxen en sedimentonttrekkingen.

Het systeem is in het verleden sterk beïnvloed door menselijk ingrijpen. Met name de aanleg van de deltawerken (afsluitingen Haringvliet, Volkerak e.d.) heeft nog steeds een grote invloed op de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Rijn-Maasmonding. Snippen et al (2005) geven aan dat deze ingrepen geleid hebben tot een verandering van het morfodynamische evenwicht, en dat dit nieuwe evenwicht d.d. 2005 nog niet bereikt is. Afgezien van de aanleg van de Deltawerken wordt de morfologische toestand van de Rijn-Maasmonding met name beïnvloed door (nautisch) onderhoudsbaggerwerk dat op grote schaal uitgevoerd wordt.

Inzicht in het grootschalige gedrag van het systeem kan worden verkregen door op basis van metingen van slib- en zandtransporten en bodemveranderingen sedimentbalansen op te

stellen. In principe is deze methode toe te passen door per traject (riviertak) waargenomen sediment in- en uitstroom en veranderingen in sediment volume te vergelijken. Ontbrekende gegevens kunnen worden afgeschat door de balans sluitend te maken. Sedimentbalansen zijn opgesteld voor de periode 1982-1992 na afsluiting van het Haringvliet (Van Dreumel 1995) en voor de periode 1990-2000 (Snippen et al. 2005).

Uit de onderzoeken ten behoeve van de sedimentbalansen blijkt dat er een verondieping heeft plaatsgevonden in het grootste gedeelte van de Zuidrand. In de periode 1982-1992 was sprake van een sediment overschot van ongeveer 28 miljoen m³ (Van Dreumel 1995). In dezelfde tijd werden de Nieuwe Waterweg en Middengedeelte West dieper door erosie en baggerwerk, terwijl de bodemligging in de rest van de Noordrand en Middengedeelte Oost vrijwel gelijk is gebleven. Het systeem ondergaat dus als het ware een kanteling. Overigens kan hier nog onderscheid worden gemaakt in baggerwerk ten behoeve van aanleg (bijvoorbeeld de verlegging van de Dordtsche Kil in de jaren zeventig) en onderhoudsbaggerwerk.

De tussenverbindingen (Spui, Noord, Dordtsche Kil en de Oude Maas) in het Middengebied krijgen als gevolg van de afsluitingen grotere afvoeren te verwerken en zijn hierdoor sterk geërodeerd. Voor de Dordtsche Kil speelt ook onderhoudsbaggerwerk een rol in de snelle daling van de bodemligging, en is op dit moment ook sprake van grote bodemveranderingen die zijn toe te schrijven aan de aanleg van de HSL tunnel (Sieben en Van Essen, 2007).

In de meest recente sedimentbalans van het noordelijke Deltabekken (Snippen et al. 1995) wordt verder de conclusie getrokken dat de aanpassing van de bodemliggingen naar een evenwichtssituatie, nog steeds bezig is. Tegelijkertijd wordt opgemerkt dat de hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk in het gebied dusdanig omvangrijk is, dat het niet vanzelfsprekend is om te spreken van een natuurlijk morfologisch systeem dat op zoek is naar een evenwicht. Een kanttekening bij de sedimentbalansen is volgens De Nijs (2007) nodig: een sluitende balans vereist niet alleen een schatting van de netto instroming van slib in een traject en de verandering in bodemligging van de rivier, maar ook de aanslibbing in stagnante zones of bergingsgebieden zoals havenbekkens en buitendijkse gebieden (uiterwaarden, grienden, etc.). Daarnaast is het naast de locaties en hoeveelheden onderhoudsbaggerwerk ook van belangrijk te weten waar de baggerspecie wordt gedumpt.

Tenslotte wordt opgemerkt, zowel door Van Dreumel (1995) als door Snippen et al. (2005), dat er een grote behoefte is aan systematische en intensievere metingen. Zo zijn er onder meer onzekerheden over de kwaliteit en kwantiteit van het gebaggerde sediment en zwevend stofconcentraties. Ook de gegevens van baggerwerkzaamheden en aanslibbing van havengebieden en andere stagnante zones moeten worden verzameld ten behoeve van morfologische studies.

2.2.3 Slib in de Rijn-Maasmonding

In de Rijn-Maasmonding kunnen op basis van bodemsamenstelling drie verschillende gebieden onderscheiden worden:

1. een deel met een zandbodem waar het slibtransport als spoeltransport (washload, het deel van het transport in suspensie dat niet deelneemt in de morfologie) kan worden beschouwd;
2. een deel met een slibbodem waar geen zandtransport plaatsvindt;
3. een deel met een gemengde bodem waar zowel slib als zand aanwezig zijn.

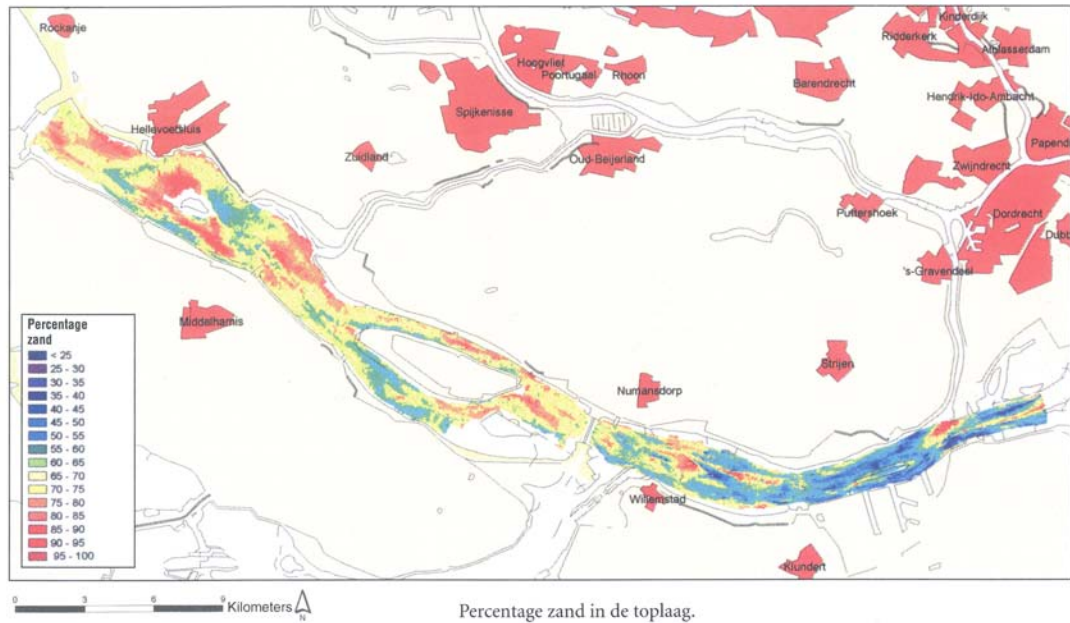
Het laatstgenoemde gebied is het moeilijkst voor de modellering vanwege het gecompliceerde gedrag.

De slibfractie in de Rijn-Maasmonding speelt een belangrijke rol bij diverse beheervragen. Slib wordt voor een groot deel aangevoerd door de Rijn (Lek en Waal) en de Maas, en voor een beperkt deel in de omgeving van de Nieuwe Waterweg via getijstroming en dichtheidsstroming vanuit de zee. Het onderscheid tussen fluviaal (rivier) en marien (zee) slib is moeilijk vast te stellen, en het is daarom niet duidelijk de herkomst eenduidig te bepalen. Over het algemeen wordt aangenomen dat in de Botlek en Nieuwe Waterweg circa 80% van het slib afkomstig is uit zee. Bijvoorbeeld De Kok (2000) concludeert dat het overgrote deel van de aanslibbing rond de Maasmond (meer dan 80%) afkomstig is uit sedimentbronnen voor de Franse en Belgische kust. M. de Nijs (2007) concludeert uit recent onderzoek dat wellicht van een lager aanbod van marien slib moet worden uitgegaan, vooral wanneer de gebieden oostelijk van de Maasmond worden beschouwd.

Cruciaal voor de slib- en slib-zandhuishouding van het deltagebied is:

1. Initialisatie: de beginsituatie speelt een belangrijke rol voor het gedrag van het systeem. Het geheugen van het systeem is groot. Kennis van de reeds in het systeem (in de bodem) aanwezige slibfractie is noodzakelijk.
2. Instroming door de randen: de hoeveelheid en type sediment dat het gebied binnenkomt door de instroomranden (zowel vanuit de rivieren als vanuit zee). Dit is sterk bepalend voor de balans.
3. Zoutindringing: de locatie van de zouttong (met name de punt) heeft grote invloed op het transport en depositie/erosie gedrag van zwevend stof (slib en fijn zand).

Aanslibbing vindt voornamelijk plaats op locaties met relatief lage stroomsnelheden. Het betreft onder andere havens, buitendijkse geulen en plassen, uiterwaarden, en kribvakken. Ook in het Haringvliet, Hollands Diep en delen van de Nieuwe Maas is sprake van aanslibbing, terwijl bij de meeste andere riviertakken overwegend sprake is van zandbodem. In sommige gebieden heeft zich in het verleden verontreinigd slib afgezet. Dit is bijvoorbeeld het geval in delen van de Biesbosch en in het Haringvliet. Bij voortdurende aanslibbing wordt dit materiaal op natuurlijke wijze afgedekt, maar wanneer door ingrepen in het systeem de omstandigheden wijzigen, kan het verontreinigde materiaal worden opgewerveld en zich door het systeem verspreiden. Het slib dat langs de Zuidrand het gebied binnenstroomt, bezinkt met name in het Hollandsch Diep, en in geringere mate in het Haringvliet. De aanslibbing verplaatst zich als een front naar het westen. Figuur 2.3 toont een overzicht van het percentage zand in de bodem van het Hollandsch Diep en het Haringvliet, en illustreert deze zand/slib verdeling langs de Zuidrand.



Figuur 2.3 Percentage zand in de toplaag in Hollandsch Diep en Haringvliet bepaald met behulp van MEDUSA metingen (RIZA, 2000). De met blauwe aangegeven gebieden zijn relatief slibrijke gebieden.

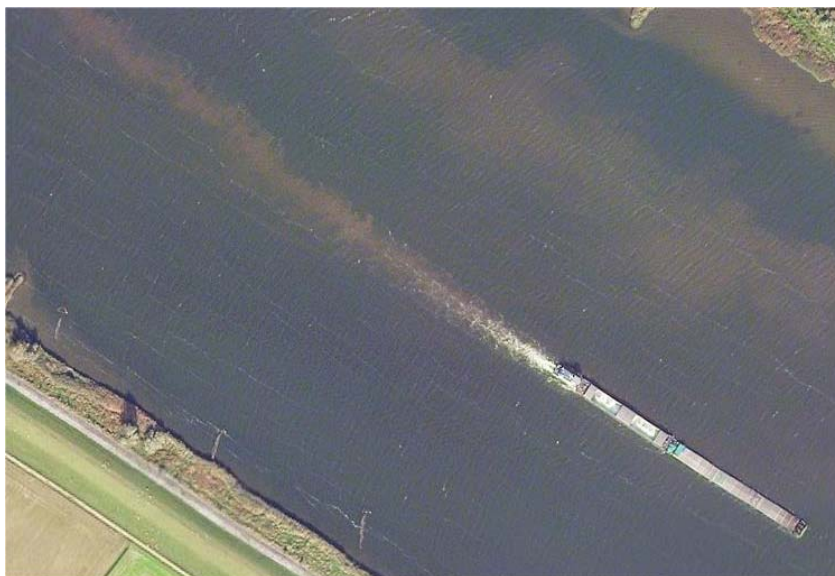
Interpretatie van zwevend stofmetingen voor de Rijn-Maasmondung uit 2006 door Meijers en Icke (2006) bevestigt dat de zwevend stofconcentraties afkomstig uit de rivieren sterk zijn gerelateerd aan afvoergolven, en dat de daling van de concentraties (en daarmee samenhangende aanslibbing) langs de takken samenhangt met de verwijding van de dwarsprofielen stroomafwaarts (zie ook paragraaf 2.2.4). Op de trajecten Boven-Merwede, Nieuwe-Merwede, Hollandsch Diep en Haringvliet is dit goed af te leiden uit metingen. Daarentegen zijn in de Dordtsche Kil en Amer juist sprake van versnellende stromingen waardoor hier juist weinig sedimentatie optreedt. De optredende bodemschuifspanningen blijken volgens Meijers en Icke (2006) een cruciale rol te spelen bij het zwevend stofgedrag in de Rijn-Maasmondung. Daarnaast zijn ook de bovenstroomse randvoorwaarde voor zwevend stof, en de initiële dikte van de sliblaag van groot belang (Icke, 2005).

Drie transportmechanismen (lage concentratie suspensies, hoge concentratie benthische suspensies, en fluid mud) treden elk in meer of mindere mate op in verschillende weersomstandigheden en seizoenen en variëren ook in plaats (De Kok, 2000). Zo treedt er in het winterseizoen een ‘fluid-mudlaag’ op in de Maasmond, die langzaam consolideert.

Het slib afkomstig uit de rivieren heeft een hoog gehalte aan organische stof. De Nijs (2007) concludeert uit nader onderzoek dat vlokvorming zich daardoor niet beperkt tot het gebied met zoet-zoutovergangen, maar dat vlokvorming reeds landinwaarts optreedt. Metingen naar materiaaleigenschappen van zwevend stof in 2006 zoals gerapporteerd door Meijers en Icke (2006) hebben helaas de vlokvorming niet vast kunnen leggen. Wel bieden optische in-situ metingen beschreven onder andere door Van Wijngaarden (1995) en Kamminga (2001) de mogelijkheid om vlokvorming te registreren (zie ook paragraaf 2.3.1). Ter plaatse van de zouttong treedt een complexe interactie op tussen het slib, de turbulentie en de door het zout veroorzaakte dichtheidseffecten. Zo ontstaat ter plaatse van de punt van de zouttong een ‘wolk’ van fijn sediment. Deze beweegt mee met de door getij intredende en uitredende zouttong in de Rijn-Maasmondung, en laat daarbij een deel van het slib achter in de havens.

Verder is sprake van onderdrukking van turbulentie door zoutgradiënten, hetgeen bijdraagt aan de uitzakking van het slib in de zouttong. Door de dichtheidstromen en de getijdestroming in de Nieuwe Waterweg (met snelheden boven 1 m/s) zullen de slibfracties afwisselend uitzakken en weer opwerpen. De complexiteit van deze verschijnselen kan alleen worden beschreven met zeer gedetailleerde (driedimensionale) modellen.

In het gebied is sprake van intensieve scheepvaart en havenactiviteiten. Enerzijds speelt slib een rol bij het beheer van deze scheepvaartfunctie (baggeren), en anderzijds is het aannemelijk dat de scheepvaart invloed uitoefent op de verplaatsing van slib. In Figuur 2.4 is een voorbeeld getoond van een spoor van opgewerveld slib achter een schip op de Maas. De schroefstraal en de stromingen rond het schip leiden tot grote schuifspanningen op de bodem. Daarnaast zijn de door de scheepvaart opgewekte stromingen langs oevers en kribvakken eveneens van belang voor het gedrag van slib in deze oeverzones.



Figuur 2.4 Opwerveling van slib door een varend schip op de Maas (bron: Google Earth)

Voor een goed begrip van het gedrag en eigenschappen van slib zijn veldmetingen onontbeerlijk. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op beschikbare verwerkte veldgegevens.

2.2.4 Veldmetingen

Veldmetingen spelen een cruciale rol in het begrip van de sedimenthuishouding van de Rijn-Maasmonding. Omdat er sprake is van een rivierennetwerk is het noodzakelijk te weten welke afvoeren en concentraties optreden in de afzonderlijke takken. Daarnaast is kennis noodzakelijk over het aanbod van sediment, eigenschappen (type) van het sediment, en de opgetreden erosie en sedimentatie. In de Rijn-Maasmonding speelt ook de zoutindringing een belangrijke rol. Op basis van reeds uitgevoerde meetcampagnes is het niet mogelijk een volledig beeld te krijgen van de stromingscondities en slibhuishouding in het gehele gebied.

Type metingen die voor de sedimenthuishouding van de Rijn-Maasmonding relevant zijn, zijn onder andere:

- concentraties en samenstelling zwevend stof (korrelgrootte, type sediment)

- fysische eigenschappen van het sediment (vlokken, valsnelheid, etc.)
- doorzicht
- chemische toestand (saliniteit, PH) en thermisch eigenschappen
- samenstelling bodemmateriaal (top, lagen)
- bodemveranderingen
- bagger- en stortgegevens

De verworven inzichten maken het mogelijk “effecten van maatregelen op het gebied van beheer en inrichting met een bepaalde mate van nauwkeurigheid te voorspellen en te kwantificeren.” Daarnaast zijn de meetwaarden van cruciaal belang voor het bouwen en kalibreren van numerieke modellen.

In een aantal studies worden verwijzingen gemaakt naar veldmetingen. Een aantal relevante verwijzingen zie hierna beschreven.

Sedimentbalans

Ten behoeve van de opstelling van een sedimentbalans van het Noordelijk Deltabekken is door respectievelijk Van Dreumel (1995) en Snippen et al. (2005) verslag gedaan van veldmetingen in dit gebied door Rijkswaterstaat. Snippen et al. (2005) hebben een inventarisatie gemaakt van benodigde basisgegevens in de periode 1990-2000. Het betreft lodingen, bagger- en stortwerk, zwevend stof en debieten.

Van Dreumel (1995) geeft aan dat slib- en zandtransporten op het traject tussen meetstations wijzigingen ondergaan. De (weinige) metingen zijn ook niet allemaal op geschikte dieptes verricht. Gesteld wordt dat een meting op een diepte van orde van 3 meter diepte goed is, omdat de halve waterdiepte in het NDB ongeveer 3 meter of meer is.

Verder meldt Van Dreumel (1995) terecht op dat hoeveelheden in m^3 en in tonnen niet direct met elkaar zijn te vergelijken. Voor de sedimentbalans worden hoeveelheden slib en zand beide uitgedrukt (omgerekend) in massa's droge stof (in kg). De gemeten bodemveranderingen op basis van lodingen worden echter aangeduid in volumehoeveelheden (in m^3) vastgelegd, waarbij ook de porositeit van het materiaal een rol speelt welke niet constant is. Tenslotte worden gebaggerde hoeveelheden ook niet op eenduidige wijze vastgelegd: soms gaat het om volume in de beun, en soms om het volume bodemmateriaal berekend na in- en uitpeiling van het baggerwerk. Voor de afstemming van deze hoeveelheden moeten fysische parameters (dichtheid, porositeit, etc.) afgeleid worden uit bemonsteringen. Belangrijk is het percentage droge stof van de massa van een monster natte specie. Droge stofconcentratie wordt uitgedrukt in kg/m^3 . Ook is het van belang dat de grens tussen zand en slib altijd bij dezelfde korreldiameter wordt gelegd. Dat is in de Rijn-Maasmonding studies niet altijd het geval (soms 50 μm en soms 63 μm).

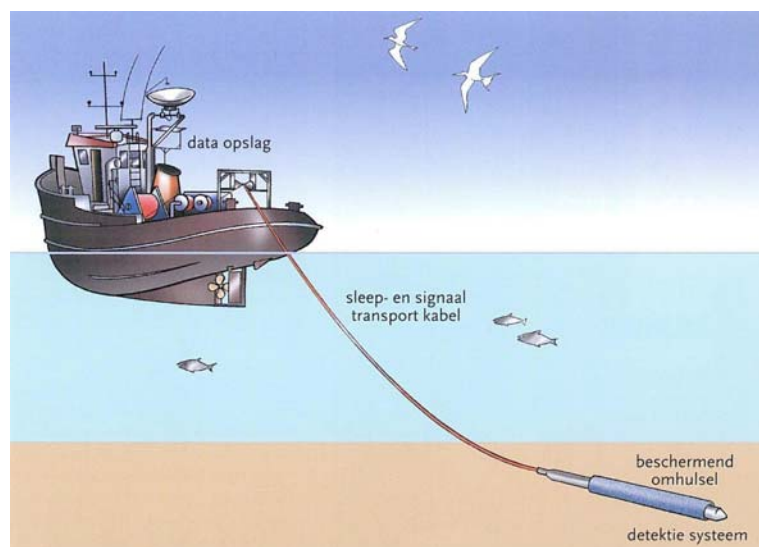
Metingen in kader van INVOWA en RIJMAMO in 1993

In het kader van het project INVOWA (INtegrale analyse VOordelta en WATERweg) is in de jaren 90 het 3D waterbewegingsmodel RIJMAMO ontwikkeld. Voor de ontwikkeling van

het 3D model was het nodig extra veldgegevens te verzamelen, waarvoor in 1993 een meetcampagne heeft plaatsgevonden. Idealiter zou men grootschalige simultaanmetingen van verschillende grootheden op verschillende locaties willen uitvoeren. Bij gebrek aan beschikbare meetboten, heeft men echter gebruikgemaakt van (i) verankerde meetpunten, waarmee (in mei 1993) snelheden en zoutgehaltes zijn gemeten en (ii) een beperkt aantal meetboten die (op drie dagen) de verticale verdelingen van snelheid en zout hebben gemeten. Zodoende is men meer te weten gekomen over de horizontale zoutgradiënt in de mond van het Haringvliet en over enkele aspecten van het fenomeen zoetwaterbel aan de zeezijde van de dam. De metingen zijn gedaan onder gemiddelde omstandigheden (geen grote getijverschillen, normale rivierafvoer) maar gaven wel inzicht in de eisen die gesteld moeten worden aan verdere metingen.

MEDUSA-metingen in 2002 en 2003

Koomans van Medusa explorations BV heeft metingen uitgevoerd ter bepaling van de bodemsamenstelling van het Haringvliet (in 2002) en in de Amer, Merwede en Bergsche Maas (2003) (Koomans, 2002, 2003). Onder andere in Snippen et al. (2005) wordt hier verslag van gedaan. De metingen zijn uitgevoerd met MEDUSA (het Multi-Element Detector system for Underwater Sediment Activity). Dit is een instrument dat op basis van stralingsmetingen een beeld geeft van de samenstelling (het slibgehalte), diameter, en dichtheid van het bodemmateriaal. Daarmee is het een systeem waarmee op een efficiënte manier de samenstelling van bodemmateriaal in kaart kan worden gebracht. In de huidige opzet bestaat het systeem uit een aantal sensoren, waarvan de gammasonde de belangrijkste is. Deze gammasonde meet met grote nauwkeurigheid, de concentraties van een aantal in de bodem aanwezige radioactieve stoffen. MEDUSA is gevoelig voor de bovenste 30 tot 50 cm van de bodem. Bij metingen aan de onderwaterbodem wordt de sensor in een beschermende PVC-buis achter een schip over het sediment gesleept, zie Figuur 2.5. Na de veldmeting worden de ruwe meetgegevens (diepte, dGPS, gamma spectra, geluid) samengevoegd en worden de gamma spectra geanalyseerd met behulp van spectrumanalyse.



Figuur 2.5 Metingen met MEDUSA

Van Wijngaarden et al. (2002a, 2002b) hebben onderzocht of het verschil in gehalte radionucliden in zand en slib gebruikt kan worden om de zand- en slibinhoud van sediment in water te bepalen. Radionucliden zijn isotopen van elementen met een onstabiele atoomkern die door radioactief verval overgaan in andere elementen, of andere isotopen van hetzelfde element, of stabiele kernen van hetzelfde isotoop. De zogenaamde “radiometrische vingerafdruk” van monsters met verschillende samenstelling uit het Haringvliet en het Hollandsch Diep zijn onderzocht. De radionuclide-verdeling van ^{40}K blijkt te kunnen worden gebruikt om de oorsprong (in dit geval Rijn of Maas) van het sediment te achterhalen. De vingerafdruk gebaseerd op de ^{232}Th - en ^{238}U -gehalten zijn gebruikt om zand en slib te onderscheiden. De totale waargenomen $^{232}\text{Th} + ^{238}\text{U}$ activiteit kan worden gebruikt om een kwantitatieve inschatting van zand- en slibinhoud te geven.

Slibmetingen Nieuwe Waterweg, Oude Maas en Nieuwe Maas in 2004 en 2006

Michel de Nijs (2007) heeft in zijn studie naar het gedrag van slib gebruik gemaakt van slib-data van meetcampagnes op de Nieuwe Waterweg, de Oude Maas en de Nieuwe Maas. Het betreft twee meetcampagnes met boten op 16 juni 2004 en op 11 april 2006, en de metingen van een meetframe. De data zijn door Michel de Nijs verder uitgewerkt en toegepast voor het kalibreren en valideren van een fijnmazig Delft3D model voor het betreffende gebied.

Zwevend stofmetingen in 2006

Ten behoeve van het kalibreren van zwevend stofmodellen (het vullen van gegevenslacunes) is in het voorjaar 2006 een door RIZA voorgesteld meetplan uitgevoerd. Conform het meetplan is het zwevend stofgehalte bepaald op vijftig locaties in de Rijn-Maasmonding en bij drie verschillende rivierafvoeren. Meijers & Icke (2006) beschrijven de analyses en additionele proeven die met de resultaten zijn uitgevoerd, en de verwerking ervan tot een gekalibreerd zwevend stofmodel met de DelWAQ module in SOBEK. Uit 51 oppervlaktemonsters (genomen op 1 meter onder het wateroppervlak) tijdens drie afvoeren, wordt het volgende vastgesteld:

- Er bestaat een duidelijke relatie tussen rivierafvoer en concentratie, waarbij de zwevend stofconcentratie toeneemt bij een toename van de afvoer.
- De afname van de stroomsnelheid langs de riviertakken (verwijding van stroomprofiel in getijdengebied) zorgt voor een daling van het zwevend stofgehalte in stroomafwaartse richting. In het beschouwde gebied was dit effect waarneembaar op de trajecten Boven Merwede, Nieuwe Merwede en Hollandsch Diep.
- Het effect van toename van stroomsnelheden onder invloed van getij is ook merkbaar: in de Dordtsche Kil blijft veel zwevend stof in suspensie en in de Amer treedt onder bepaalde omstandigheden resuspensie op. Desondanks blijkt uit de sedimentbalans van Snippen et al. (2000) dat in beide takken netto tussen 1990 en 2000 een sedimentatie van slib heeft plaatsgevonden.

Op vier punten zijn centrifugemonsters genomen, waaruit de korrelgrootteverdeling en de valsnelheid zijn bepaald. De verschillen in de korrelgrootteverdelingen van de locaties worden toegeschreven aan het effect van stromingsvertraging: de benedenstroomse locaties

bezitten relatief veel fijne fracties. De invloed van afvoerverschillen op korrelgrootteverdelingen is nauwelijks merkbaar. Tenslotte dient te worden opgemerkt dat de behandeling van de monsters deflocculatie tot resultaat had. Hierdoor zijn de samengekitte deeltjes logeslagen en zijn de zeer fijne fracties (tot 10 μm) dominant in de korrelverdelingen aanwezig. De fracties tussen deze zeer fijne deeltjes en het grotere, fijnzandige materiaal, zijn niet significant meer aanwezig in de uiteindelijke korrelverdelingen.

Bij de valsnelheidsproeven was het opvallend dat een relatief groot deel (vermoedelijk bestaande uit organisch materiaal) helemaal niet bezonk, zelfs niet na een week. De valsnelheidsverdelingen geven aanwijzingen voor aanwezigheid van bijvoorbeeld fijn, licht materiaal (o.a. veen): een groter aandeel fijn sediment betekent een groter aandeel lage valsnelheden. Via de wet van Stokes zijn tenslotte de valsnelheidsverdelingen vergeleken met de korrelgrootteverdelingen. Verschillen waren terug te voeren op de genoemde deflocculatie (voor geflocculeerd materiaal gaat overigens de wet van Stokes niet op).

SILTMAN

Naar aanleiding van aanslibbing in de Maasmond, is door RIKZ, Rijkswaterstaat het SILTMAN-onderzoek (De Kok, 2000) uitgevoerd naar (i) waar het slib vandaan komt, (ii) wat de belangrijkste transportmechanismen zijn en (iii) onder welke condities sedimentatie of aanslibbing plaatsvindt (De Kok 2000). Er zijn hiertoe veldmetingen gedaan (monsternames en in situ metingen) die vervolgens, in combinatie met data van verschillende routinematig ingewonnen gegevens, gebruikt zijn ter verbetering van numerieke modellen voor het simuleren van slib in het Maasmondgebied.

Om de aanslibbingsprocessen te kunnen begrijpen, worden drie vormen van slibtransport onderscheiden: (i) de lage concentratie suspensie, die relatief homogeen over de verticaal verdeeld is, (ii) de hoge concentratie benthische suspensies (afgekort HCBS) en (iii) fluid mud. De lage concentratie suspensie reikt het meest ver uit de kust en is alleen niet voldoende om snelle aanslibbing in de Maasmond te kunnen verklaren. HCBS zit vooral dichtbij de bodem, maar de dichtheid is hierbij nog niet dusdanig groot dat er geen transport tegen een (lichte) bodemhelling kan plaatsvinden. HCBS kan in verband worden gebracht met snelle sedimentatie. De meest vloeibare lagen van fluid mud, 'mobile fluid mud' genaamd, zouden bij kunnen dragen aan snelle sedimentatie (of 'rapid siltation events'), maar de benodigde snelheden van enkele decimeters per seconde die hierbij horen, worden zelden waargenomen.

Op grond van analyses van in situ-metingen is gebleken dat pieken in benthische concentraties en hoeveelheden aangeslibd materiaal te maken hebben met overschrijding van bepaalde golfhoogtes. Westerstormen kunnen grote hoeveelheden slib (uit de zeebodem) losmaken (mobiliseren), die later de Maasmond kunnen binnendringen. Tevens draagt gesuspenseerd slib bij aan aanslibbing, doordat het tijdens (zuidwestelijke) stormen richting de Maasmond getransporteerd wordt.

Tussen 1995 en 1997 is een aantal slibmetingen verricht in en nabij de monding van de Maas. Voor een overzicht van de bijbehorende rapporten zie De Kok 2000, blz. 13.

Westerschelde

In een onderzoeksrapport naar de slibproblematiek van de Westerschelde (Ten Brinke 1992), wordt gesteld dat voor de berekening van de ‘fluviatiele slibinput’ beseft moet worden dat slib ook op de volgende manieren in het watersysteem terecht kan komen:

1. Via huishoudelijk afvalwater
2. Via industrieel afvalwater
3. Via illegale mestlozingen van agrarische bedrijven
4. Via erosie van slibhoudende bodems
5. Via neerslag.

De bijdrage via neerslag is veruit het kleinst en de term ‘erosie van slibhoudende bodems’ is veruit het grootst. Het lukt echter niet om een betrouwbare slibbalans van de Westerschelde op te stellen, omdat er een grote onzekerheid is in enkele basisgegevens, waardoor het niet mogelijk is om de “slibuitwisseling tussen estuarium en Noordzee eenduidig vast te stellen.”

Enkele onzekerheden die van invloed zijn op de balans zijn onder andere de keuze van de periode waarover het jaarlijkse bagger- en stortwerk in de Beneden Zeeschelde wordt berekend en de keuze van het tijdsinterval waarover de morfologische veranderingen van platen, slikken en geulen worden bestudeerd. Door deze tijdsinvloed middelt een balans op jaarbasis allerlei seizoenseffecten weg. Dit temporele effect vormt een groot probleem bij het onderling vergelijken van balansen van verschillende herkomst (bijvoorbeeld België en Nederland).

2.2.5 Beheervragen Rijn-Maasmonding gebied

Beheervragen in de Rijn-Maasmonding worden geformuleerd door Rijkswaterstaat Zuid Holland (ZH) en het Havenbedrijf Rotterdam, die verantwoordelijk zijn voor het onderhoud van de rivieren en de havens in de Rijn-Maasmonding. Zij worden herhaaldelijk geconfronteerd met beheervragen waar slib een belangrijke rol speelt. Om dergelijke vragen te beantwoorden is kennis over het gedrag van slib, en over het voorspellen van toekomstig gedrag. Een kwantitatieve beantwoording van deze vragen vraagt om de ontwikkeling van instrumenten voor het modelleren van zand en slib.

De aanwezigheid van slib in de benedenrivieren beïnvloedt de functies veiligheid, toegankelijkheid (scheepvaart) en natuurlijkheid (ecologie). Deze functies kunnen worden gebruikt om een eerste indeling te maken van beheervragen:

- Veiligheid heeft betrekking op de hoogte van waterstanden en stabiliteit van de waterkeringen. Hierbij speelt vooral aanslibbing en erosie een rol. Voor de mate van aanslibbing is met name de sedimentconcentratie in het onderste gedeelte van de waterkolom van belang (Bruens et al, 2006).
- Toegankelijkheid heeft met name implicaties voor de nautische diepte van geulen en havens. Deze wordt voornamelijk bepaald door aanslibbing.
- Met betrekking tot Natuurlijkheid zijn de KaderRichtlijn Water- en de Vogel en Habitat Richtlijn van toepassing, hetgeen implicaties geeft voor de handhaving van habitats en soorten. Het handhaven van habitats en soorten wordt voor een groot deel bepaald door

het doorzicht (onderwater lichtklimaat). Het doorzicht beïnvloedt immers de primaire productie en daarmee ook de hogere trofische niveaus. Voor de mate van doorzicht is met name de sedimentconcentratie bovenin de waterkolom van belang (Bruens et al, 2006). Voor het handhaven van habitats en soorten is daarnaast de aanslibbing op ecologisch waardevolle gebieden.

Een vergelijkbare indeling van beheervragen wordt gehanteerd in de LTV-slib studie (Lange-TermijnVisie slib) die voor de Westerschelde is uitgevoerd (Bruens et al, 2006). In het VOP-slib meerjarenplan (Voortschrijdend Onderzoeksprogramma slib) wordt voor beheervraagstukken in zoute wateren een indeling gemaakt naar effecten van baggeren en storten (bijv. voor MER), de vragen bij vergunningverlening (voor MER voor een vergunningaanvraag in geval van grote projecten zoals de Maasvlakte), voor verkennende studies of beleidstudies (buiten kader van een MER verplichting) (Bruens et al. 2007). Overigens kan aan bovengenoemde indeling ook nog een aspect ten aanzien van bodemverontreiniging worden toegevoegd.

Een andere mogelijkheid voor indeling van beheervragen is deze te baseren op de termijn:

- Korte termijn vragen: beheervragen gerelateerd aan actuele ontwikkelingen en ingrepen in het riviergebied (zoals het stoppen van de waargenomen sterke erosie op de Dordtsche Kil en Oude Maas);
- Lange termijn vragen: beheervragen gerelateerd aan toekomstige (grootschalige) ontwikkelingen van het riviergebied (zoals het effect van klimaatverandering op de Rijn-Maasmonding).

Beide typen vragen zijn van een andere schaal en vragen een andere aanpak. Er is een analogie met het onderscheid in weersvoorspelling en klimaatvoorspelling. Het weer betreft de actuele toestand van de atmosfeer, en kan slechts enkele dagen vooruit worden voorspeld. Het klimaat betreft de gemiddelde omstandigheden die typerend zijn voor bepaalde seizoenen en locatie, en heeft betrekking op de lange-termijnsituatie. Klimaatvoorspellingen geven geen exacte voorspellingen van dag tot dag zoals gebruikelijk is voor weersvoorspellingen.

Een aantal beheervragen is voor zowel de riviertrajecten in de Rijn-Maasmonding als voor andere trajecten zoals de estuaria (Westerschelde), meren en plassen van toepassing. Veel generieke vragen over het benedenrivierengebied zijn in het verleden al vaak gesteld, maar zullen voorlopig ook actueel blijven. Bijvoorbeeld de precieze impact van sedimentonttrekking door baggeren blijft een belangrijke beheervraag. Voor een overzicht van relevante beheervragen kan onder andere worden uitgegaan van de volgende studies:

- Houwing & Blom (2001): “Uit inventarisatie van de beheersvragen in het NDB blijkt dat (vrijwel overal) de vraag speelt waar zich in de komende jaren of decennia sediment zal afzetten en waar erosie van (verontreinigd) bodemmateriaal zal optreden. (...) Op een grotere tijd- en ruimteschaal speelt de vraag hoe de bodemligging zich in het Noordelijk Deltabekken zal ontwikkelen.”
- Een meer recenter uitgebreide inventarisatie van beheervragen is gepresenteerd in de “Onderzoeksagenda Morfologie”, opgesteld door HKV en WL | Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat, Waterdienst (Wijbenga & Mosselman 2007). Hierin

worden zowel de geplande beheers- en onderhoudswerken als de kennislacunes opgesomd die hiermee samenhangen. Zo wordt ook duidelijk wat de komende tijd voor onderzoek noodzakelijk is om de beheerstaken goed uit te kunnen voeren.

- Ook in de studie VOP-slib is aandacht besteed aan beheervragen. Hoewel VOP-slib vooral is uitgevoerd ten behoeve van slib in zoutwater (Noordzee, estuaria) komen ook beheervragen ten aanzien van zoetwater aan de orde.
- Uit de LTV studie voor Westerschelde blijkt dat voor dit gebied de Nederlandse overheid vooral interesse heeft in ecologische aspecten en de Vlaamse overheid vooral in de optimalisatie van sedimenttransportcapaciteit (d.w.z. de minimalisatie van het onderhoudsbaggerwerk).
- Ten behoeve van de voorliggende studie heeft op 22 november 2007 overleg plaatsgevonden met Rijkswaterstaat ZH. Tijdens deze bijeenkomst is nader ingegaan op de belangrijkste beheervragen die in het gebied een rol spelen. Het verslag van deze bijeenkomst is opgenomen in bijlage A. De beheervragen uit de “Onderzoekagenda Morfologie” (Wijbenga en Mosselman) zijn daarbij aan de orde gekomen, en er heeft een verdere uitwerking ten behoeve van specifieke slibproblemen plaatsgevonden. De vragen zijn als basis gebruikt voor het plan van aanpak beschreven in paragraaf 3.3.

Het lijkt onvermijdelijk dat er frictie kan zijn tussen de door de waterbeheerders gestelde vragen en de door de modellers gepresenteerde antwoorden. De beheersvragen gaan bij voorkeur in op een specifieke situatie en verlangen een grote nauwkeurigheid, terwijl in de modellen normaliter sprake is van een zekere mate van onzekerheid en de uitkomsten voor een groter gebied gelden. Hieruit moet worden geconcludeerd dat men voorzichtig om moet gaan met het gebruik van numerieke modellen en een realistisch beeld dient te hebben van (de kwaliteit en geldigheid van) de te verwachten uitkomsten (Winterwerp 2007, pg. 26). De vragen moeten aan het model gesteld worden met een gepast bewustzijn van de mogelijkheden van dat model.

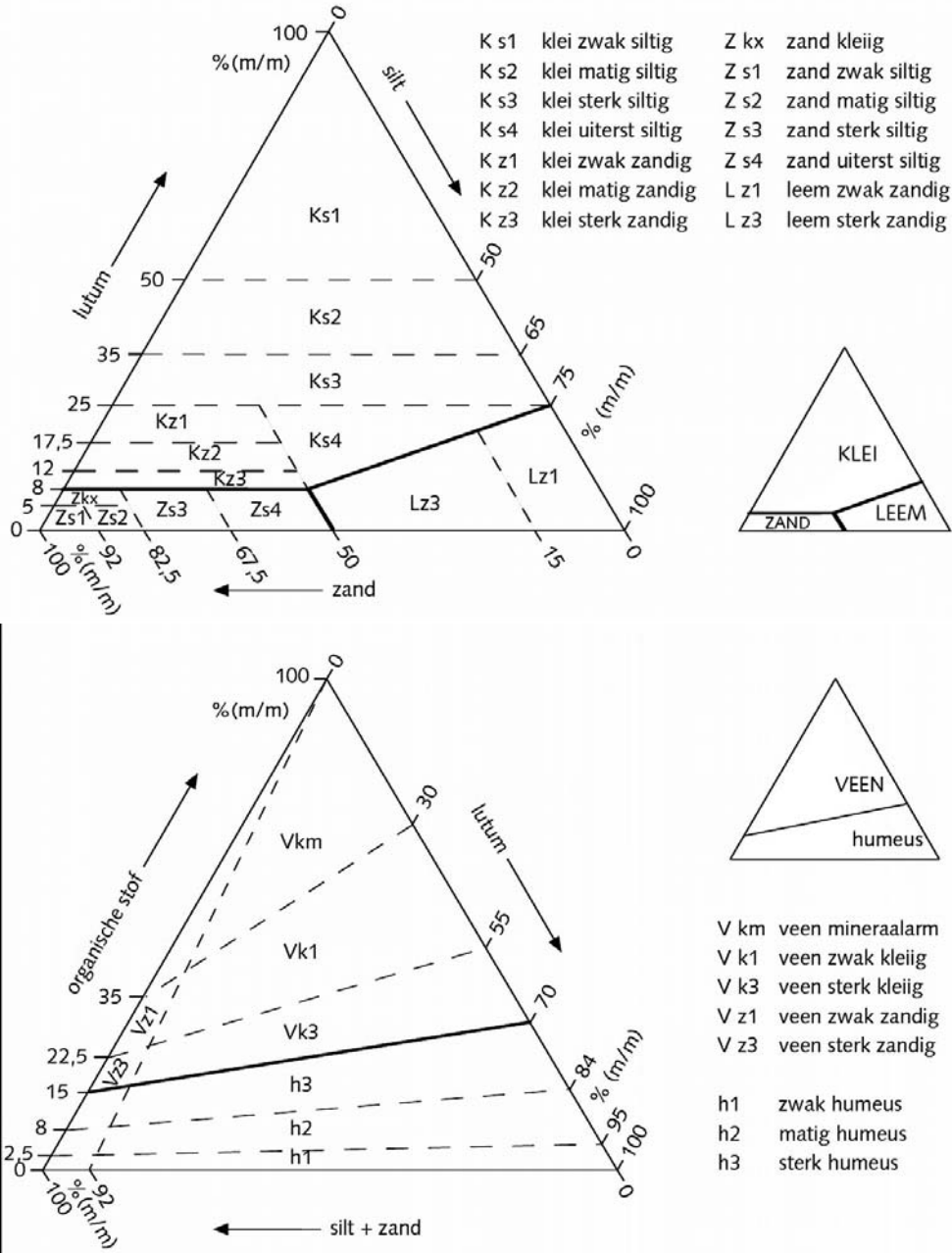
In LTV-/VOP-slib (Bruens et al, 2006, 2007) wordt verder voorgesteld dat een ‘effectketen’ kan bijdragen aan een betere afstemming van bestaande en in ontwikkeling zijnde kennis van fysica en ecologie (uit verschillende projecten) op toepassing voor beheersvragen. Het gebruik van deze effectketens wordt verder uitgewerkt in VOP-slib, en kan mogelijk ook van belang zijn voor de aanpak van beheervragen in de Rijn-Maasmonding.

2.3 Relevante concepten voor modellering van slib en zand-slib

2.3.1 Definities en eigenschappen van slib

De meest gebruikelijke karakterisering van het onderscheid in zand en slibfracties is aan de hand van korrelgrootte (Kessel en Vonk, 1999, Winterwerp en Van Kesteren, 2004). Korrels groter dan 63 μm worden over het algemeen als zand beschouwd, korrels kleiner dan 2 μm als klei, en korrels tussen 2 μm en 63 μm als silt. Slib wordt wel gedefinieerd als fractie deeltjes kleiner dan 63 μm (d.w.z. een mengsel van voornamelijk klei, silt, fijn zand, water, en organisch materiaal). Echter deze grens van 63 μm is arbitrair en in de literatuur zijn ook andere waarden te vinden (tussen 2 μm en 63 μm). Slibdeeltjes zijn organisch (dat wil zeggen met een biologisch oorsprong, bijvoorbeeld humus of veen) of anorganisch (overwegend bestaande uit kleimineralen). Over het algemeen geldt dat zoetwaterslib een

hoger organisch gehalte heeft dan zoutwaterslib, waardoor het zoetwaterslib een lagere dichtheid en veelal een grotere cohesie heeft. In grondmechanische en sedimentologische studies wordt vaak gebruik gemaakt van de NEN5104 klei-leem-zanddriehoek en de NEN5104 Veendriehoek zoals gegeven in Figuur 2.6 (de NEN 5104 grinddriehoek is hier niet getoond).

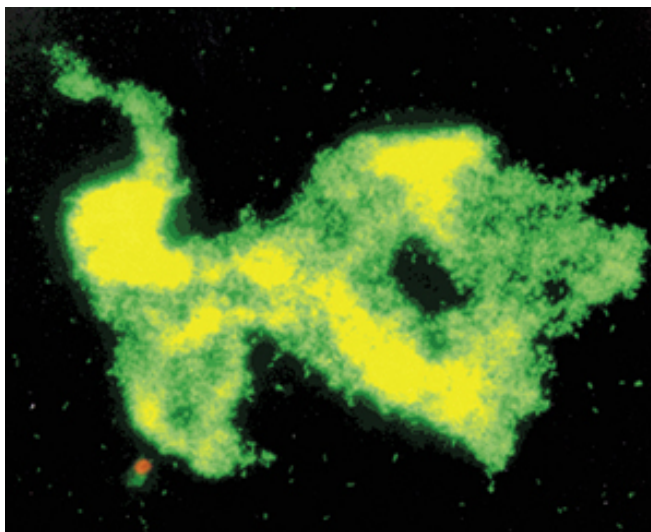


Figuur 2.6 Standaardclassificatie NEN 5104 Klei-leem-zanddriehoek (boven) en NEN5104 Veendriehoek (onder) (bron: Van de Meulen et al, 2003)

De horizontale lijnen in de klei-leem-zanddriehoek reflecteren de dominante rol van klei fracties op het fysische gedrag van het sediment. De dikke lijnen scheiden de gebieden waar zand, silt of zand domineert. De Veendriehoek is een classificatie voor organisch rijke gronden. De getrokken lijn scheidt het gebied waar organische stof is dominant (veen) van

het gebied waar mineralen het grondmechanische gedrag bepalen (humeus). Andere belangrijke grondmechanische parameters zijn bijvoorbeeld de consistentiegrenzen of Atterbergse grenzen (voor plasticiteitgrens en vloeigrens).

De cohesie tussen de slibdeeltjes wordt veroorzaakt door elektrostatische aantrekking en Van der Waalskrachten en wordt versterkt door het aanwezige organische materiaal en zoutconcentratie. De relatief erg grote specifieke oppervlakte van slibdeeltjes speelt een belangrijke rol bij de interactie en zo ook bij de cohesie tussen de deeltjes. Een zeer kenmerkend effect van deze onderlinge aantrekking is het ontstaan van vlokken. Deze vlokken zijn zeer open structuren van samengekleefde kleideeltjes (bijv. duizenden tot tienduizenden deeltjes), en hebben een zeer hoog watergehalte (tot 80 – 90 volume-%). De vlokvorming ontstaat wanneer de afstoting door negatieve lading op de kleideeltjes wordt geneutraliseerd door bijvoorbeeld zoutionen (zie ook Winterwerp en Van Kesteren, 2004).



Figuur 2.7 Microscopische opname van een vlok (bron: Laboratorium voor Vloeistofmechanica, TU-Delft)

Naast het cohesieve gedrag van slib is een opvallend verschil met zand dat de doorlatendheid van een slibbodem erg gering is en dat een sliblaag niet direct na sedimentatie zijn sterkte ontwikkelt maar langzaam consolideert.

In een waterkolom kan slib zich direct boven de bodem bevinden (in plassen wordt dit bodemslib, hinderslib of epipelon genoemd) of in suspensie (in plassen wordt dit wel seston genoemd). De gesuspendeerde deeltjes kunnen bezinken onder invloed van de zwaartekracht. Bij dit sedimentatieproces zijn de grootte van het deeltje en de daaraan gerelateerde valsnelheid de belangrijkste parameters. Van depositie is pas sprake wanneer de deeltjes de bodem bereiken. Vervolgens kan consolidatie plaatsvinden, waarbij de slibdeeltjes van een losse pakking naar een sterkere, vastere pakking overgaan. Zolang dit nog niet het geval is, kunnen de deeltjes eenvoudig opgewerveld of geresuspendeerd worden (door de stroming). Naarmate het slib langer heeft kunnen consolideren wordt het moeilijker het materiaal weer te resuspenderen.

De aanwezigheid van slib kan belangrijke consequenties hebben voor de definitie van het bodemniveau. In gebieden waar voornamelijk erosie optreedt, is er meestal een scherpe overgang tussen water en bodem. In sedimentatiegebieden bevindt zich echter bovenop de

‘harde bodem’ nog een zachte sliblaag, die in dichtheid en sterkte toeneemt met de diepte (Van Kessel & Vonk 1999). Dit gegeven maakt verschillende definities van het bodemniveau mogelijk.

Over het algemeen bevinden zich in de riviertakken in de Rijn-Maasmonding gelijktijdig slib en zand in de bedding. De interactie tussen het zand en slib kan belangrijke consequenties hebben voor resuspensie van materiaal. Een belangrijke studie naar de processen en beschrijving van het gedrag is beschreven in het proefschrift van Van Ledden (2003), en de papers van Van Ledden et al. (2004) en Van Ledden et al (2006). Van Ledden stelt een classificatie voor van het gedrag van zand-slibmengsels gebaseerd op geschikte parameters voor cohesie en de netwerkstructuur van het mengsel. Vervolgens is op basis van proeven een overgang van niet-cohesief naar cohesief gedrag vastgesteld als functie van de lutum/silt verhouding in de slibfractie (op basis van classificaties vergelijkbaar met de driehoeken in Figuur 2.6). Door Walter Jacobs wordt op dit moment (2007) in meer detail onderzoek verricht naar specifieke fysische eigenschappen van de zand-water mengsels. Belangrijke aspecten ten behoeve van de erodeerbaarheid zijn de verhouding zand en slib, het watergehalte en het type kleimineraal. Daarnaast spelen kunnen ook biologische effecten een grote rol spelen bij de erodeerbaarheid.

Eind jaren negentig is een overzicht gemaakt van beschikbare kennis binnen WL | Delft Hydraulics over het gedrag van slib in natuurlijke systemen in het “Handboek Zoetwaterslib” (Van Kessel & Vonk 1999). Hoewel hierin voor gekozen is om geen estuariene systemen te behandelen, maar 'alleen' zoetwatersystemen met beperkte stroomsnelheden (geen rivieren), geeft het duidelijk de breedte van het onderwerp aan. Naast fysische processen zijn er talloze chemische en biologische processen die in de slibproblematiek een rol spelen. Moeilijkheden in het modelleren hangen samen met de onderlinge verwevenheid van deze processen en hun uiteenlopende tijdschalen. Een andere belangrijke informatiebron van kennis over slib (met name ook vanuit het oogpunt van zoutwater) is Winterwerp en Van Kesteren (2004).

Bij elke bestudering van slibbeweging heeft men te maken met een veelheid aan fysische verschijnselen. In het Handboek Slib (Van Kessel & Vonk, 1999) worden onder andere genoemd:

- bezinking: het uitzakken van deeltjes onder invloed van hun gewicht, uitgedrukt in valsnelheid;
- vlokvorming: de neiging van slibdeeltjes om aggregaten te vormen met een grotere diameter en valsnelheid dan de afzonderlijke deeltjes, zie Figuur 2.7;
- hindered settling: bij hoge volumeconcentraties van deeltjes (en vlokken) zullen deze deeltjes elkaar gaan hinderen, en neemt de valsnelheid af;
- consolidatie: het inklinken van sediment op de bodem;
- bodemschuifspanning: de schuifspanning nabij de bodem opgewekt door stroming en golven, en die bijdraagt aan resuspensie of depositie van het sediment;
- dispersie: weergave van het effect van turbulentie op zwevend stofconcentratie;
- turbulentie: de chaotische beweging van het water welke het transport van slib bevordert;
- sedimentatie en erosie: de uitwisseling van sediment tussen de “waterfase” en de bodem die leidt tot morfologische veranderingen;

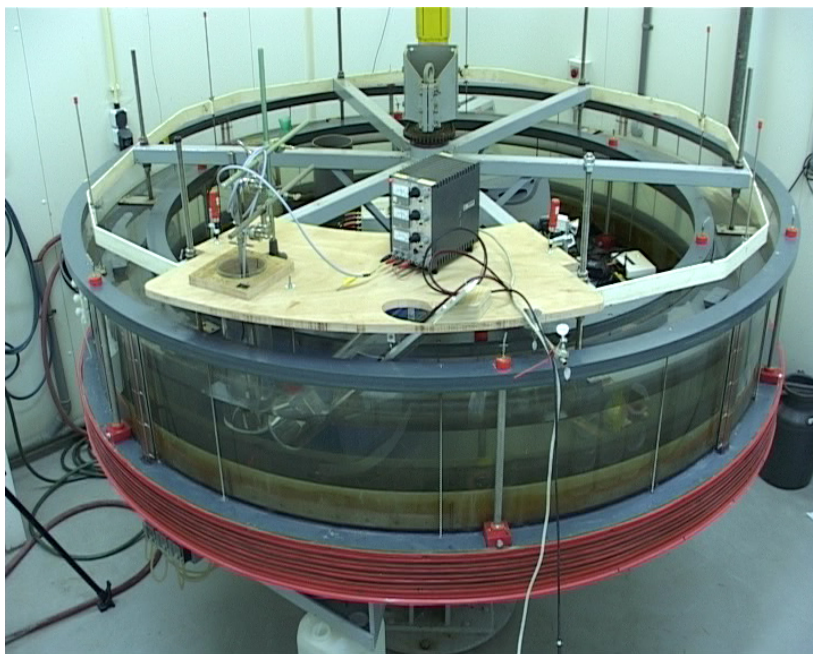
- resuspensie: opnieuw in suspensie komen van afgezet sediment;
- gelaagdheid: het ontstaan van dichtheidsstromen in geval van hoge slibconcentraties.

In toevoeging van fysische aspecten spelen bij slibvraagstukken tal van chemische aspecten, (van invloed op vlokvorming, mobiliteit van verontreinigingen en erodeerbaarheid van de waterbodem) en biologische aspecten (zoals het produceren van slib door algen). In praktijk moeten de slibprocessen niet als losstaand beschouwd worden, maar is er vaak een complexe integratie van disciplines nodig om het gedrag van slib enigszins te begrijpen.

2.3.2 Laboratoriumexperimenten

Laboratoriumstudies worden enerzijds gebruikt voor het analyseren van fysische processen, en anderzijds voor het bepalen van karakteristieken van sedimentmonsters uit het veld. De eerste categorie van laboratoriumstudies wordt toegepast ten behoeve van kennisontwikkeling ten aanzien van fysische eigenschappen en processen van slib. Anders dan in het veld is het in het laboratorium mogelijk de processen in grote mate van detail onder gecontroleerde omstandigheden uit te voeren. Daarentegen gaat het om kleinschalige proeven. De tweede categorie van studies is gekoppeld aan veldmetingen, en is bedoeld voor het bepalen van karakteristieke kenmerken van de monsters (zoals de grondmechanische eigenschappen van bodemmonsters).

Voor het uitvoeren van experimenten met slib zijn diverse faciliteiten beschikbaar. Naast gebruikelijke stroomgoten kan bijvoorbeeld ook onderzoek worden uitgevoerd in de carousel (“rotating annular flume”) zoals die in WL | Delft Hydraulics of de Technische Universiteit Delft worden toegepast. Omdat de goot rond is, is als het ware sprake van een oneindig lange stroomgoot, waarbij effecten van in- en uitstroombanden kunnen worden voorkomen. De driedimensionale secundaire stromingseffecten (spiraalstroming) door de gekromde stroming worden ge-elimineerd met behulp van een ronddraaiend deksel.



Figuur 2.8 Carousel voor slibonderzoek in WL | Delft Hydraulics

Bijvoorbeeld Winterwerp et al. (1993) doen verslag van een laboratoriumstudie met natuurlijk slib uit de Westerschelde. De ronddraaiende carousel ('annular flume') van WL | Delft Hydraulics is gebruikt om een aantal getijdencycli na te bootsen. Flocculatie (in de fase met lage stroomsnelheden) en resuspensie (toegeschreven aan twee verschillende mechanismen) werden beide waargenomen en beschreven. Voorgesteld wordt om de 'entrainment' te beschrijven met behulp van analogie met tweelagen stromingstheorie. Ook door Walter Jacobs is recentelijk (2007) onderzoek uitgevoerd in de carousel van de TU Delft, voor het vaststellen van erodeerbaarheid van zand-slib mengsels.

Voor het onderzoek naar valsnelheden van slib kan gebruik worden gemaakt van een slibkolom. Het onderzoek van Francesca Mietta aan de TU Delft naar vlokvorming wordt bijvoorbeeld uitgevoerd in de slibkolom in het Laboratorium voor vloeistofmechanica (zie Figuur 2.9). In de kolom worden slibdeeltjes aan de bovenzijde losgelaten en aan de onderzijde worden de deeltjes vervolgens gedetecteerd. De kolom is geplaatst in een klimaatgecontroleerde cabine om convectieve stromingen door temperatuurverschillen te voorkomen. Voor de metingen van vlokken wordt verder met geavanceerde opnameapparatuur gewerkt.



Figuur 2.9 Slibkolom in het laboratorium voor vloeistofmechanica in de Universiteit Delft (foto: Francesca Mietta)

2.3.3 Lopend onderzoek

Ten aanzien van lopend en verwacht onderzoek in Delft (zowel aan de TU Delft als bij WL | Delft Hydraulics) voor de fysische aspecten van slib en zand slib zijn de volgende studies relevant:

- Door Francesca Mietta wordt in het Laboratorium van Vloeistofmechanica van de TU Delft onderzoek verricht naar vlokvorming (zie ook paragraaf 2.3.2);
- Walter Jacobs bestudeert in het Laboratorium van Vloeistofmechanica van de TU Delft onderzoek naar de eigenschappen van zand-slibmengsels;
- Voorzien onderzoek: vervolg op het onderzoek van Van Ledden ten aanzien van zand-slib modellering.
- Michel de Nijs rondt op dit moment zijn onderzoek af naar aanslibbing van havens in de Rijn-Maasmonding.
- In het kader van VOP-slib heeft overleg tussen slibdeskundigen en ecologen van WL/Deltares plaats gevonden (Bruens et al, 2007). Hierbij zijn afspraken gemaakt over het verdere stappenplan (en afstemming tussen projecten), met als doel om de slibmodellering verder in te bedden in de ecologische modellering (ten bate van effectstudies in kader van Natuurwetgeving). Hiernaast is het slibmodel in 2007 tweemaal toegepast voor ecologische berekeningen: eenmaal voor de berekening van primaire productie, de tweede maal voor de berekening van algenbloei. Dit betekent een belangrijke stap vooruit ten opzichte van de situatie enkele jaren geleden, waarbij voor de ecologische modellering de natuurlijke achtergrondconcentratie van slib niet afkomstig was uit een slibmodel, maar werd geconstrueerd uit jaargemiddelde meetgegevens waarop door de gebruiker een seizoensdynamiek werd gesuperponeerd (volgend de zgn. random cosinusfunctie). De rapportage van deze activiteiten vindt plaats in andere kaders en is nog gaande. De hieruit voortvloeiende bevindingen kunnen de toepasbaarheid van het slibmodel verder helpen te vergroten.
- Slibmodellering speelt ook een belangrijke rol in de EU Kaderrichtlijn Water (KRW) instandhoudingsdoelen en verbetering: het bereiken van een goede ecologische en chemische toestand van oppervlaktewateren. Voor dit doel is het nodig maatlaten, graadmeters, en referentiesystemen vast te stellen. Ook dit onderwerp is nog lopend.

2.3.4 Transport van slib

De in paragraaf 2.3.1 behandelde kenmerken en definities geven een eerste inzicht in eigenschappen van slib, maar zeggen nog weinig over hoe slibtransport in een rivier tot stand komt. Een aantal belangrijke aspecten voor transport van slib in rivieren zijn:

- Slib wordt voornamelijk getransporteerd als zwevend stof (suspensie) in de waterkolom onder invloed van advectie en door turbulentie gegenereerde diffusie. Een speciaal geval is ‘fluid mud transport’, waarbij verplaatsing van slib plaats vindt door via vervloeiing van hoge concentratie sliblagen, en dus een vorm is van gelaagde of dichtheidsstroming. Voor het beschrijven van het suspensiegedrag moet worden uitgegaan van zwevend stofconcepten.

- Voor slib is het gebruikelijk de uitwisseling tussen waterkolom en bodem (via sedimentatie en erosie) afhankelijk te stellen aan de bodemschuifspanning en de bodemsamenstelling.

In tegenstelling tot slib wordt voor zand en grind het sedimenttransport gelijk genomen aan de lokale transportcapaciteit van de stroming (afhankelijk van lokale schuifspanningen, geformuleerd via een sedimenttransportformule). Deze aanpak is terecht voor sediment dat als bodemtransport (rollend en springend langs de bedding) wordt getransporteerd. In situaties met fijn zand dat als zwevend stof wordt verplaatst moet rekening worden gehouden met een vertraagde reactie van de concentratie op veranderingen in de lokale stromingsomstandigheden. Dat betekent dat een abrupte stroomsnelheidsverandering niet direct leidt tot een concentratiesprong, maar dat het sediment een bepaalde afstand nodig heeft voordat het uit is gezakt. Dit vertaalt zich in aanpassingslengtes en aanpassingstijd. Wanneer lengteschalen en tijdschalen klein zijn ten opzichte van de resolutie van beschouwde processen (in bijvoorbeeld veel 1D modellen met fijn zand) kan dit gedrag worden verwaarloosd, en mag de lokale concentratie gelijk worden genomen aan de lokale transportcapaciteit (evenwichtsconcentratie). Voor slib is dit echter vaak niet terecht (vaak is sprake van 'starved bed' omstandigheden waarbij capaciteit groter is dan het beschikbare slib op de bodem). Er moet voor slib dus wel degelijk met het aanpassingsgedrag worden gerekend. Dit wordt meestal gemodelleerd met een advectie-diffusiemodel.

In de rivieren wordt verder onderscheid gemaakt in (fijne) fracties die zich als spoeltransport gedragen, en grovere fracties die afhankelijk van de condities zich kunnen afzetten of kunnen worden opgewerveld van de bedding. Deze opdeling is terug te vertalen in de modelconcepten, echter met de nodige beperkingen. Voor de opdeling van fracties op basis van korrelgrootte kan in grootschalige modellen niet worden aangenomen dat onder alle omstandigheden een bepaalde fractie als spoeltransport of bodemmateriaaltransport is te kwalificeren (bijvoorbeeld, slib zal in de bovenrivieren als spoeltransport worden beschouwd, maar in de benedenrivieren bijdragen aan de morfologische veranderingen).

Transport van sediment is op zichzelf niet los te beschouwen van de bodem. De uitwisseling van sediment aan de bodem (resuspensie, depositie) hangt samen met de bodemsamenstelling van de lagen die worden blootgesteld aan de stromingskrachten. Bijvoorbeeld in het vaak gebruikte lagenmodel wordt de resuspensie en concentratie nabij de bodem gebaseerd op de bodemsamenstelling van de actieve laag of toplaag van de bodem. De dikte van de actieve laag is vervolgens bepalend voor de responstijd van het systeem en de samenstelling bepalen voor de erodeerbaarheid. De betreffende concepten worden vooral relevant in situaties waarbij meerder sedimentfracties (bijvoorbeeld zand/slib) een rol spelen. Modelconcepten voor transport, bodemsamenstelling en morfologie moeten in dit geval bestaan uit een geïntegreerd systeem. Voor zand/grind situaties wordt dit concept uitgewerkt door Astrid Blom van de TU-Delft (Blom, 2003).

Ook de porositeitsmethode van Frings, Kleinhans en Vollmer (2007) is een aanpak waarbij het sedimenttransport en de bodemsamenstelling gecombineerd integraal worden beschouwd. De porositeitsmethode is bedoeld voor het modelleren van zeer fijn materiaal als spoeltransport en de interactie met dit fijne materiaal en een grofkorrelige bodem. Doordat het fijne materiaal door kan dringen in de poriën van de bedding zal er een uitwisseling met een actieve laag optreden. Verwacht wordt dat dit concept een belangrijke

rol kan spelen bij het modelleren van slib in grootschalige modellen (bijvoorbeeld modellen die lopen van Duitsland tot Hoek van Holland).

Upscaling van de lokale ruimtelijke variaties en processen naar gemiddelde parameters is nodig voor 1D modellen. Eventueel is het mogelijk extra cellen te introduceren voor kribvakken (in DelWaq) om zo een 1-1/2 D model te maken.

Voor de erosie en sedimentatie van slib wordt gebruik gemaakt van het op schuifspanning gebaseerde concept van Krone (1962) en Partheniades (1965). Echter, door onder andere upscaling kan geen directe fysische waarde worden toegekend aan de kritische schuifspanningen in dit concept.

Ten aanzien van flocculatie kan worden opgemerkt dat deze leidt tot een verandering in de valsnelheid. Echter, deze is niet gelijk aan de valsnelheid van een korrel met dezelfde diameter. De floc heeft namelijk een relatief lage dichtheid. Vervolgens, wanneer de vlok zich op de bodem afzet, zal deze niet langer de grote diameter behouden. Verder geldt dat, hoewel in een flocculatiemodel een breed spectrum aan vlokdiameters optreedt, de valsnelheid relatief weinig variatie zal vertonen.

Recentelijk (2007) is de slibmodule van het Delft3D modelsysteem uitgebreid met een geparameteriseerd model voor de valsnelheid van sediment deeltjes onder invloed van flocculatie (Van Maren et al, 2007). Het model simuleert de neiging van afzonderlijke slibdeeltjes samen te klonteren tot floc bij lage turbulentie graad, en weer op te breken bij hoge turbulentie niveaus. Daarnaast houdt het rekening met een sterkere flocculatie, en daardoor hogere valsnelheid, bij hoge sediment concentraties. Bij zeer hoge concentraties neemt de valsnelheid echter weer af, onder meer door een verhoogde viscositeit. Dit proces is ingebouwd met een “hindered settling” formulering. Het $k-\epsilon$ turbulentie model is aangepast om ook toepasbaar te zijn bij hoge sediment concentraties. Dit is gedaan met een vereenvoudigde versie van een laag-Reynolds turbulentie model.

Tevens is in Delft3D consolidatie van modder ingebouwd als een verticale, naar beneden gerichte snelheid, en door een diffusie coëfficiënt (van Maren et al, 2007). Beide zijn afgeleid uit het flocculatie model en “Gibson’s consolidatie vergelijking”. De “shear-thinning” eigenschap van modder is vervolgens gemodelleerd met een Bingham visceusplastische beschrijving. Het Bingham model is omgezet in een viscositeitsachtige formulering en kan hoge viscositeiten aan, tot 1000 keer hoger dan de eddy viscositeit. Ook is een nieuwe methode geïntroduceerd om erosiesnelheden uit te rekenen, gebaseerd op fysische grootheden. In combinatie met consolidatie wordt deze erosieformulering intern toegepast bij een effectieve verticale stress. Deze effectieve stress wordt omgerekend naar een sedimentconcentratie, zodat de gebruiker een kritische sedimentconcentratie kan aangeven waar erosie plaatsvindt. Wanneer de concentratie hoger is dan de kritische concentratie, neemt interne erosie de rol van de werveldiffusie over. Er is daarnaast een bodemschuifspanningformulering voor hydraulisch gladde en ruwe modderbodems ingebouwd.

De consolidatieformuleringen vereisen een zeer hoge verticale gridresolutie, die met de standaard sigma-lagen verdeling in Delft3D niet bereikt kan worden. Hiervoor is een algemeen sigma-rooster ontwikkeld en geïmplementeerd in Delft3D. De verticale roosterresolutie is daarin afhankelijk van de concentratieprofielen, waarbij de hoogste

verticale resolutie wordt toegepast bij de hoogste verticale concentratiegradiënt. Deze verticale roosterverdeling is variabel in ruimte en tijd. Hierdoor kan een hoge resolutie bereikt worden daar waar het noodzakelijk is, terwijl gebieden waar een minder hoge resolutie nodig is, met minder verticale lagen rekenen. In dit algemeen sigma rooster worden de transport en consolidatie vergelijkingen opgelost, terwijl de impulsvergelijkingen voor waterbeweging op het standaard sigma rooster worden opgelost.

Ten behoeve van erosie van zand-slibbodems is ook het recent ontwikkelde model van Van Kesteren geïmplementeerd in het Delft3D modelsysteem (Winterwerp en Van Kesteren, 2004). Het model is gebaseerd op metingen in de Schelde in februari 2005. De kritische waarde voor erosie is gegeven door een kritische schuifspanning τ_{cr} , die kan worden gerelateerd aan eigenschappen van de kleimineralen en zandfractie.

2.4 Modellen voor de Rijn-Maasmonding

In Tabel 2.1 volgt een overzicht van de beschikbare numerieke modellen voor Rijn-Maasmonding die gebruikt kunnen worden voor het modelleren van slib. Aansluitend wordt van elk model een beschrijving gegeven. Er moet opgemerkt worden dat niet alle genoemde modellen opgesteld zijn voor de gehele Rijn-Maasmonding. Ook zijn niet al deze modellen morfologische modellen. Morfologische modellen bevatten namelijk per definitie een terugkoppeling van de bodemverandering, die ontstaan is door sedimentatie en erosie, naar de berekeningen van de waterbeweging. De tabel is in eerste instantie gebaseerd op Wijbenga & Mosselman (2007) en Wang et al. (2000) en is aangevuld met actuele slibmodellen. De afkorting 'RMM' wordt gebruikt om de Rijn-Maasmonding mee aan te duiden. De functionaliteit van de modellen wordt omschreven door specificatie van toepassing van het model voor simulatie van waterbeweging, zouttransport, slibtransport en morfologie. Ook wordt in de tabel vermeld of de modellen op dit moment nog in ontwikkeling zijn, of dat de ontwikkeling ervan beëindigd is.

Tabel 2.1 Overzicht modellen voor het Rijn-Maasmonding gebied

Modelnaam	Dim.	Gebied	Software	Waterbeweging	Zouttransport	Slibtransport	Morfologie	in ontwikkeling
RIJMAMO	3D	Westelijk deel van de RMM en deel Noordzee	TRIWAQ in Simona	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee
RIJMAMO-Delft3D	3D		Delft3D	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee
DISTRO-NDB	2Dv	Noordrand van de RMM	DISTRO-DELWAQ	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee
WAQUA Zuidrand-SINODE	2Dh	Zuidrand van de RMM	WAQUA-DELWAQ	Ja	-	Ja	Nee	Nee
SLIB3D	3D	Maasmond	TRIWAQ-SLIB3D	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja
Zwevend stofmodel SOBEK	1D	RMM	SOBEK-River met DELWAQ	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja
Morfologisch SOBEK-model Rijn-Maasmonding	1D	RMM + bovenrivieren	SOBEK-River met DELWAQ	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja
Process-based mud	3D	-	Delft3D	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

transport								
3D Scheldt model	3D	estuarium Schelde	DELWAQ in Simona	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja
SLIB 1D for floodplains	1D	uiterwaarden Rijn	SOBEK + SLIB1D	Ja	Nee	Ja	Nee	Nee

RIJMAMO 3D (RIjnMAas-MOnd model)

De waterhuishoudkundige problematiek van de Rijn-Maasmonding met voordelta, monding van de Nieuwe Waterweg, en monding van het Haringvliet is door WL | Delft Hydraulics in 1992 geïnventariseerd in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ). Deze inventarisatie heeft geresulteerd in een integraal plan van aanpak en numerieke modellering van dit gebied in het project INVOWA (INtegrale analyse VOordelta en WATERweg). De numerieke modellering van dit gebied heeft vervolgens plaatsgevonden met het door WL | Delft Hydraulics ontwikkelde waterbewegingsmodel RIJMAMO (Van der Kaaij 1995). Aanvankelijk was dit een 2DH-model, later werd het een 3D model. Het betreft een fijnmazig rekenmodel op een kromlijnig rekenrooster.

Eerst zijn vooral waterstanden en dieptegemiddelde snelheden in het zeegebied van het model gesimuleerd, later zijn aan de hand van meetgegevens de snelheids- en zoutverdeling over de verticaal in het model verwerkt. Deze berekeningen zijn gedaan met de 3D waterbewegingssoftware TRIWAQ. Er is daarin gewerkt met acht equidistante sigmalagen. De conclusie in het eindrapport (Van der Kaaij 1995) is dat “met het RIJMAMO-model (...) een veelbelovende aanzet [is] gegeven voor een 3D waterbewegingsmodel van de Rijn-Maasmonding. Het model dient nog verder te worden verbeterd en aangevuld, maar is in potentie een goede basis voor toekomstige hydrodynamische berekeningen, waterkwaliteitsberekeningen en morfologische berekeningen.” Een tekortkoming van het model is dat de invloed van windsnelheid en –richting op waterstanden, snelheden en saliniteiten niet nauwkeurig gereproduceerd wordt. Ook blijkt het niet mogelijk om met de toegepaste diffusiecoëfficiënt voor transport tegelijkertijd verschillende maten van stratificatie in het gebied weer te geven.

RIJMAMO Delft3D

Voor een studie in opdracht van Rijkswaterstaat naar de invloed van een mogelijke verdieping van de Bufferput in de Maasmonding, van belang voor baggerwerkzaamheden aldaar, is door WL | Delft Hydraulics de RIJMAMO-gebiedsschematisatie gebruikt voor simulaties in Delft3D (Van Kessel 2005). Verdieping van de Bufferput kan gunstige gevolgen hebben door efficiënter en goedkoper baggerwerk, of kan juist ongunstig uitvallen doordat het gat extra sediment aantrekt (‘trapping efficiency’). Delft3D is gebruikt voor een gevoeligheidsonderzoek waarin het slib- en fijne-zandtransport in de Maasmond onderzocht is. De toegepaste schematisatie van het RIJMAMO-model heeft een resolutie van circa honderd meter in de Maasmonding. De voor dit gebied belangrijke 3D-effecten worden berekend door middel van acht lagen in de verticaal.

DISTRO-NDB

Het 2DV DISTRO-NDB-model simuleert de water- en zoutbewegingen in het verticale vlak in de lengterichting. Nadat ervaring was opgedaan met de koppeling van dit model aan een DELWAQ-slibmodel voor het Noordelijk Deltabekken op kleine schaal (tussen Hoek van Holland en de Brienoordbrug), is het model in uitgebreid en verbeterd wat betreft schematisatie van splitsingspunten (Karelse 1993). Doel van deze modelstudie was om na te gaan voor welke parameters de slibverdeling over het gebied gevoelig is en om aan te geven waar en hoe zinvolle slibmetingen kunnen worden gedaan. Het DISTRO-NDB model is inmiddels (2007) niet meer operationeel.

Een beperking van de modelresultaten was dat deze slechts zijn gekalibreerd voor gemiddelde getij-omstandigheden en lage rivierafvoer, waardoor vergelijking met jaargemiddelde meetresultaten (waarin ook bijvoorbeeld storminvloeden voorkomen) moeilijk was. Bovendien zijn juist de extremere omstandigheden belangrijk voor erosie, sedimentatie en slibtransport. Het model bleek in zijn uiteindelijke vorm vooral relatief ver landinwaartse zoutindringing te kunnen simuleren. Door de lage afvoercondities is de verdeling van het rivierslib anders dan de jaargemiddelde waarde van de veldmetingen. Verbeteringen aan het model zouden mogelijk zijn aan de hand van metingen van valsnelheden in de zoet/zoutoverganggebieden in het Noordelijk Deltabekken en door met meer dan één type slibfractie te werken.

WAQUA Zuidrand SINODE

Dit model werd in de jaren '90 van de vorige eeuw gebruikt door Rijkswaterstaat en is toepasbaar op het Haringvliet en Hollandsch Diep.

SLIB3D

Op basis van het TRIWAQ waterbewegingsmodel en het SLIB3D-model voor zwevend stofconcentraties, zijn in het kader van het SILTMAN-project drie modellen opgezet (De Kok 2000). Gebruikmakend van drie gebiedsschematisaties, zijn het kuststrookmodel (een model van RIKZ om grootschalige slibfluxen langs de Nederlandse kust te simuleren), het RIJMAMO-model en het Maasmondmodel (een gereduceerde versie van RIJMAMO) gebruikt.

De modellen zijn onder meer toegepast om wijzigingen in het beheer van de Haringvlietssluisen en de aanleg van een tweede Maasvlakte te berekenen. Hierbij is echter nog altijd sprake van aanzienlijke onzekerheidsmarges in de numerieke uitkomsten.

3D Schelde-model

Van Kessel (2006) en Van Maren et al (2007) doen verslag van de opzet, kalibratie en validatie van een 3D slibmodel voor de Schelde en het Westerschelde-estuarium. Het slibtransportmodel is gebaseerd op een tegelijkertijd ontwikkeld 3D (Delft3D) hydrodynamisch model en Slib3D. In dit slibmodel wordt alleen gerekend aan zwevend slibtransport en niet aan bodemtransport. De valsnelheid wordt constant verondersteld, wat

inhoudt dat het effect van flocculatie niet in rekening kan worden gebracht. Er worden geen morfologische veranderingen gemodelleerd. Ook biologische en chemische processen worden buiten beschouwing gelaten.

Het bovenstroomse gedeelte van het hydrodynamische model is gebaseerd op het NEVLA-model, dat is ontwikkeld door WL Borgerhout. Het hydrodynamische model wordt opgezet in de SIMONA-software van RIKZ. Het voordeel van SIMONA is dat er parallel, dus op verschillende computers tegelijkertijd, gerekend kan worden aan water- en zoutbeweging.

Hoewel in het westelijke deel van de Schelde de slibconcentratie al redelijk goed wordt gesimuleerd, blijkt dat nog niet alle fysische verschijnselen op gewenste wijze worden weergegeven. Zo wordt het ontstaan van het turbiditeitsmaximum nog niet goed voorspeld. Verder zijn seizoenstrends in dit gebied erg belangrijk. De seizoensvariaties gerelateerd aan fluctuaties in sedimentaanvoer worden al gedeeltelijk gesimuleerd, maar seizoenseffecten zoals variatie in rivierafvoer en wind- en golfcondities worden nog niet gemodelleerd. Men verwacht nog verbeteringen te kunnen aanbrengen in de reactie van het model op kortetermijnfluctuaties aan de hand van beschikbare meetdata. Voor de kalibratie van lange-termijn verschijnselen is echter zeer weinig data voorhanden.

Nieuw 1D morfologisch SOBEK-River model van WL

De beheerder van de Rijn-Maasmonding, Rijkswaterstaat Zuid-Holland, heeft RIZA opdracht gegeven om een 1D morfologisch model van dit gebied in beheer en onderhoud te nemen. De bouwstenen voor een dergelijk model zijn desgevraagd uiteengezet door WL | Delft Hydraulics (Mosselman et al. 2005). Destijds ontbrak de functionaliteit in het 1D morfologiemodel SOBEK om slibtransport in rekening te brengen. Het implementatieproces van slibtransport in SOBEK viel op dat moment samen met de overstap naar een nieuwe SOBEK-lijn. Het (technisch) verouderde SOBEK-RE, wordt hierin vervangen door SOBEK-River. Een eerste versie van dit beoogde morfologieinstrumentarium voor het benedenrivierengebied is recentelijk tot stand gekomen (Sloff et al. 2007).

Het nieuwe 1D SOBEK-River-instrumentarium is uitgebreid met een morfologiefunctionaliteit en de hydrodynamische schematisatie ervan is uitgebreid met zand-slibeigenschappen (Sloff et al. 2007). Hiermee is een eerste versie van een model tot stand gekomen om in tijd en ruimte grootschalige morfologische veranderingen in de Rijn-Maasmonding mee te simuleren. Er wordt gebruikgemaakt van een combinatie van de formuleringen van Van Rijn en Van Ledden om SOBEK geschikt te maken voor slibsimulaties, zoals eerder was voorgesteld (Mosselman et al. 2005).

In navolging van het zwevend stofmodel (Meijers & Icke 2006), is DELWAQ gebruikt voor de implementatie van morfologie in SOBEK-River. Er is hierbij een uitbreiding verwezenlijkt om zowel suspensief sediment (zand en slib), als verschillende sedimentfracties in transport en in de bodem te kunnen simuleren. Daarbij is ook de terugkoppeling tussen de waterkwaliteitsmodule DelWAQ (waarin de morfologie wordt berekend) en de waterbewegingsmodule van SOBEK geïmplementeerd. Dit bestond nog niet voor slibhoudend sediment. Eerst worden het theoretische bodemtransport en de concentraties en fluxen voor het zwevend transport berekend aan de hand van het lokaal berekende stroombeeld. Daarna wordt het zogenaamde na-ijlende transport van (fijn)

zwevend sediment gesimuleerd via advection-diffusieprocessen. Dan worden de nieuwe bodemligging en de nieuwe bodemsamenstelling berekend, waarna weer kan worden begonnen met de berekening van de waterbeweging.

Voor zwevend stoffracties wordt de modellering van Krone en Partheniades toegepast om de uitwisseling tussen sediment in de waterkolom en in/op de bodem te simuleren (Krone 1962 en Partheniades 1965). Voor het simuleren van suspensief zandtransport kan gebruik worden gemaakt van een benadering van het advection-diffusiegedrag volgens Galappatti (Galappatti 1983 en Galappatti & Vreugdenhil 1985).

Waarnemingen uit het decennium 1990-2000 zijn gebruikt om het model te testen. Het model blijkt vooralsnog gevoelig voor instellingen van sedimenttransportmodellen, stroombeelden in de takken, en sedimentverdelingsrelaties op de riviersplitsingen. Deze aspecten in het huidige model lijken nog aanzienlijk te kunnen worden verbeterd met behulp van een uitgebreide dataset zodra dergelijke meetgegevens beschikbaar komen.

Procesgebaseerd zand-slibmodel ('Process-based sand-mud model')

De afgelopen jaren is gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuw zand-slibmodel (Van Ledden et al. 2005). Het model maakt gebruik van een 'bottom-up' benadering. Via de zand-slibformuleringen van Van Ledden (2002), worden in dit model de interacties tussen de cohesieve en niet-cohesieve sedimentfracties in rekening gebracht. Morfologische observaties gedurende 1970-1994 in het Friesche Zeegat in de Waddenzee zijn gebruikt om het vermogen van het model om lange-termijnontwikkelingen van de bodemligging en bodemsamenstelling in zand-slibhoudende getijdensystemen te testen. Hoewel aanpassingen aan het model nog zeker nodig zijn, lijkt het realistische zand- en slibdistributies te kunnen voorspellen. De meest recente versie van dit model wordt toegelicht door Winterwerp (2007). De meeste van de hier genoemde onderdelen van het model zijn al beschikbaar in Delft3D.

Er wordt in dit model niet gebruikgemaakt van een expliciete, 'harde bodemligging'. De bodem wordt impliciet gemodelleerd via een continue formulering. Om verschillen in bodemsamenstelling in rekening te brengen, is het bodemmodel van Van Ledden (2003) in gebruikgenomen. Dit model bestaat uit een vaststaand aantal lagen, elk met constante diepte. Verticale veranderingen in de bodemligging ten gevolge van sedimentatie en erosie resulteren in een verhoging dan wel verlaging van het totale pakket lagen. Dit pakket wordt de 'actieve laag' genoemd. Er wordt vanuit gegaan dat alle bodemveranderingen plaatsvinden in deze laag. De zand- en slibfracties mengen zich in de actieve laag onder invloed van enkele biologische en fysische mechanismen; dit wordt geparametriseerd met diffusiecoëfficiënten. Op deze manier kan het erosiegedrag van de bodem veranderen wanneer de zand-slibverhouding verandert.

Zand-slibinteracties in de waterkolom zijn nog niet geïmplementeerd in het model. Deze interacties spelen voor hoge SPM-concentraties echter wel een belangrijke rol. In de 'eerste fase' van implementatie van het model (Winterwerp 2007) wordt alleen de interactie tussen de sedimentfracties in de bodem behandeld.

De nieuwe transportformuleringen van Van Rijn (Van Rijn 2007a-c), geschikt voor een groot bereik aan korrelgroottes, worden nog niet gebruikt omdat deze uitgaan van hoge SPM-concentraties. In het model wordt een viertal erosieformules toegepast, elk behorende tot een andere bodemcategorie. Zo wordt een nieuwe erosieformule voor zand-slibmengsels, ontwikkeld door Van Kesteren (Winterwerp & Van Kesteren 2004), toegepast op het door Van Ledden (2003) ontwikkelde bodemmodel. Een reeds bestaande methode van boekhouding van sedimentfracties uit Delft3D wordt gebruikt.

De efficiëntie van het rekenproces van dit model is onderwerp van vervolgstudies. Het is nog niet duidelijk of modules in Delft3D, bedoeld om de rekentijd te verkorten, van toepassing zijn voor een bodemmodel dat rekening houdt met variabele bodemsamenstelling. Het type model dat hier aan de orde is (3D, process-based) vergt een grote (wellicht onrealistische) hoeveelheid veldmetingen ter kalibratie en verificatie.

Zwevend stofmodel DelWAQ

In 2005 is in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA begonnen met de ontwikkeling van een zwevend stofmodel van het Rijn-Maasmondingsgebied (Meijers & Icke 2006). Hierbij is aangetoond dat het praktisch haalbaar is om met DELWAQ zwevend stoftransport te modelleren. Er zijn hiervoor extra metingen naar zwevend stof in dit gebied uitgevoerd. Voor het model was het van belang dat er valsnelheidsproeven werden gedaan.

Dit model is gebaseerd op een door RIZA ontwikkeld WAQUA-model (2D) voor de waterbewegingen in de Rijn-Maasmonding. De resultaten hiervan zijn gebruikt om in DELWAQ een 2D zwevend stofmodel op te zetten. Tenslotte worden de uitkomsten van beide modellen weer aan elkaar gekoppeld in DELWAQ.

De toepassing van DELWAQ op zwevend stof gaat uit van drie fracties zwevend stof; elk met hun eigen valsnelheid en hun eigen kritische bodemschuifspanning voor sedimentatie en resuspensie. Bodemtransport wordt compleet buiten beschouwing gelaten omdat dit met DELWAQ niet te modelleren is.

Van de randvoorwaarden zijn de bovenstroomse randen van de Boven Merwede en de Amer het meest belangrijk, aangezien hierdoor de grootste aanvoer van zwevend stof naar het gebied plaatsvindt. Voor deze twee randen zijn zwevend stofmetingen gebruikt, in combinatie met korrelgrootteverdelingen. Voor verdere gegevens over de opzet van dit model, zie Meijers & Icke (2006).

Na kalibratie, simulaties en een gevoeligheidsanalyse, is de conclusie dat “de resultaten van het model (...) op het beschouwde traject gevoelig [zijn] voor de initiële bodemconcentratie.” Een dunne bodemlaag geeft betere resultaten. Tevens wordt aangegeven dat de samenstelling van het bodemmateriaal ook erg belangrijk is. Het wordt dan ook aanbevolen om hier in de toekomst beter naar te kijken.

Silt-ID model voor sedimentatie in uiterwaarden Rijn

Asselman & Van Wijngaarden (2002) hebben een model opgezet dat in staat is om redelijke schattingen te maken van gemiddelde sedimentatie van uiterwaarden langs de Rijn voor oppervlaktes tot enkele vierkante kilometers. De sedimentatieberekeningen zijn gebaseerd op waterbewegingsberekeningen van SOBEK-1D. De simulaties zijn met succes getest (gekalibreerd en gevalideerd) aan de hand van verschillende datasets gemeten tijdens overstromingen. Het model vertoonde echter een grote gevoeligheid voor veranderingen van de valsnelheid. Tevens bleek de kritieke bodemschuifspanning een doorslaggevende factor voor de te voorspellen sedimentatie tijdens extreme rivierafvoeren. Belangrijke kennis en resultaten van de studies naar aanslibbing van de uiterwaarden in de Rijn zijn onder beschreven in Asselman (1997).

2.5 Beschikbare instrumentaria

In 2000 is door WL | Delft Hydraulics in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA een inventarisatie gemaakt van de beschikbare middelen ter modellering van de morfologie in de Rijn-Maasmonding (Wang et al. 2000). Op vergelijkbare wijze worden hier de relevante instrumentaria in een tabel ondergebracht en zullen deze kort worden behandeld.

Tabel 2.2 Overzicht instrumentaria

Methode	Naam	Beschikbaar bij
(semi-)empirisch	EMPREL	RIZA
	ASMITA	WL
	ESTMORF	WL & RIKZ
proces-gebaseerd	DelWAQ	WL & RIZA
	SOBEK	WL & RIZA
	Delft3D-MORF	WL
	SLIB3D	RIKZ
	1DV POINT MODEL	WL
hydraulische indicatoren	-	WL

Deze instrumentaria zijn gebaseerd op verschillende methoden. In modellen gebaseerd op processen wordt het gedrag van het systeem gesimuleerd, door het gekoppelde stelsel van vergelijkingen van waterbeweging, sedimenttransport en variatie van de bodemligging op te lossen. Lange tijd bestonden er alleen ‘process-based’ of procesgebaseerde modellen, die ofwel voor niet-cohesieve sediment transport (zand), ofwel voor cohesief sediment transport (slib). Pas recentelijk is begonnen met de ontwikkeling van een zand-slib model (zie Van Ledden 2003). Een belangrijk verschil tussen veel zand- en slibmodellen is dat doorgaans de zandmodellen bestaan uit stromings-, transport- en bodemliggingsmodules, terwijl de

slibmodellen normaliter alleen bestaan uit een stromings- en een transportmodule. Er wordt vaak geen rekening gehouden met interactie tussen slibconcentratie en de waterbeweging en er is ook meestal geen terugkoppeling tussen bodemligging en waterbeweging. De methode “hydraulische indicatoren” is een gesimplificeerde variant op de meer geavanceerde slibmodellen. In deze methode wordt op basis van uitkomsten van waterbewegingssimulaties vastgesteld in welke gebieden aanslibbing of resuspensie mogelijk is (onder- of overschrijding van kritische waarden van bodemschuifspanningen).

De bespreking van de instrumentaria die volgt is afkomstig uit de Onderzoeksagenda morfologie (Wijbenga en Mosselman 2007), behalve EMPREL (uit Wang et al. 2000) en het IDV POINT MODEL.

EMPREL

EMPREL is een lange-termijn morfologisch model op basis van empirische relaties. Het model is gekoppeld aan een 1D netwerkmodel voor de waterbeweging. Het model gebruikt als morfologische variabele de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van riviertakken of geulen. Het morfologische evenwicht wordt bepaald door empirische relaties tussen de oppervlakte van de dwarsdoorsnede en het getijvolume. Het verschil tussen de evenwichtsoppervlakte en de werkelijke oppervlakte bepaalt of er sedimentatie dan wel erosie optreedt.

ASMITA

ASMITA is specifiek ontwikkeld om de invloed van de zandvraag van een vloedkom van de Waddenzee op het gedrag van de Noordzeekust te kunnen bepalen. Het model bestaat in principe uit drie grote morfologische elementen, namelijk een vloedkom, de buitendelta (beide nodig om de zandvraag te genereren) en de aangrenzende zeekust. Elk van deze elementen wordt in de eerste plaats, direct of indirect, beïnvloed door de aan het getijprisma van de vloedkom gerelateerde stroming en in de tweede plaats door golfinvloed op de hydrodynamica. Het getijbassin wordt geschematiseerd tot één geul en één plaat. Voor elk element is een empirische relatie bekend, die de gemiddelde evenwichtstoestand beschrijft zonder dynamische fluctuaties door storm of seizoen. In het model zijn alle relaties, voor zover nodig, omgerekend naar representatieve evenwichtsvolumes die een functie zijn van een karakteristieke hydrodynamische parameter (getijprisma, getijslag). De hydrodynamische parameters worden op eenvoudige wijze bepaald.

Het sedimenttransport in ASMITA wordt beschreven door een diffusievergelijking voor gesuspendeerd sediment. In de evenwichtstoestand heeft elk element een constante concentratie: de evenwichtsconcentratie c_E . In het model is aangenomen dat de concentratie op de randen constant in de tijd is en gelijk aan de evenwichtsconcentratie. Een verstoring van een evenwichtsvolume (bijvoorbeeld een volumeverkleining) leidt door lokale veranderingen in de stroomsnelheden tot transportgradiënten en dus tot uitwisseling van sediment, net zo lang totdat de transportgradiënten weer zijn verdwenen en het evenwicht weer is hersteld.

ESTMORF

In vergelijking met ASMITA is ESTMORF een complexer en gedetailleerd morfologisch modelconcept voor een systeem van een buitendelta met vloedkom of estuarium. ESTMORF is een dynamisch-empirisch model. Het dynamische deel van het model bestaat uit een advectie-diffusie vergelijking, waarmee op basis van concentratie (verschillen) het transport wordt berekend. Het empirische deel bestaat uit evenwichtsrelaties die de morfologie berekenen. Van het te onderzoeken gebied wordt een gedetailleerd netwerkmodel gemaakt in een 1d-waterbewegingsprogramma (IMPLIC of SOBEK) waarin de geometrie van het gebied juist wordt weergegeven. Hierbij wordt elk netwerkvak in drie morfologische eenheden verdeeld: de geul (onder laag water), de lage platen (tussen laag water en gemiddeld waterniveau) en de hoge platen (tussen gemiddeld waterniveau en hoogwater). Voor alle drie componenten worden empirische relaties gebruikt. Voor de geul is het getijvolume de belangrijkste fysische parameter. Voor de lage en hoge platen is dit de getijslag (het verschil tussen laag en hoog water). Na afregeling van dit model (waterbeweging en sedimenttransport) kan de invloed van een verstoring op de morfologie worden berekend. De morfologische module bepaalt hoeveel op elke locatie een geulprofiel of plaathoogte afwijkt van de (nieuwe) evenwichtsconditie, die volgt uit empirische relaties. Dit geeft een maat voor de locale verandering in de stroomsnelheid en transportcapaciteit. In de sedimenttransportmodule leidt dit tot gradiënten in het sedimenttransport, die op hun beurt weer leiden tot een kettingreactie van erosie en sedimentatie in het systeem.

DelWAQ

DelWAQ is van oorsprong een waterkwaliteitsmodel en onder andere bij WL | Delft Hydraulics in gebruik. Het kan functioneren binnen 1D, 2D en 3D modelsystemen. DelWAQ bevat een bibliotheek van routines, die verschillende processen beschrijven, niet alleen voor waterkwaliteit, maar ook voor het transport van sediment. DELWAQ is daarom te beschouwen als een procesbibliotheek. Aan de hand van toegeleverde stromingsgegevens, bijvoorbeeld uit SOBEK of DELFT3D, zijn transportgradiënten te bepalen. DELWAQ bevat onder meer de transportformulering volgens Partheniades & Krone. De procesbibliotheek van DELWAQ is gemakkelijk uit te breiden met nieuwe processen. Toepassing van DelWAQ voor slibmodellering voor de Rijn-Maasmonding is beschreven door Icke (2005) en Meijers en Icke (2006), waarbij de waterbeweging zowel met WAQUA als met SOBEK zijn berekend.

SOBEK

Met SOBEK is een softwarepakket voor het simuleren van 1D waterbeweging, waterkwaliteit en morfologie van eenvoudige en complexe riviersystemen. Er zijn diverse versies van SOBEK operationeel, waarbij voor rivieren en estuaria de volgende twee versies van belang zijn:

- SOBEK-RE: de versie van SOBEK die in de jaren negentig gezamenlijk is ontwikkeld door RIZA en WL | Delft Hydraulics, maar inmiddels niet meer verder wordt ontwikkeld. Met SOBEK-RE kan naast de waterbeweging en waterkwaliteit van 1D

riviernetwerken, ook volledig morfologisch worden gerekend voor rivieren met zand en grind.

- SOBEK-River: de nieuwe versie van SOBEK die als opvolger kan worden beschouwd van SOBEK-RE. Naast de 1D waterbeweging en waterkwaliteit biedt deze versie ook mogelijkheden om 2D situaties (dieptegemiddeld) te simuleren met behulp van een overstromingsmodule. Daarnaast worden op dit moment ook mogelijkheden ontwikkeld voor het koppelen van 1D SOBEK modellen aan 3D Delft3D modellen. De morfologie in SOBEK-River wordt gesimuleerd door processen die zijn gedefinieerd in de waterkwaliteitsmodule DelWAQ. Daarbij zijn naast zand en grind ook processen geïntroduceerd voor slibmodellering.

Voor de Rijn-Maasmonding zijn schematisaties in zowel SOBEK-RE als in SOBEK-River beschikbaar. Verder geldt dat in SOBEK de waterbeweging volledig dynamisch wordt gesimuleerd, en dat ook de zoutindringing kan worden meegenomen.

DELFT3D

DELFT3D is een softwarepakket van WL | Delft Hydraulics. Het pakket bestaat uit verschillende modules zoals een 2D en 3D stromingsmodule, een 2D golfmodule, een 3D waterkwaliteits- en slibtransportmodule en een 2D morfologische module gebaseerd op orthogonaal kromlijnige roosters. Met DELFT3D zijn onder andere de volgende processen te simuleren:

- Zoutindringing in estuaria en kanalen onder invloed van dichtheidsverschillen;
- Thermische gelaagdheid in rivieren en zeeën;
- Circulaties van koel- en afvalwater;
- Getijvoortplanting en stormvoorspelling onder invloed van wind en atmosferische drukvelden;
- Het vullen en legen van polders en gecontroleerde overstromingsgebieden;
- Voorspellingen op middellange termijn van morfologische processen door slib- en zandtransport;
- Refractie van stroming en golven en daaruit volgende morfologische processen.
- Slibtransport.

Simona

Simona staat voor Simulatie MOdellen NATte waterstaat. Simona is een technisch-wetenschappelijk kennissysteem dat vier modellen herbergt voor het simuleren van waterloopkundige fenomenen, zoals de simulatie van het getij of het transport van in water opgeloste stoffen. Simona omvat de modellen WAQUA, TRIWAQ, SIMPAR en SLIB3D. Daarnaast is het Simona-kennissysteem zo opgezet dat het de infrastructuur heeft voor het opnemen van nieuwe software of het maken van een koppeling met bestaande software pakketten.

Simona-WAQUA

Met WAQUA worden waterstanden, stroomsnelheden en concentraties van opgeloste stoffen berekend in open wateren, uitgaande van een hydrostatische drukverdeling. Voor de verspreiding van stoffen is in de software aangenomen dat de concentraties niet variëren over de diepte. De variatie van de waterstroming en concentraties van opgeloste stoffen worden in twee horizontale richtingen gesimuleerd (2DH, tweedimensionale horizontale stroming).

Simona-TRIWAQ

TRIWAQ is een uitbreiding van WAQUA in verticale richting, door de simulatie van meerdere, boven elkaar gelegen lagen met onderlinge uitwisseling van water en concentraties. Per laag wordt uitgegaan van een laag-gemiddelde stroming met hydrostatische drukverdeling. Doordat uitwisseling van water en concentraties in de verticaal plaatsvindt, kan TRIWAQ het gedrag van de stroming en concentraties in 3 dimensies weergeven.

Simona-SIMPAR

Met SIMPAR kan de verspreiding van deeltjes (opgeloste stoffen) worden weergegeven. Het maakt gebruik van de waterbeweging die met WAQUA of TRIWAQ is bepaald. Door, op vooraf bepaalde locaties in het water, deeltjes los te laten en de baan hiervan te volgen ontstaat een beeld van de verspreiding. SIMPAR heeft een aantal verschillende toepassingen doordat er aan de deeltjes verschillende eigenschappen kunnen worden toegekend. Zo kan met SIMPAR bijvoorbeeld transport van vislarven worden gesimuleerd. Daarnaast is SIMPAR ook inzetbaar om te voorspellen waar verontreinigingen, bijvoorbeeld een olie- of giflozing, naar toe zullen drijven in het water.

Simona-SLIB3D

SLIB3D is het slibverspreidingmodel van Rijkswaterstaat. Met SLIB3D kan het transport en sedimentatie- en erosiegedrag van fijnkorrelig cohesief particulier materiaal, meestal 'slib' genoemd, worden gemodelleerd. Het is dus niet geschikt voor zandtransport. SLIB3D gaat voor de verspreiding van slib uit van de Parheniades en Krone formulering.

IDV POINT Model

Er is door WL | Delft Hydraulics in het kader van SILTMAN gewerkt aan verbetering van slibverspreidingsmodellering, hetgeen wordt gerapporteerd in Winterwerp & Uittenbogaard (1997) en Winterwerp (1998). Het beschreven instrumentarium is gebaseerd op het eendimensionale verticale POINT MODEL, door het WL ontwikkeld voor onderzoeksdoeleinden.

3 Plan van aanpak voor slibmodellering

3.1 Inleiding

Voor het beantwoorden van slibvragen is het van belang dat kennis en instrumenten beschikbaar zijn. Ondanks de snelle technologische en wetenschappelijke ontwikkelingen op dit gebied is een nauwkeurige kwantificering van het transport en morfologie in slib- en zand-slibgebieden nog steeds moeilijk. Belangrijke oorzaken van deze beperkingen zijn voor de Rijn-Maasmonding:

1. onvoldoende nauwkeurige beschrijving van de waterbeweging en zoutbeweging in de Rijn-Maasmonding;
2. leemtes in proceskennis, en het modelleren van de processen ten aanzien van slib en zand-slibmengsels;
3. onvoldoende gegevens over de toestand, het transport en eigenschappen van slib in de Rijn-Maasmonding.

Ten behoeve van een meer betrouwbare modellering en voorspelling van het gedrag van slib is het noodzakelijk de drie bovengenoemde punten aan te pakken. Voorgesteld wordt de benodigde vervolgstappen niet zoals in de Onderzoeksagenda Morfologie (Wijbenga en Mosselman, 2007) te relateren aan geformuleerde kennisvragen, maar toe te werken naar een aantal specifieke beheervragen. De studie “Bezinning op slib” zoals beschreven in dit rapport en het hierna afgeleide plan van aanpak zijn in dit opzicht een vervolg en nadere specificering van de Onderzoeksagenda Morfologie.

Voor de vervolgstappen wordt voorgesteld om uitgaande van de bestaande kennis en informatie, zoals beschreven in dit rapport, de systeembeschrijving voor de Rijn-Maasmonding verder uit te werken. Het gaat daarbij om een inventarisatie en beschrijving van de belangrijkste processen, en wanneer en waar deze optreden. In deze systeembeschrijving moet worden vastgesteld hoe deze slibprocessen in kentallen kunnen worden gekarakteriseerd. In de daarop volgende stappen kan worden vastgesteld wat deze karakteristieken betekenen voor de relevante beheervragen en de effectbepaling van grote ingrepen in het systeem (de Kier, Ruimte voor de Rivier, etc.), en op welke wijze de kentallen verder kunnen worden bepaald en door middel van bijvoorbeeld kaarten kunnen worden gepresenteerd. Tenslotte kan dit worden vertaald naar eisen ten aanzien van de bouw en het gebruik van beschikbare instrumenten. In paragraaf 3.2 wordt nader ingegaan op de beoogde aanpak van deze systeembeschrijving.

In het bovengenoemde raamwerk wordt de uitwerking in sterke mate gebaseerd op een aantal relevante beheervragen. De op deze wijze uit te voeren “bottom-up” benadering dient om de beheerder in staat te stellen specifieke beheervragen adequaat aan te kunnen pakken. De slibproblematiek is dermate complex dat iedere behevraag een specifieke aanpak vergt. Bijvoorbeeld een lange-termijnvraag vereist een grootschalige analyse, terwijl voor een korte-termijnvraag een lokale analyse kan volstaan. Daarnaast is door deze complexiteit en door onzekerheden in toekomstige condities de voorspelling slechts binnen een beperkte bandbreedte (nauwkeurigheid) mogelijk. Belangrijk is om inzicht te krijgen in deze onzekerheden en deze voor de beheerder duidelijk te maken. In paragraaf 3.3 is aangegeven

hoe op hoofdlijnen een uitwerking kan worden gegeven aan een viertal typen beheerproblemen.

Voor verdere uitwerking van het slibonderzoek voor de Rijn-Maasmonding volgens het hier gepresenteerde raamwerk is de volgende doelstelling geformuleerd:

- Formuleren van een plan van aanpak om meer inzicht te krijgen in de slibprocessen in de Rijn-Maasmonding en de daarbij behorende kentallen, en te komen tot goede en bruikbare instrumenten (modellen), met een afstemming op de beheersvragen van Rijkswaterstaat.

Voor het plan van aanpak is verder uitgegaan van de drie gangbare onderzoeksmiddelen voor kennisontwikkeling en analyses ten behoeve van slib:

1. Veldmetingen: het uitvoeren van gerichte metingen in het beheergebied, bedoeld voor de kennis over stroming, zout, en sediment, en te gebruiken voor analyses en het ontwikkelen van betrouwbare modellen;
2. Modelontwikkeling: het ontwikkelen van eenvoudige semi-empirische en meer geavanceerde wiskundige modellen voor het simuleren van waterbeweging, zoutindringing en sedimenthuishouding in het beheergebied, uitgaande van proceskennis en waarnemingen in het veld;
3. Laboratoriumonderzoek: onderzoek naar relevante processen (bijvoorbeeld gedrag van zand-slibmengsels) en eigenschappen van sediment in het gebied (bijvoorbeeld erodeerbaarheid van afzettingen).

Daarnaast is het in deze aanpak noodzakelijk gebruik te maken van classificering of rubricering vanuit de volgende invalshoeken:

- indeling gebaseerd op de meest relevante beheersvragen. Voor relevante actuele beheersvragen (2007) wordt verwezen naar het bespreekverslag in de Bijlage van dit rapport.
- indeling op basis van vraagstelling ten aanzien van de volgende thema's:
 - Kwantiteit (vragen t.a.v. baggeren)
 - Kwaliteit (vragen t.a.v. verontreiniging)
 - Natuurlijkheid (vragen m.b.t. ecologie)
 - Morfologie (vragen t.a.v. bodemveranderingen, aanslibbing)
- indeling van processen in ruimte en tijdschalen. Bijvoorbeeld voor lange termijn aspecten is het noodzakelijk meer te aggregeren en te generaliseren, dan voor korte termijn aspecten. Dit is vergelijkbaar met het onderscheid in weersvoorspelling (met een termijn van enkele dagen) en klimaatvoorspelling (met een termijn van jaren). Daarnaast is het mogelijk het gebied ruimtelijk te verdelen in domeinen die worden gekenmerkt door specifieke processen (bijvoorbeeld door de aanwezigheid van de zouttong).

NB, rubriceren kan volgens de bovengenoemde thema's (beheersvragen, kwantiteit, kwaliteit, etc.), maar er moet eigenlijk altijd wel al een tijdschaal aan vast worden geknoopt (soms kunnen de beheersvragen worden opgesplitst in een korte en een lange termijn component). Bij een korte termijn aanpak wordt beoogd een aanpak te definiëren die op korte termijn iets oplevert voor de beheersvragen. Bij een lange termijn aanpak kan worden

gedacht aan een dienstoverstijgende aanpak (dus zowel Zuid Holland, Oost en Limburg) die betrekking heeft op het systeemgedrag (bijvoorbeeld autonome systeemeffecten).

Er bestaat een sterke koppeling met ontwikkeling van kennis ten aanzien van slibprocessen en slibmodellering in het project VOP-slib (Bruens et al, 2007) dat zich tot nu toe vooral heeft gericht op de slibproblematiek in de zeeën en estuaria. Afstemming van de in relatie met de Rijn-Maasmonding uit te voeren vervolgstudies met VOP-slib, wordt gewaarborgd door inzet van slibexperts die bij beide studies betrokken zijn bij de Waterdienst en bij WL/Deltares.

3.2 Systeembeschrijving

Voor het plan van aanpak voor een goede slibmodellering in de Rijn-Maasmonding wordt voorgesteld te starten met een uitgebreide systeembeschrijving. Doel is om de huidige kennis en informatie (zoals onder andere beschreven in dit rapport) concreter om te zetten en verder uit te breiden (vooral ook ten aanzien van de tekortkomingen in beschikbare data). In bijlage B is een redelijk in detail uitgewerkt voorbeeld gegeven van de benodigde informatie die voor systeemwerking moet worden bepaald. In grote lijnen bestaat deze uitwerking uit de volgende delen:

- 1) Globale systeembeschrijving:
 - onder andere bathymetrie, hydrodynamica, gebruik (bijv. scheepvaart)
 - Indeling in domeinen
- 2) Vaststellen relevante fysische processen:
 - a) totaal overzicht van processen die relevant kunnen zijn
 - b) per domein aangeven wat daar voor relevante processen optreden, welke kentallen daarbij horen, welke consequenties deze hebben voor modellering, en op welke wijze deze zijn te presenteren in bijvoorbeeld kaarten of GIS bestanden.

Op basis van de gesignaleerde karakteristieken kan vervolgens nagegaan worden wat deze betekenen voor de relevante beheervragen, en op welke wijze hiervoor modellen kunnen worden ingezet.

3.3 Uitwerking voor beheervragen

De systeembeschrijving beoogt in principe een uitwerking te geven van de karakteristieken en kentallen ten aanzien van relevante slibprocessen in de Rijn-Maasmonding. Vervolgens kan worden vastgesteld wat dit betekent voor specifieke beheervragen, en verder worden uitgewerkt voor benodigde slibmodellering voor het beantwoorden van deze vragen. Voor de verdere uitwerking van een plan van aanpak voor slibmodellering is namelijk gekozen voor een “bottom-up” aanpak waarbij een aantal relevante beheervragen dienen als basis. In deze paragraaf is hiervoor een voorlopige uitwerking op hoofdlijnen gepresenteerd. Vooralsnog is hierbij uitgegaan van een aantal beheervragen afgeleid uit overleg met Rijkswaterstaat ZH gepresenteerd in Bijlage A.

Een drietal belangrijke overwegingen uit de systeembeschrijving zijn verder bij de verdere uitwerking in deze paragraaf relevant:

- Het gedrag van slib in de Rijn-Maasmonding en met name de Noordrand en het Middengebied, wordt zeer sterk bepaald door de aanwezigheid van zout. Het slib beweegt heen en weer door het systeem op de punt van de zouttong onder invloed van de getijdebeweging. Via deze zoutinvloeden wordt ook de aanslibbing van de havens beïnvloed.
- De beschikbare (deels empirische) concepten voor slibmodellering zijn sterk afhankelijk van de eigenschappen van het slib en de condities van het riviersysteem. Goede metingen zijn daarom noodzakelijk om de methoden af te regelen.
- De lange-termijn morfologische ontwikkeling van het gebied hangt af van zowel de zand- als de slibhuishouding. Instrumenten voor lange-termijn studies zullen de volledige range van korrel fracties (en hun interacties) moeten beschouwen.

Korte-termijn beheervragen

Op basis van een aantal door Rijkswaterstaat genoemde korte-termijn beheervragen is een verdere uitwerking gegeven van de aanpak die nodig is om antwoorden op de vragen te definiëren.

Vraag 1: Hoe beïnvloedt het baggeren van de beoogde “trapjeslijn” de hoeveelheid baggerwerk, en de aanslibbing in de havens?

Welke aspecten spelen bij deze vraag een rol:

- De beheervraag is gerelateerd aan thema's kwantiteit (hoeveel baggeren) en morfologie (verwachting bodemveranderingen).
- De indringing van zout is het dominante proces.
- Slibconcentraties op zee zijn in de orde van honderden mg/l, terwijl deze op de rivier 20 tot 60 mg/l bedragen. Het is dus van belang de aanvoer van hoge concentraties slib via de zouttong langs de bodem te beschrijven.

Welke instrumenten zijn noodzakelijk:

- Voor het door zout beïnvloede deel is een 3D waterbewegingsmodel met zoutstratificatie-effecten noodzakelijk. In het bestaande Delft3D model (gebaseerd op RIJMAMO) treedt nog te weinig zoutindringing op. Een verbetering hiervan leidt tot een betere beschrijving van slibtransport.
- De lokale advection en diffusieprocessen van slibconcentraties nabij de punt van de zouttong kunnen alleen goed in absolute waarden worden gereproduceerd met een fijnmazig rekenrooster. Ten behoeve van rekentijd kan het nuttig zijn de relevante randvoorwaarden voor het fijnmazige rooster te bepalen met een grovere gebiedsdekkende versie van hetzelfde model.
- Voor de 3D modellen zijn alleen acceptabele resultaten te verkrijgen voor zoutindringing als een voldoende groot stuk zee wordt meegenomen in het model (opleggen van een zeerand op de Maasmond werkt niet).
- Voor vergelijkende studies (hoe verandert de aanslibbing in havenbekkens en Nieuwe Maas na veranderingen in het gebied?) kan eventueel worden volstaan met een grofmaziger model.

Welke metingen zijn gewenst:

- Noodzakelijke gegevens voor stroming, zoutconcentraties, watertemperatuur, turbulentiegraad en diepte moeten worden verzameld. Een redelijk eenvoudige mogelijkheid om meetwaarden van debieten en concentraties te verzamelen is het monteren van een ADCP op het veer bij Maasluis (net als de metingen op het Marsdiep van de veerboot naar Texel). De metingen zijn belangrijk voor de bandbreedtes waarbinnen de parameters variëren.
- Metingen om vast te stellen hoe groot het aandeel is van marien en fluviatiel sediment, zover dit mogelijk is.
- Metingen van slibconcentraties en slibeigenschappen van zwevend stof (in waterfase) op meerdere locaties en onder een aantal condities. Het gaat om valsnelheid, korrelverdeling, mineralogie, organische stof, etc. Het wordt aanbevolen hiervoor nieuwe technieken te gebruiken waarbij slibkenmerken direct in het veld kunnen worden vastgesteld (de vloggrootteverdeling wordt bijvoorbeeld met optische technieken in het veld vastgesteld).
- Het meten van slib in de bodem kan worden gedaan met behulp van MEDUSA in combinatie met monsternamen (grabs) voor samenstelling en verontreinigingsgraad van het bodemmateriaal. Ook kleiige monsters zijn nodig om de grondmechanische eigenschappen van het klei zelf te bepalen.

Vraag 2: Hoe zal in de Biesbosch het nieuwe krekensysteem na opening aanslibben, en wat zal er gebeuren met het aanwezige verontreinigde slib?

Voor deze vraag loopt inmiddels (2007) een onderzoek (met modelontwikkeling), met name gericht op de verspreiding van verontreinigingen. Het project wordt uitgevoerd door Haskoning, in samenwerking met Deltares, in opdracht van Rijkswaterstaat.

Welke aspecten spelen bij deze vraag een rol:

- De beheervraag is vooral gerelateerd aan kwaliteit (verontreiniging) en morfologie (verwachting bodemveranderingen).
- Slibuitwisseling door getijdebeweging (komberging), en de resuspensie en sedimentaanvoer tijdens hoge afvoeren zijn relevante processen.

Welke instrumenten zijn noodzakelijk:

- De waterbeweging in het overstroomde gebied kan worden gesimuleerd met een 2DH waterbewegingsmodel met voldoende resolutie om de stroomsnelheden in de krekens te reproduceren.
- Vegetatie speelt een rol in de Biesbosch (zie Figuur 3.1), maar onduidelijk is hoe groot de invloed is op de aanslibbing en resuspensie in het gebied. Bij WL | Delft Hydraulics wordt een vegetatiemodule ontwikkeld waarbij de invloed op stroming en sediment kan worden gesimuleerd (Delft3D-module), maar verdere ontwikkeling en onderzoek is nog noodzakelijk. Het benodigde onderzoek zou in overleg met de experts kunnen worden uitgewerkt in een voor de Biesbosch specifiek onderzoeksproject (op dit moment liggen de ontwikkelingen vooral op het gebied van zoutwatergetijdengebieden).
- De verspreiding van verontreinigingen van geresuspendeerd sediment kan via de bestaande DelWAQ module worden gesimuleerd, wanneer deze wordt toegepast in combinatie met een betrouwbaar waterbewegingsmodel.

Welke metingen moeten worden uitgevoerd:

- Eigenschappen van het bodemmateriaal moeten in kaart worden gebracht. Hiertoe is het nodig om ongestoorde monsters te nemen waarmee in laboratorium de erodeerbaarheid kan worden bepaald. Ook kleiige monsters zijn nodig om de grondmechanische eigenschappen van het klei zelf te bepalen.
- Voorgesteld wordt gebruik te maken van een zogenaamde proefput (verdiepte locatie met meetinstrumenten) waarmee de mate van aanslibbing en de concentraties kunnen worden bepaald.



Figuur 3.1 Biesbosch (foto: C. Vaandering)

Vraag 3: Wat zijn de gevolgen van de maatregelen in de Biesbosch op de aanslibbing in het Hollandsch Diep (en overige riviertakken)?

Welke aspecten spelen bij deze vraag een rol:

- Het aanbod van slib op het Hollandsch Diep (d.w.z. het aanslibbingsgebied van de Zuidrand) kan toenemen door resuspensie van materiaal in de Biesbosch. De problemen op het Hollandsch Diep zijn gerelateerd aan kwantiteit (hoeveel baggeren) en morfologie (verwachting bodemveranderingen).
- Wanneer het geresuspendeerde materiaal uit de Biesbosch verontreinigd is zal het probleem ook gerelateerd zijn aan kwaliteit.

Welke instrumenten zijn noodzakelijk:

- Instrumenten zijn nodig waarmee het (gewijzigde) aanbod van slib uit de Biesbosch kan worden voorspeld, en instrumenten waarmee de stroming en slibconcentratie en depositie in het Hollandsch Diep kan worden bepaald. Het eerste aspect is het onderwerp van “vraag 2”. Het tweede aspect kan worden aangepakt met een 1D of 2DH slibmodel voor het Hollandsch Diep. Het gaat vooral om het bepalen van veranderingen en verschillen, zodat redelijk grofmazige modellen al veel inzicht kunnen verschaffen.

Welke metingen moeten worden uitgevoerd:

- Afvoer en stroomsnelheden.

- Zie ook vraag 1, echter zonder zoutconcentraties.

Lange termijn beheervragen

Op basis van een aantal door Rijkswaterstaat genoemde lange-termijn beheervragen is een verdere uitwerking gegeven van de aanpak die nodig is om antwoorden op de vragen te definiëren.

Vraag 4: Wat is het effect van klimaatverandering op het Rijn-Maasmonding gebied?

Welke aspecten spelen bij deze vraag een rol:

- Invloed van klimaatveranderingen ten aanzien van slib zijn vooral te verwachten wanneer zoutindringing toeneemt (gedurende langere perioden met een lage rivierafvoer).
- Voor de lange-termijn morfologische ontwikkeling zijn zowel zand- als slibfracties relevant.
- Ook effecten van zeespiegelrijzing kunnen eventueel beschouwd worden als onderdeel van deze beheervraag.

Welke instrumenten zijn noodzakelijk:

- De grootschalige invloed van klimaatverandering vraagt om een groot model. Voor het zoutgedomineerde deel is een modelinstrumentarium nodig dat de zoutindringing voldoende beschrijft. De instrumenten genoemd bij vraag 1 (korte-termijn vragen) zijn hiervoor het meest geschikt (meerdimensionale modellen met zout). Voor de overige gebieden kan worden volstaan met minder gedetailleerde modellen, bijvoorbeeld een 2DH of 1D model. Via de randvoorwaarden worden de onderlinge modellen gekoppeld. Het is voor deze vraag dus aan te bevelen een hiërarchie van modellen toe te passen in plaats van een groot totaalmodel.
- Voor morfologische vragen is het essentieel dat zand-slibmodellen worden toegepast.

Welke metingen moeten worden uitgevoerd:

- Zie vraag 1. Het is van belang dat duurmetingen worden gedaan om goed inzicht te krijgen in de slibhuishouding van de Rijn-Maasmonding.

Vraag 5: Wat is het effect van de Maasvlakte 2 en De Kier op de aanslibbing?

Welke aspecten spelen bij deze vraag een rol:

- Door uitbreiding van Maasvlakte 2 wordt de Nieuwe Waterweg iets verlengd, waardoor het zout mogelijk minder ver landinwaarts komt. Daarentegen kan dit ook leiden tot accumulatie van het slib nabij de zouttong.
- Door De Kier wordt de verdeling van getijdestroming gewijzigd, waardoor ook de zouttong verandert. Tegelijkertijd zal het zout ook de slibhuishouding in het haringvliet gaan beïnvloeden. De verdeling van het rivierslib over de Noord en Zuidrand zal wellicht ook wijzigen.

Welke instrumenten zijn noodzakelijk:

- Voor het zoutgedomineerde deel is een modelinstrumentarium nodig dat de zoutindringing voldoende beschrijft. De instrumenten genoemd bij vraag 1 (korte-termijn vragen) zijn hiervoor het meest geschikt (meerdimensionale modellen met zout).
- Voor de riviertrajecten zonder zoutinvloed kan worden gerekend met een 1D model, waarbij de advectie van het fluviale slib wordt gesimuleerd. Uitwisseling met stagnante zones en bergingsgebieden (zoals Biesbosch, uiterwaardplannen, grienden) kan worden gerelateerd aan het kombergingseffect van deze gebieden door de getijbeweging. Deze worden als lateraal effect aan het 1D model toegevoegd.
- Lange-termijn morfologie vereist zand-slibmodellen.

Welke metingen moeten worden uitgevoerd:

- Zie vraag 1. Het is van belang dat duurmetingen worden gedaan om goed inzicht te krijgen in de slibhuishouding van de Rijn-Maasmonding.

Verdere uitwerking van beheervragen

De in deze paragraaf gepresenteerde beschrijving van de aanpak van verschillende beheervragen (instrumenten en metingen) dient nog verder in meer detail te worden uitgewerkt voordat ook daadwerkelijk verdere stappen kunnen worden ondernomen. Zo zal de lijst verder compleet kunnen worden gemaakt. Bijvoorbeeld toevoegen en uitwerken van de beheervragen ten aanzien van het middengebied, en de vragen ten aanzien van de ontwikkeling van het Haringvliet (aanvullend op de reeds vastgestelde kennis uit de MER-studies). Een integratieslag kan worden uitgevoerd waarbij de benodigde modellen, meetgegevens en laboratoriumgegevens kunnen worden vastgesteld (bijvoorbeeld, sommige modellen zijn voor meerdere vragen toe te passen). Concrete meetplannen en laboratoriumonderzoek kunnen op basis daarvan worden opgesteld, onder andere gerelateerd aan benodigde informatie voor de modellen (onzekere parameters etc.). Kalibratie en validatie van modelinstrumenten kan vervolgens worden gerealiseerd. Ook voor deze vervolgstappen is het onderscheid in korte-termijn en lange-termijn relevant. Bijvoorbeeld, hoe subtiel of hoe relevant is een proces en kan voor lange termijn simulaties misschien afgehandeld worden met een vereenvoudigd (“black-box”) modelletje. Tenslotte kan ook nader worden ingegaan op de wijze waarop de informatie op een geschikte wijze kan worden gepresenteerd (bijvoorbeeld kaartmateriaal).

4 Conclusies en aanbevelingen

De deelstudie “Bezinning op slib” is uitgevoerd om de huidige kennis ten aanzien van slib te mobiliseren en een advies te geven ten aanzien van verdere ontwikkeling van de slibmodellering voor de beoogde grootschalige morfologische modellering en sedimentinteracties in de Rijn-Maasmonding en de overgangsgebieden. Daarvoor is een literatuurstudie uitgevoerd, en zijn deskundigen geraadpleegd.

De resultaten van de studie geeft een overzicht van de stand van zaken ten aanzien van kennis van slibprocessen, systeemkennis, en beheeraspecten. Daarbij vormen deze een basis voor een verdere uitwerking om te komen tot een meer betrouwbare modellering en voorspelling van het gedrag van slib. Het is daarvoor het noodzakelijk de drie volgende punten aan te pakken:

- 1) onvoldoende nauwkeurige beschrijving van de waterbeweging en zoutbeweging in de Rijn-Maasmonding;
- 2) leemtes in proceskennis, en het modelleren van de processen ten aanzien van slib en zand-slibmengsels;
- 3) onvoldoende gegevens over de toestand, het transport en eigenschappen van slib in de Rijn-Maasmonding.

In het plan van aanpak voor ontwikkeling van instrumenten is gekozen voor een bottom-up aanpak waarbij is uitgegaan van een aantal concrete beheervragen. De vragen zijn onderverdeeld naar korte- en lange-termijn beheer. Beantwoorden van de vragen vereist een combinatie van modelinstrumenten en veldmetingen.

Voor de vervolgstappen wordt voorgesteld uit te gaan van een raamwerk waarbij de beschrijving en karakterisering van het systeemgedrag, en de toepassing voor specifieke beheervragen leidt tot geschikte instrumenten. In de eerste stap wordt, uitgaande van de bestaande kennis en informatie zoals beschreven in dit rapport, de systeembeschrijving voor de Rijn-Maasmonding verder uitgewerkt. Het gaat daarbij om een inventarisatie en beschrijving van de belangrijkste processen, en wanneer en waar deze optreden. In deze systeembeschrijving moet worden vastgesteld hoe deze slibprocessen in kentallen kunnen worden gekarakteriseerd. In de daarop volgende stappen kan worden vastgesteld wat deze karakteristieken betekenen voor de relevante beheervragen en de effectbepaling van grote ingrepen in het systeem (de Kier, Ruimte voor de Rivier, etc.), en op welke wijze de kentallen verder kunnen worden bepaald en bijvoorbeeld door middel van kaarten kunnen worden gepresenteerd. Tenslotte kan dit worden vertaald naar eisen ten aanzien van de bouw en het gebruik van beschikbare instrumenten ten behoeve van de specifieke beheervragen.

5 Literatuur

- Asselman, N.E.M. (1997) Suspended sediment in the river Rhine : the impact of climate change on erosion, transport, and deposition. Proefschrift. Universiteit Utrecht.
- Asselman, N.E.M. & Van Wijngaarden, M. (2002), Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the River Rhine in The Netherlands. *Journal of Hydrology*, Vol.268, pg. 127-142.
- Blom, A. (2003) A continuum vertical sorting model for rivers with non-uniform sediment and dunes. Proefschrift, Twente University, Enschede.
- Bruens, A., Vanlede, J., Van Kessel, T. (2006), Notitie beheersvragen LTV-slibmodel. Rapport Z4210.75, WL | Delft Hydraulics & WL Flanders Hydraulics Research.
- Bruens, A., Van Kessel, T., De Kok, J. en De Grave P. (2007), Voortschrijdend Onderzoeksprogramma Slib, Resultaten fase 1: meerjarenwerkplan. Rapport Z4374, WL | Delft Hydraulics.
- Galappatti, R. (1983), A depth-integrated model for suspended sediment transport. *Comm. on Hydr.*, Report No.83-7, Delft University of Technology, 114 pp.
- Galappatti, R. and Vreugdenhil, C.B. (1985), A depth-integrated model for suspended sediment transport. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol.23, No.4, p.359-377.
- De Kok, J.M. (2000), Slibtransport rond de Maasmond – Resultaten van het SILTMAN onderzoek. Rapport RIKZ/2000.027, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Rijkswaterstaat.
- De Nijs, M. (2007) Persoonlijke mededelingen. Technische Universiteit Delft.
- Houwing, E.J. & Blom, G. (2001), Sedimenttransport en morfologische ontwikkeling van het Noordelijk Deltabekken. RIZA rapport 2001.021, Rijkswaterstaat RIZA/WST, ISBN 90 3695 375 8.
- Icke, J. (2005) Zwevend stofmodellering; Nevengeulen bij Gameren en Rijn-Maasmonding. Rapport Q4013. WL | Delft Hydraulics.
- Jong, P. (1994), Analyse veldmetingen 1993 t.b.v. afregelen RIJMAMO (3D). Rapport VR749.94/Z590.15 (fase 2a en 2b), WL | Delft Hydraulics.
- Kamminga S.D. (2001) Resultaten van metingen met LSST systemen in het Haringvliet en het Hollands Diep.
- Karelse, M. (1993), Simulatie van slibtransporten in het Noordelijk Deltabekken met behulp van DISTRO/DELWAQ-model – deel III: onderzoek met groot NDB-model. Rapport Z0569, WL | Delft Hydraulics.
- Koomans, R.L., 2002a. Bodemsamenstelling Haringvliet: sediment karakterisatie en analyse. Medusa Explorations BV, 2001-P-015-R4.
- Koomans, R.L., 2003. Medusa kartering Amer, Merwede, Bergsche Maas: verontreiniging van de waterbodem. Medusa Explorations BV, 2002-P-027.
- Krone, R. B. 1962, Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes. Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, Berkeley, CA; prepared for US Army Engineer District, San Francisco, San Francisco, CA, under US Army Contract No. DA-04-203 CIVENG-59-2
- Ludikhuize, D. & Ruijgh, E.F.W. (1989), Waterkwaliteitsonderzoek van het Noordelijk Deltabekken – slibtransport Hollandsch Diep/Haringvliet. Rapport T0262, Waterloopkundig Laboratorium.
- Meijers, E. & Icke J. (2006), Zwevend stof Rijn-Maasmonding. Rapport Q4201, WL | Delft Hydraulics.
- Mosselman, E., Crebas, J., Icke, J., Sloff, C.J., Wang, Z.B. (2005), Bouwstenen voor nieuw morfologisch SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding. Rapport Q4083, WL | Delft Hydraulics.
- Partheniades, E. (1965), Erosion and Deposition of Cohesive Soils. *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol 91, No HY1, p.105-139.
- RIZA (2005) Bodem in beeld. Brochure/RIZA Rapport 2000.005
- Sieben, A. en J. van Essen (2007) Bodemligging en bodemvormen in de Dordtsche Kil, 2003-2007. Memo 2007-015, Rijkswaterstaat Waterdienst.
- Sloff, C.J., Verschelling E., Hauschild A., Crebas, J. (2007), Morfologisch SOBEK model Rijn-Maasmonding. Rapport Q4239, WL | Delft Hydraulics.

- Snippen, E., Fioole, A., Geelen, H., Kamsteeg, A., Van Spijk, A. & Visser, T. (2005) Sediment in (be)weging – sedimentbalans Rijn-Maasmonding periode 1990-2000. Conceptrapport Rijkswaterstaat RIZA, afdeling WRE.
- Ten Brinke, W.B.M. (1992), Slib in het estuarium van de Schelde: paden en lotgevallen deel 1 & deel 2. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht.
- Van der Kaaij, T. (1995), RIJMAMO-3D, deel 1 en deel 2. Rapport VR1146.95/Z0673 (deel I en II), WL | Delft Hydraulics.
- Van der Linden, M. & Van Zetten, J.W. (2001), Een SOBEK-model van het Noordelijk Deltabekken. RIZA rapport 2002.002, Rijkswaterstaat, directie Zuid-Holland.
- Van der Meulen, M.J., De Lang, F.D., Maljers, D., Dubelaar, C.W., Westerhoff, W.E. (2003) Grondsoorten en delfstoffen bij naam. Tweede, licht-gewijzigde druk, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, Publicatierreeks Grondstoffen 2003/16.
- Van Dremmel, P.F. (1995), Slib- en zandbeweging in het Noordelijk Deltabekken in de periode 1982-1992. Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, Afdeling Watersysteemkennis.
- Van Kessel, T., Vonk, M. (1999), Handboek Zoetwaterslib. Rapport T2289/T2343, WL | Delft Hydraulics.
- Van Kessel, T. (2005), Gevoeligheidsonderzoek effectiviteit bufferput Caland-Beerkanaal. Rapport Z4055, WL | Delft Hydraulics.
- Van Kessel, T. (2006), Development of a mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV-phases 1 & 2. Rapport Z4210.00, WL | Delft Hydraulics.
- Van Kessel, T., Vanlede, J., De Kok, J. (2007), Development of a mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. Rapport Z4375, WL | Delft Hydraulics.
- Van Ledden, M. (2003), Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins. Doctoral thesis Delft University of Technology.
- Van Ledden, M., Van Kesteren, W.G.M., Winterwerp, J.C. (2004), A conceptual framework for the erosion behaviour of sand-mud mixtures. *Continental Shelf Research*, Vol.24, pg. 1-11.
- Van Ledden, M., Wang, Z.B., Winterwerp, J.C., De Vriend, H.J. (2006), Modelling sand-mud morphodynamics in the Friesche Zeegat. *Ocean Dynamics* Vol 56, No.3-4, p.248-265.
- Van Maren, D.S., J.C. Winterwerp, en R.E. Uittenbogaard (2007) New developments in the mud transport module of Delft3D. Rapport Z3824.55, WL | Delft Hydraulics.
- Van Rijn, L.C. (2007a), A unified view on sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness and bed-load transport. *Journal Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.133, No.6, p.649-667.
- Van Rijn, L.C. (2007b), A unified view on sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport. *Journal Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.133, No.6, p.668-689.
- Van Rijn, L.C. (2007c), A unified view on sediment transport by currents and waves. III: Graded beds. *Journal Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.133, No.7, p.761-775.
- Van Wijngaarden, M. (1997) Modelleren en meten van zwevende materiaal bij een hoge afvoer in de zuidrand van het noordelijk deltabekken, RIZA werkdocument 97177x.
- Van Wijngaarden, M., Venema, L.B., De Meijer, R.J., Zwolsman, J.J.G., Van Os, B., Gieske J.M.J. (2002), Radiometric sand-mud characterisation in the Rhine-Meuse estuary – part A. Fingerprinting. *Geomorphology* Vol. 43, pg. 87-101.
- Van Wijngaarden, M., Venema, L.B., De Meijer, R.J. (2002), Radiometric sand-mud characterisation in the Rhine-Meuse estuary – part B. In situ mapping. *Geomorphology* Vol. 43, pg. 103-116.
- Wang, Z.B., Van der Weck, A.W., Houwing, E.J. (2000), Morfologie van het Noordelijk Deltabekken. Rapport Z2662, WL | Delft Hydraulics.
- Wijbenga, J.H.A. & Mosselman, E. (2007), Rijn-Maasmonding – onderzoeksagenda morfologie. Rapport PR 1288, HKV Lijn in water.
- Winterwerp, J.C., Cornelisse, J.M., Kuijper, C. (1992), Cohesive sediments. Report 38. Erosion of natural sediments from The Netherlands - Analysis of laboratory experiments, Rijkswaterstaat & Delft Hydraulics
- Winterwerp, J.C., Cornelisse, J.M., Kuijper, C. (1993) A lab study on the behaviour of mud from the Western Scheldt under tidal conditions. From: Nearshore and estuarine cohesive sediment transport (ed. Ashish J. Mehta), *Coastal and estuarine studies*; 42; AGU Washington; p. 295-313.

- Winterwerp, J.C., Uittenbogaard, R.E. (1997), Sediment transport and fluid mud flow – Physical mud properties and parametrization of vertical transport processes – SILTMAN; set-up of a POINT_MUD MODEL. Rapport Z2005, WL | Delft Hydraulics.
- Winterwerp, J.C. (1998), SILTMAN – analysis of field measurements. Rapport 1998, WL | Delft Hydraulics.
- Winterwerp, J.C., Van Kesteren, W.G.M. (2004), "Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment". ISBN 0-444-51553-4, Elsevier Amsterdam.
- Winterwerp, J.C. (2007), A process-based mud-sand transport model – strategy model set-up. Rapport Z3824-60, WL | Delft Hydraulics.

A Bespreekverslag Rijkswaterstaat DZH

Mondeling onderhoud te: Rotterdam, Rijkswaterstaat DZH
Gesproken met : Ary van Spijk, Wim Bijl, Ard Kamsteeg (RWS-Zuid Holland), Marcel Bruggers (RWS-RIZA/Deltares), Kees Sloff, Ankie Bruens (WL, Deltares)
Bedrijf : Rijkswaterstaat Zuid Holland
Datum bespreking : 22 november 2007
Onderwerp : Overleg "Bezinning op slib" en morfologie
Opgemaakt door : C.J. Sloff (WL)
Bijlage(n) :
Kopie(en) : Arjan Sieben (RIZA/Waterdienst), Almer de Swaaf (RIZA/Waterdienst), Han Winterwerp (WL/Deltares)
Projectnummer : Q4400.20

Doel overleg:

- Overleg tussen belanghebbenden bij de lopende morfologie en slibstudies die worden uitgevoerd in omgeving van Zuid Holland
- Kennis nemen van de inzichten en vragen ten aanzien van slib (en morfologie) in het beheergebied van Zuid Holland.
- Mogelijke prioritering van een aantal beheervragen waarmee de aanpak van vervolg in de studie "bezinning op slib" kan worden uitgewerkt.

Aanwezigen:

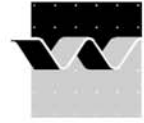
- Arie van Spijk: Veiligheid, Scheepvaart en Waterhuishouding; afdeling advies
- Ard Kamsteeg: afdeling planning
- Wim Bijl: Veiligheid, Scheepvaart en Waterhuishouding; afdeling advies
- Marcel Bruggers: RIZA, wordt Deltares;
- Kees Sloff: WL, afdeling Zoetwatersystemen, wordt Deltares;
- Ankie Bruens: WL, afdeling Zee-, kust- & estuariumbeheer, wordt Deltares.

Algemene punten die aan de orde zijn gekomen tijdens de bespreking (afkomstig uit de aantekeningen van Kees Sloff):

- De slibstudies "Bezinning op slib" en "VOP slib" spelen een belangrijke rol bij het identificeren van noodzakelijke kennis en instrumenten om voorbereid te zijn op het beantwoorden van beheersvragen. De studies zijn ook bedoeld voor het uitzetten van lijnen. Voor "bezinning op slib" zijn de lange-termijn vragen een relevant onderdeel.
- Het wordt als een positieve ontwikkeling ervaren dat de zoutwater slibstudies (VOP-slib) en zoetwater slibstudies (bezinning op slib) bij elkaar komen. Het is nuttig als dit initiatief vervolg krijgt via de activiteiten van de Waterdienst (de Swaaf, Kok, Mulder?).
- In sommige situaties (zoals het maken van een sedimentbalans, of het effect van baggerwerk in Nieuwe Waterweg op aanslibbing van havens) is het zinvol samen te werken met het Havenbedrijf. Beheer van havens ligt in handen van het Havenbedrijf, en gegevens ervan zijn niet in bezit van RWS. Hoewel er wel gegevens zijn van loswallen en depots, is soms meer detail gewenst. Dit hoeft echter geen probleem te zijn.
- De ecologie gaat een rol spelen in het beheer via de KRW. Er zullen eisen moeten worden gesteld aan de condities in het systeem ten aanzien van bijvoorbeeld troebelheid en gevolgen voor habitats.
- Monitoren is een belangrijke voorwaarde voor zinvolle analyse en voorspelling van het systeem. Het belang ervan wordt vaak niet als urgent beschouwd, of mogelijkheden zijn beperkt. Dat het wel kan bewijst monitoringcampagne voor nevengeulen (Sliedrechtse Biesbosch). Het is te adviseren de modellen te gebruiken als basis voor een meetplan: meet de aspecten die onzeker of onbekend zijn in het model. Besef wel dat de metingen ook een grote onzekerheid kunnen bevatten.



blz. 2 van besprekverslag d.d. 22 november 2007



WL | delft hydraulics

- Maak onderscheid tussen lange-termijn en korte-termijn beheervragen. Meeste beheervragen (o.a. in onderzoeksagenda morfologie) hebben betrekking op de korte termijn. Deze veranderen voortdurend. Lange-termijn vragen hebben over het algemeen betrekking op grootschalige effecten (systeemgedrag):
 - Wat zijn de gevolgen van klimaatverandering en zeespiegelrijzing op de morfologische ontwikkeling van het systeem? Mogelijk is er een interactie met onderzoek van Jaap Kwadijk.
 - Hoe veranderen de toetspeilen (veiligheidsniveau) door de grootschalige morfologische veranderingen?
 - Hoe werken de splitsingspunten?
- Een aanvullend aandachtspunt is de vraag hoe er nu omgegaan moet worden met onnauwkeurigheden in meetwaarden en modelresultaten, en met verschillen tussen modelresultaten van verschillende instrumentaria. Hoe kan een regionale dienst het beheer/de beheersmaatregelen op dit gegeven aanpassen? Misschien is dit een opdracht die door de Waterdienst zou kunnen worden opgepakt, omdat dit vraagstuk op meerdere fronten speelt.

In de volgende punten zijn specifieke beheersaspecten beschreven die in de bijeenkomst aan de orde zijn geweest.

Beheersaspecten gerelateerd aan de Biesbosch:

- Belangrijkste beheersvragen zijn gerelateerd aan:
 - Wanneer het gebied wordt geopend, hoe zal het nieuwe krekenselsel (met doodlopende kreken) aanslibben? Is dit materiaal verontreinigd? De beheervraag is gerelateerd aan het handhaven van de Ruimte voor de Rivier doelstellingen.
 - Zal tijdens hoogwater (maar ook onder normale omstandigheden) verontreinigd materiaal worden opgewerveld, en waar gaat dat naartoe? Of wordt een deel van het materiaal afgedekt?
 - Wat zijn de gevolgen van de maatregelen op aanslibbing/morfologie in het Hollandsch Diep waar al problemen zijn (en eventueel verder in de rivieren in het gebied)? Het is onbekend of slib uit de Biesbosch tot aanslibbing leidt op “de oversteek” of dat het misschien wel de Dordtse Kil in zal stromen.

Beheersaspecten gerelateerd aan het middengebied:

- In hoeverre zet de erosie door? Neemt de erosie dusdanige vormen aan dat stabiliteit van dijken een probleem wordt? Op dit moment treedt sterke erosie op in de Oude Maas op het traject tussen Hartelkanaal en Nieuwe Waterweg: gaat dit doorzetten?
- Ook de Dordtse Kil verdiept (vooral Noordelijk deel). Is dit op te lossen?

Beheersaspecten gerelateerd aan de Nieuwe Waterweg:

- Uit onderzoek van Michel de Nijs (AIO TU-Delft) blijkt dat het gedrag van zand en slib in de Nieuwe Waterweg razend ingewikkeld is.
- Het is onbekend hoeveel slib afkomstig is uit zee en hoeveel uit de rivieren. Meningeën zijn sterk verdeeld (varieert van 80%-20% , 50%-50%, tot 20%-80%).
- Ecologische aspecten (bijvoorbeeld n.a.v. baggerwerk) spelen geen noemenswaardige rol in de Nieuwe Waterweg.
- Hoewel door getijdestroming hoge stroomsnelheden kunnen optreden in de Nieuwe Waterweg, bevindt zich voor landinwaarts (richting Nieuwe Maas) meer slib op de bodem. Een zandbodem is vooral te vinden in de omgeving Maassluis.
- Belangrijkste beheersvragen zijn gerelateerd aan:
 - Wat is de invloed van het aanpassen van het bodemprofiel (trapjeslijn) op het aanbod van zand en slib in de havens. Er ligt hier een link met beheer van havens door Havenbedrijf.

B Raamwerk systeembeschrijving

Onderstaand raamwerk is afkomstig uit een door A.Sieben op 13 december 2007 voorgestelde uitwerking van de systeembeschrijving voor slib in de Rijn-Maasmonding. Enkele aanvullingen en aanpassingen zijn geïntroduceerd om als voorbeeld te dienen voor de aanpak voor vervolgstappen t.a.v. slib voorgesteld in dit rapport.

1) Op welke wijze gedraagt het getij en rivierafvoer zich in het systeem, en hoe ver komt het zout?

De dynamica en bathymetrie van de verschillende riviertakken en havens moet worden vastgesteld, en het gedrag van de zouttong moet worden gedefinieerd.

2) Welke fysische processen zijn belangrijk?

Inventarisatie van belangrijkste processen, een korte karakterisering van het mechanisme en kentallen waarmee kan worden beoordeeld of/wanneer/waar dit voorkomt in de Rijn-Maasmonding, waarbij het gebied kan worden opgedeeld in ruimtelijke domeinen (NB, hier nog niet vaststellen of het belangrijk is voor beheer/beleid: die interpretatie komt m.b.v. de signaleerde vier grote beheersvragen).

Bijvoorbeeld:

Verticale menging

3) turbulentie (onderdrukt bij niet-geconsolideerde bodem; bij volumieke verzadigingsconcentraties van 0,03 a 0,04, of circa 100 g/li (Tabel 2.2 uit Winterwerp 1999))

- golven (in ondiepe gebieden)
- bodemvormen (kan inventarisatie hiervan met Mbes, zo ja dan aanbevelen)
- stratificatie door sedimentconcentratie (bij welk Richardson getal?)
- stratificatie door zoet-zout overgangen (bij welk Richardson getal?)
- valsnelheid:
- flokgrootte (flocculatie)
- gehinderde bezinking (bij concentraties van meer dan 2 g/li, Fig.4.5 uit Winterwerp (1999))
- temperatuur
- organisch gehalte

Horizontale menging

- convectie
- stroming; rivierafvoer, getij, storm
- versnelling, vertraging (getij, verbreding/versmalling, bekken)
- dieptevariatie (vaargeul, binnen/buitenbocht NW)
- ruwheidsvariatie (lagere ruwheid bij niet-geconsolideerde slibbodem), indien grootschaliger dan grofweg $3\lambda_s$, aantrekkende invloed op stroming
- diffusie

- turbulentie, wervels, tijrcirculaties
- scheepvaart
- baggeren
- stratificatie (sediment en zout)
- temperatuurgradiënten

Bezinking/Opname

- bioturbatie
- consolidatie
- invloed klei hoeveelheid op erodeerbaarheid via kritische schuifspanning en M (erosie coëfficiënt), bodemvormen, doorlaatbaarheid)

3) Hoe kunnen deze processen gekarakteriseerd worden (kentallen)?

Nadat de rivier in ruimtelijke domeinen is gesplitst kan een nadere karakterisering plaatsvinden gekoppeld aan deze domeinen. Bijvoorbeeld:

- 4) Criterium voor gedempte turbulentie Verzadigingsconcentratie (Verg.6.3 Winterwerp, 1999). Een overzicht waar dit potentieel kan gebeuren is handig.
 - Tijdschaal voor consolidatie
 - Tijdschaal voor flocculatie (10 – 100 uur?)
- 5) Tijdschaal voor valsnelheid (a/w ; diepte $a=10-20$ m en $w = 0,1 - 10$ mm/s leidt tot tijdschalen van een half uur tot twee dagen)
- 6) Tijdschaal voor menging sliblaag t.o.v. tijdschaal voor bodemveranderingen; *de verhouding zegt iets over dominantie van menging over aanzanding* (Eq.5.8 Van Ledden schat de eerste op enkele maanden (alleen getij)). Dit beïnvloedt de gelaagdheid in de bodem (dun sliblaagje bij snelle aanzanding)
- 7) Stratificatie (Richardson getal, wanneer/waar relevant, hoe gedefinieerd en hoe te schatten, bijvoorbeeld Sobek/Waqua/Triwaq?)
- 8) Relatieve bodemvormhoogte (het gaat om bodemfluctuaties i.r.t. viskeuze laag, maar pragmatisch kan dit beter worden vertaald in bodemvormhoogte t.o.v. waterdiepte. Biedt ruimtelijk overzicht hierin handvat voor interpretatie van processen in Rijn-Maasmonding)
 - Organisch gehalte/temperatuur/alg (hoe wanneer relevant?)
 - Potentiële aanslibbing, drie opties:
 - a) i) overzicht tij-gemiddelde evenwichtsconcentratie c_e (cf Wang/Van Ledden) met Delwaq of
 - b) ii) overzicht $w c_e / M$ (Eq.5.9 Van Ledden) met M in de orde van 10^{-3} tot 10^{-5} $\text{kg/m}^2\text{s}$ (Van Ledden blz 66) of
 - c) iii) maximale bodemschuifspanning (tijdens tijcyclus) met bv Sobek/Waqua; als kleiner dan 1 N/m^2 dan slib anders zandbodem (cf Fig 5.9 /2.12 in Van Ledden). *Omdat geen omweg via kalibratie aan te pas komt heeft dit een voorkeur voor aanbeveling, maar voldoet dit ook als criterium voor ruimtelijke karakterisering van de Rijn-Maasmonding?*
- 9) Invloed cohesiviteit op sedimenttransport: volgens Van Ledden is dit merkbaar voor klei content van meer dan 10%. Dus een overzichtskaart waar meer dan 10% klei in Rijn-Maasmonding ligt is handig?

4) Welke van deze processen zijn wanneer/waar relevant voor de Rijn-Maasmonding?

Na de definitie en uitleg bij de vorige vraag moeten de kentallen worden toegepast op situaties in de Rijnmond. Gebruik daarbij met expert judgement ranges parameters, of geef aan hoe deze in te schatten, te bepalen. Let bij de interpretatie van de kentallen (hoe belangrijk is het) op de volgende tijdschalen

Hoe verhouden de karakteristieke tijdschalen zich tot

- getij (uren)
- stormduur (dagen)
- laagwaterseizoen (maanden)
 - a) direct na aanleg (RVR werkzaamheden in uiterwaarden/zomerbed kan leiden tot nieuwe fluxen)/ingrepen
- middellange termijn (5-20 jaar)
- lange termijn (20-100 jaar)

Hoe verhouden de karakteristieke lengteschalen zich tot

- diepte (10-20 m)
- vaarwegbreedte/havenbekken (100-500 m)
- rivierstuk (1-10 km)
- riviertak (50-100 km)

Kunnen de relevante kentallen in een kaart van de Rijn-Maasmonding worden weergegeven (of, wat is er nodig om dergelijke kaarten te maken)?

5) Huidige aanpak is vaste klasseverdeling van slibfracties?

Tenslotte, met de bovenstaande inzichten, een evaluatie van huidige slibmodellering.

Volgens Arjan Sieben geldt deze aanpak als sprake is van evenwichtsvlokken (immers geen flocculatie). Wanneer is dat gerechtvaardigd (marge voor afwijkingen evenwichtscondities)

Deze aanpak lijkt daardoor geschikt voor

- een tijdschaal $T \gg T_{floc} = 10-100$ uur (dus niet getij, storm, hoogwater?)
- een lengteschaal $L \gg u T_{floc} = 36-360$ km

en/of:

- concentraties lager dan de verzadigingswaarde (Verg.6.3) t.p.v. lage stroomsnelheden

Voor welke tijd-ruimteschaal is een dynamisch flocculatiemodel nodig, waar/wanneer moet met de verzadigingsconcentratie gerekend worden?

6) Huidige aanpak is een vaste consolidatie?

Vaste consolidatie (massaverandering evenredig met volume verandering), constante valsnelheden, erosie/sedimentatie drempelwaarden etc. Is dit voor de Rijn-Maasmonding goed genoeg (worden er processen gemist), (Hoe) kan dit ook voor rivieren worden toegepast