

Definitiestudie Morfologische Dynamiek Westerschelde

M.J.F. Stive

H.F.P. van den Boogaard

Z.B. Wang

M. J. Baptist

A.W. van der Weck



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ
Postbus 20907
2500 EX 's-Gravenhage

TITEL: Definitiestudie Morfologische Dynamiek Westerschelde

SAMENVATTING: In de afgelopen jaren is door Rijkswaterstaat zeer veel onderzoek verricht naar het functioneren van de Westerschelde. Geconstateerd wordt dat de morfologische dynamiek van het estuarium afneemt, wat in de toekomst mogelijk een probleem zou kunnen vormen bij het vervullen van een aantal gewenste gebruiksfuncties. Tevens wordt geconstateerd dat de kennis van de Westerschelde weliswaar zeer groot is, maar vooral kwalitatief van aard. Het doel van de huidige studie is dan ook het verduidelijken van de rol van morfologische dynamiek voor het functioneren van de Westerschelde en het doen van voorstellen om het onderzoek naar morfologische dynamiek de komende jaren richting te geven.

In het voorliggende rapport wordt een overzicht gegeven van de huidige status van de kennis op het gebied van morfologische dynamiek in de Westerschelde. Hiertoe wordt eerst een kort overzicht gegeven van het in de afgelopen jaren uitgevoerde onderzoek. Vervolgens wordt een conceptueel model voor morfologische dynamiek in estuaria beschreven. Aan de hand daarvan wordt aangegeven welke kennis op dit moment voorhanden is en aan welke kennis op korte termijn behoefte is. Tevens wordt de rol van morfologische dynamiek voor de beheersaspecten veiligheid, kwaliteit van water en bodem en voor de ecologie beschreven. Kennistekorten die integratie van kennis van de genoemde aspecten met morfodynamiek in de weg staan worden gesignaleerd. Tevens wordt een aantal mogelijke kwantitatieve indicatoren voor morfologische dynamiek geïntroduceerd en wordt een aantal te onderzoeken hypothesen voorgesteld.

Tenslotte wordt een inventarisatie gepresenteerd van (nu of in de nabije toekomst) beschikbare onderzoeksmethoden en modeltechnieken. De gesignaleerde kennistekorten worden samen met de beschikbare onderzoeksmethoden geïntegreerd tot een serie onderzoeksvoorstellen, waarmee de beheerder van de Westerschelde het in de komende jaren noodzakelijke onderzoek in de gewenste richting kan sturen.

REFERENTIES: Offerte MCM220/Z2427/ej, datum 13 januari 1998
Overeenkomst RKZ-508, kenmerk RIKZ/OS 985335, datum 5 maart 1998
Wijzigingsovereenkomst RKZ-508A, kenmerk RIKZ/OS 986287, datum 28 juli 1998

REV.	AUTEUR		DATUM	OPMERKINGEN	REVIEW		GOEDKEURING	
1.0	A.W. vd Weck		Juli 1998	Concept	M.J.F. Stive			
3.0	A.W. vd Weck	W	Nov 1998	Definitief	M.J.F. Stive	Stive	T. Schilperoort	Stive
TREFWOORDEN				INHOUD			STATUS	
Morfologie, Morfodynamiek, Westerschelde				TEKST:	72 bladzijden		☐ VOORLOPIG	
				TABELLEN:	6		☐ CONCEPT	
				FIGUREN:	9		☒ DEFINITIEF	
				APPENDICES:	3			
				PROJECTNUMMER Z2427				

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding voor de definitiestudie.....	1
1.2	Doel.....	1
1.3	Inkadering en randvoorwaarden	2
1.4	Aanpak	3
2	Voorafgaand onderzoek en recente literatuur	5
2.1	Inleiding	5
2.2	De Oostwest studie	5
2.2.1	Inhoud en resultaten van de studie.....	5
2.2.2	Kwaliteitstoets Oostwest studie.....	7
2.3	Overig recent uitgevoerd onderzoek.....	8
2.4	Literatuur	11
2.5	Kennistekorten	13
3	Kennis van en inzichten in morfologische dynamiek	15
3.1	Inleiding	15
3.2	Conceptueel model morfologische dynamiek van estuaria	15
3.3	Morfologische dynamiek Westerschelde	18
3.3.1	Het morfodynamische systeem Westerschelde	18
3.3.2	Nadere analyse van de verschillende schaalniveaus.....	20
3.3.3	Effecten van ingrepen en beheersaspecten	21
3.4	Huidige kennis van het morfodynamische systeem	22
3.4.1	Huidige kennis van de externe forcering	22
3.4.2	Huidige kennis van morfodynamische processen.....	24
3.5	Indicatoren voor morfologische dynamiek	25
3.5.1	Mogelijke indicatoren:.....	25
3.5.2	Evaluatie	27
3.6	Conclusies en hypothesen	29
3.6.1	Nieuwe hypothesen.....	29

	3.6.2 Kennistekorten	30
4	De rol van morfologische dynamiek voor de Westerschelde	33
	4.1 Inleiding.....	33
	4.2 Veiligheid tegen overstromen.....	33
	4.3 Kwaliteit van water en bodem.....	35
	4.4 Ecologie.....	38
	4.5 Conclusies en hypothesen	43
	4.5.1 Nieuwe hypothesen	44
	4.5.2 Kennistekorten	44
5	Onderzoeksbenaderingen	45
	5.1 Inleiding.....	45
	5.2 Onderzoeksbenaderingen: generiek.....	45
	5.3 Praktisch: inventarisatie beschikbare technieken.....	47
	5.3.1 Procesgeoriënteerde modellen.....	47
	5.3.2 Geïdealiseerde modellen	49
	5.3.3 (Semi-) Empirische modellen.....	49
	5.3.4 Datagedreven analyse en modellering.....	50
	5.3.5 Andere instrumenten	52
	5.4 Praktisch: stand van zaken en reële doelen Westerschelde	53
	5.5 Conclusies	57
	5.5.1 Kennistekorten	57
6	Onderzoeksplannen	59
	6.1 Inleiding.....	59
	6.2 Algemene kwantitatieve proceskennis	60
	6.3 Onderzoek naar ingreep - effect relaties.....	63
	6.4 De rol van morfologische dynamiek	64
	6.5 Lopende onderzoeken.....	66
	6.6 Prioriteiten.....	69
	6.7 Conclusies	71
7	Gebruikte literatuur.....	73

Appendices

- A Overzicht beschikbare literatuur**
- B Verslag van de workshop**
- C De rol van morfologische dynamiek voor de beheersaspecten
water- & bodemkwaliteit en ecologie**
- D Datagedreven analyse en modellering**

I Inleiding

I.1 Aanleiding voor de definitiestudie

De beheerder van het Westerschelde estuarium heeft aan de hand van zeer uitgebreid onderzoek geconstateerd dat over de laatste decennia de morfologische dynamiek van het estuarium steeds minder is geworden (Vroon *et al.*, 1997; Mol *et al.*, 1997). Onder morfologische dynamiek wordt de intensiteit en de frequentie van morfologische veranderingen en het daaraan gerelateerde sedimenttransport verstaan. Dat hier een verband ligt met de toename van menselijke ingrepen, gerelateerd aan gewenste functies als veiligheid tegen overstromen en scheepvaart, lijkt duidelijk. Verondersteld wordt dat een bepaalde mate van morfologische dynamiek belangrijk is voor de kwaliteit van water en bodem en voor de kwaliteit en diversiteit van de ecologie (Vroon *et al.*, 1997). De beheerder streeft ernaar het proces van afnemende morfologische dynamiek te beperken en indien mogelijk deze dynamiek te bevorderen.

Bovenstaande gedachten sluiten nauw aan bij het relatief nieuwe begrip 'veerkracht' dat gebruikt wordt in het waterbeheer. Herstel van veerkracht wordt een belangrijke leidraad. Konkreet lijkt dit te kunnen worden bereikt door meer ruimte te laten of te geven aan natuurlijke processen met minimalisatie van menselijke ingrepen, zodat een morfologisch meer dynamisch gedrag mogelijk is. Overigens geldt hierbij wel nadrukkelijk de randvoorwaarde dat de veiligheid en de scheepvaartfuncties van het estuarium niet worden geschaad. Indien het mogelijk blijkt morfologische dynamiek te kwantificeren en de rol van morfologische dynamiek voor de beheersaspecten water- & bodemkwaliteit, ecologie en veiligheid bekend is, zou hiermee tevens een indicator zijn benoemd die de mate van veerkracht kan aangeven.

I.2 Doel

Deze definitiestudie heeft tot doel de beheerder bij het hierboven genoemde streven te ondersteunen door aan te geven welke kennistekorten bestaan op het gebied van de fysische processen die de morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde sturen, en door aan te geven op welke manier deze kennistekorten kunnen worden aangepakt. In de eerste plaats zal daartoe de huidige kennis van het morfodynamisch systeem en de morfodynamische processen in kaart worden gebracht en zal worden aangegeven hoe die kennis vergroot kan worden. Daarnaast zullen de huidige inzichten in de kwalitatieve en kwantitatieve relaties tussen morfologische dynamiek enerzijds en veiligheid, kwaliteit van water & bodem en ecologie anderzijds worden beschreven en zal worden aangegeven hoe deze inzichten kunnen worden vergroot.

Het belangrijkste resultaat van deze definitiestudie is een serie onderzoeksvoorstellen waarin wordt aangegeven op welke wijze meer (kwantitatieve) kennis kan worden verkregen over de fysische processen en mechanismen die de morfologische ontwikkeling in de Westerschelde sturen.

1.3 Inkadering en randvoorwaarden

Er wordt impliciet verondersteld dat meer morfologische dynamiek synoniem is aan een meer natuurlijk estuarium. Onder natuurlijkheid wordt hierbij de mate waarin ruimte en tijd wordt gegeven aan fysische, chemische en biologische processen verstaan. Hierbij zijn ook de relaties tussen de morfologische dynamiek (fysische processen), de water- en bodemkwaliteit (chemische processen) en de ecologie (biologische processen) van belang. Overigens mag vergroting van de natuurlijkheid geen ongewenste gevolgen hebben voor de veiligheid tegen overstromen. De rol van morfologische dynamiek voor deze beheersaspecten is echter (nog) niet in detail bekend. De vraag of morfologische dynamiek inderdaad zo belangrijk is, kan daarom pas worden beantwoord nadat meer kennis over de genoemde relaties is verkregen. Mede om deze reden wordt in deze studie aandacht besteed aan de relaties tussen morfologische dynamiek en de beheersaspecten veiligheid tegen overstromen, ecologie en kwaliteit van water en bodem.

Belangrijke beheersmaatregelen die hun invloed hebben (gehad) op de morfologische dynamiek van de Westerschelde betreffen maatregelen ten behoeve van de functies veiligheid en bevaarbaarheid. De beheerder wil de morfologische dynamiek behouden, of zo mogelijk versterken, zonder dat de veiligheid en de scheepvaartfuncties in gevaar komen. De geometrische grenscontouren van het estuarium in het horizontale vlak hangen sterk samen met de veiligheidsfunctie. In eerste instantie denkt de beheerder niet aan opties deze contouren te wijzigen. Anders ligt dit met de locatie van de grensdiepten langs de vaargeul. Dit impliceert dat de mogelijkheden voor behoud of versterking van dynamiek gezocht dienen te worden in plaat- en geuldynamiek binnen de huidige ruimtelijke contouren. Met andere woorden: formeel gesteld wordt de ruimte voor morfologische dynamiek op de schaal van het estuarium niet “in de breedte of lengte” maar “in de diepte” gezocht. Op lagere schaalniveaus is de ruimte voor dynamiek in horizontale richting groter.

Voorbeelden van morfologische veranderingen die vallen onder de definitie van morfologische dynamiek zijn geulmigraties, functiewisselingen, bodemomwerking en veranderingen in geulvolumina. Het betreft dus zowel horizontale als verticale veranderingen. Op verschillende ruimte- en tijdschalen kan onderscheid worden gemaakt tussen mega-, macro-, meso- en micro-schaal dynamiek. De mega-schaal dynamiek betreft veranderingen op de ruimtelijke schaal van het hele estuarium of van de grote compartimenten van het estuarium en zeer lange tijdschalen (eeuwen). De macro-schaal dynamiek betreft veranderingen op de ruimtelijke schaal van hoofd- en nevengeulen en tijdschalen van tientallen jaren. De meso-schaal dynamiek betreft veranderingen op de ruimtelijke schaal van plaatgebieden en tijdschalen van jaren. De micro-schaal dynamiek betreft veranderingen op de ruimtelijke schaal van beddingvormen zoals mega-ribbels. De bijbehorende tijdschalen zijn dagen. Verondersteld wordt dat juist op de macro- en meso-schaalniveaus door de mens de meeste invloed kan worden uitgeoefend omdat de belangrijkste menselijke ingrepen, zoals verdiepen van de vaargeul en vaargeulonderhoud, juist op deze schaalniveaus plaatsvinden.

In het huidige rapport wordt regelmatig de term “model” gebruikt. Hiermee worden niet alleen computermodellen (software pakketten en daarmee opgezette applicatiemodellen) bedoeld. Het begrip model wordt veel breder opgevat. Het kan een rekenmodel zijn maar het kan ook een bepaalde theorie of een gedachtengang zijn. In deze optiek gebruikt men altijd een bepaald model bij het oplossen van een probleem met betrekking tot morfologie,

ook als er helemaal geen computermodel aan de pas komt. Een bekend voorbeeld is de karakterisering van de geulenstructuur van de Waddenzee als een appelboom en die van de Westerschelde als een populier (Van Veen, 1950). Dit is een glashelder model, maar rekenwerk komt er helemaal niet aan te pas.

Modellen worden gebruikt als hulpmiddel in onderzoek en worden beschouwd als dragers van kennis. Kennis ontwikkeld in onderzoek wordt pas bruikbaar voor latere toepassingen door onderzoekers, adviseurs en beheerders, als het tot modelvorming heeft geleid. Modelvorming hoeft echter niet per definitie via de ontwikkeling van computerprogramma's te gebeuren. Een model wordt hier dan ook gezien als een generiek kennisstelsel ten behoeve van de samenhang en hiërarchie van fysische processen.

1.4 Aanpak

De huidige studie is gebaseerd op drie informatiebronnen. In de eerste plaats betreft dat rapportages en studies die specifiek zijn verricht voor de Westerschelde, met een bijzondere rol voor de zogenaamde OOSTWEST studie. Daarnaast zijn rapportages en studies die zijn verricht voor vergelijkbare estuaria gebruikt. Tenslotte zijn recente inzichten in estuarien gedrag in het algemeen en van de Westerschelde in het bijzonder, zoals bestaand bij Nederlandse experts, toegepast. Voor de uitvoer van de studie werd naast het WL | DELFT HYDRAULICS projectteam een team van externe adviseurs samengesteld. Dit expertteam bestond uit prof.dr.ir. H.J. de Vriend, dr. H.E. de Swart en ir. E. Allersma. Het WL projectteam bestond uit prof.dr.ir. M.J.F. Stive, dr.ir. Z.B. Wang, drs. A.W. van der Weck, dr. H.F.P. van den Boogaard en ir. M.J. Baptist. Daarnaast werden bijdragen geleverd door drs. M.R.L. Ouboter en drs. N.M. de Rooij.

Het projectteam heeft de bestaande rapportages en studies geanalyseerd en de inzichten die bij de experts aanwezig zijn in kaart gebracht. De aanzet tot de analyse werd gevormd bij de voorbereiding van een workshop. Tijdens deze workshop, gehouden op woensdag 22 april 1998, hebben de leden van het expertteam hun visie op de analyse en de onderzoeksonderwerpen gegeven. Met de deelnemers (ruim twintig deskundigen van Rijkswaterstaat, universiteiten en onderzoeksinstituten) werd gediscussieerd over de rol van morfologische dynamiek voor het estuarium en de mogelijkheden om morfologische dynamiek beter kwantitatief te beschrijven. De resultaten van de workshop zijn vervolgens nader uitgewerkt en gebruikt om tot een definitieve analyse van de bestaande kennis te komen en om aan te geven hoe deze kennis en inzichten vergroot kunnen worden. Hierbij is ook de inbreng van deskundigen op het gebied van ecologie en water & bodemkwaliteit betrokken.

In het voorliggende rapport wordt als eerste een kort overzicht gegeven van recent uitgevoerd of nog lopend onderzoek op het gebied van morfologische dynamiek en de relatie tussen morfologische dynamiek en belangrijke beheersaspecten. Vervolgens wordt een conceptueel model van de morfologische dynamiek van de Westerschelde opgesteld en uitgewerkt. Daarna wordt de relatie tussen morfologische dynamiek en een aantal beheersaspecten nader uitgewerkt. Tenslotte wordt na een inventarisatie van beschikbare onderzoeksmethoden een onderzoeksplan gepresenteerd om de gesignaleerde kennis tekorten aan te pakken. In de bijlagen zijn een verslag van de workshop en de bijdragen van deskundigen op het gebied van data-analyse technieken, ecologie en water- en bodemkwaliteit opgenomen.

2 Voorafgaand onderzoek en recente literatuur

2.1 Inleiding

Reeds uitgevoerd onderzoek geeft een overzicht van diverse morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde. De achterliggende fysische processen zijn echter kwantitatief nog niet voldoende begrepen. De huidige definitiestudie heeft tot doel aan te geven op welke wijze de voor deze begripsvorming noodzakelijke kennis kan worden verkregen. Hiertoe zal in dit hoofdstuk eerst een overzicht worden gegeven van de resultaten van de Oostwest studies en de kwaliteitstoets Oostwest. Tevens zal een overzicht worden gegeven van ander recent onderzoek dat voor de huidige studie relevant is. Ook is een overzicht gemaakt van algemene literatuur op het gebied van estuariene morfologie, met als doel eventueel bij de lezer nog niet bekende literatuur onder de aandacht te brengen.

2.2 De Oostwest studie

2.2.1 Inhoud en resultaten van de studie

In het project Oostwest is onderzocht wat er in de loop van de tijd is veranderd aan het fysische en biologische systeem van de Westerschelde, en welke factoren daarop van invloed zijn geweest. Hierbij is aandacht besteed aan het getij, de morfologie en de ecologie. Deze indeling en volgorde komen bij benadering overeen met het ordeningsprincipe Proces - Patroon - Soort, dat werd geïntroduceerd in de Pilot-studie Oostwest. De resultaten van deze studies worden hieronder aan de hand van deze ordening kort samengevat.

Processen

Geconstateerd is dat de getijdoordringing in de Westerschelde is versterkt. Het hoogwaterpeil en de getijslag nemen in de loop van de tijd toe. Deze ontwikkelingen worden verklaard doordat het estuarium smaller is geworden. Hierdoor worden de gebieden waar water kan worden geborgen kleiner en worden de geulen ruimer. Ook is de komberging van de Westerschelde in de periode 1930 - 1960 afgenomen. Na die tijd is de netto komberging nauwelijks veranderd, omdat de afname van de komberging als gevolg van verlandings wordt gecompenseerd door toename van het tijverschil. Als gevolg van deze tegengestelde ontwikkelingen is op dit moment niet vast te stellen of het getijvolume sinds 1930 is veranderd. Wel is duidelijk dat de verdeling van het getijdebiet over de verschillende geulen in het oostelijk deel en het middendeel van de Westerschelde is veranderd. In het oostelijk deel is de watervoerende functie van de hoofdgeul toegenomen ten koste van de nevengeulen. Dit wordt veroorzaakt door de verminderde wrijving in de hoofdgeul als gevolg van baggerwerk op de drempels en stortingen in de nevengeulen. In het middendeel nam het getijvolume in de ebgeul af als gevolg van natuurlijke

ontwikkelingen. Tevens werd geconstateerd dat de grootschalige morfologische dynamiek in de Westerschelde (migratie van hoofdgeulen en nevengeulen) is afgenomen. De hoofdgeul is steeds meer op een vaste ligging gefixeerd geraakt en verdiept. Ook de mesodynamiek (migratie van kortsluitgeulen door plaatcomplexen) is afgenomen, als gevolg van afgenomen verhangen over de platen. Vastgesteld werd dat de Westerschelde sinds 1955 een grote hoeveelheid zand heeft geïmporteerd uit de kustzone. Dit proces is na 1980 gestopt. Het sediment is met name geborgen in het Middelgat. Tenslotte werd vastgesteld dat er in de bestudeerde periode sprake is van vloedgedomineerd, netto landwaarts transport van sediment. Dit transport vindt voornamelijk plaats in circulatiecellen rondom de plaatcomplexen. Transport in langsrichting vindt plaats door uitwisseling tussen de verschillende circulatiecellen.

Morfologische patronen

Sinds 1955 is de doorgaande hoofdgeul van de Westerschelde verdiept en verbreed. Sediment is voornamelijk opgeslagen in nevengeulen en plaatcomplexen als de Platen van Valkenisse en Ossensisse. De platen zijn hierdoor zowel in oppervlak als in gemiddelde hoogte toegenomen. De slikken in de buitenbochten zijn over het algemeen versmald en verlaagd en hebben dus netto sediment geleverd. De schorren, met name Saeftinge, hebben door ophoging sediment opgeslagen. Ook is sinds 1955 de oppervlakteverdeling tussen geul, ondiep water, plaat, slik en schor sterk gewijzigd. Het geulareaal is uitgebreid als netto-effect van de verruiming van de hoofdgeulen en verkleining van de nevengeulen. De platen zijn gegroeid door het opvullen van kortsluitgeulen. Het areaal ondiepwatergebied is met bijna een derde afgenomen, vooral in de jaren '60. Het slik- en schorareaal is sinds 1960 sterk afgenomen als gevolg van inpolderingen en havenaanleg. Vooral jonge schorren zijn nu bijna geheel verdwenen. De afname van de macro- en mesodynamiek heeft de platen een ander uiterlijk gegeven. Kleinere platen zijn door het opvullen van kortsluitgeulen omgevormd tot grotere en meer aaneengesloten plaatcomplexen. Hierdoor zijn veel flauwe plaat-geulovergangen verdwenen, wat heeft geleid tot een versteiling van de plaatranden. Het areaal laaggelegen, laagdynamische slibrijke gebieden (van groot belang voor de ecologie van het gebied) is in het oostelijk deel sinds het begin van de waarnemingen (1935) steeds afgenomen. Sinds 1957 neemt dit areaal met een grotere snelheid af dan het totale areaal intergetijdegebied. Hierdoor daalt het aandeel van de laaggelegen slibrijke ecotopen in het intergetijdegebied. Door de groei van de platen van Valkenisse is het areaal hooggelegen slibrijke gebieden wel toegenomen. Voorheen kwam dit soort gebieden nauwelijks voor op de platen.

Biodiversiteit

Van de huidige overgebleven schorren in de Westerschelde is Saeftinge veruit het grootste. De vegetatiegeschiedenis van Saeftinge past bij een zich uitbreidend en ophogend schor. Vastgesteld is dat de soortensamenstelling van de bodemdieren in het oostelijk deel niet veel is gewijzigd gedurende de laatste dertig jaar. Het soortenspectrum is beperkt tot ongeveer veertig soorten, die horen bij de plaats in de zout-zoet gradiënt. Of de totale biomassa is toe- of afgenomen is niet met zekerheid vast te stellen. Inpolderingen en havenactiviteiten hebben de leefomstandigheden voor enkele vogelsoorten sterk gewijzigd. De ontwikkeling van de maximum aantallen vogels van soorten die fourageren in het

intergetijdegebied, levert geen aanwijzingen op dat de veranderingen in de ecotopen doorwerken in de fourageermogelijkheden van deze vogels. De Westerschelde herbergt een groot aantal organismen dat dicht bij de bodem leeft, maar minder dan in een estuarium verwacht mag worden. De zware organische belasting zorgt ervoor dat de doortrekfunctie van het estuarium voor vissen ernstig wordt belemmerd. Voor wat betreft de kraamkamerfunctie en de kinderkamerfunctie van de Westerschelde wordt vastgesteld dat schorkreken en ondiepwatergebieden een ideale leefomgeving vormen. Er worden uit het Oostwest onderzoek geen conclusies getrokken over de ontwikkeling van deze functies in de tijd.

Lange termijn ontwikkeling

Het is nog niet duidelijk of de Westerschelde op lange termijn aan het verlanden is, of juist zal verdrinken. De afname van de komberging door sedimentatie wordt namelijk gecompenseerd door de versterkte binnendringing van het getij. Eventuele versnelde zeespiegelstijging vormt hierbij een extra complicerende factor. Daarnaast wordt vastgesteld dat de morfologische ontwikkelingen in het oostelijk deel niet meer natuurlijk zijn. De Westerschelde is haar onvoorspelbaarheid in dit deel kwijt door afname van de grootschalige dynamiek. Hierdoor is het morfologisch patroon verstard. Het gevolg hiervan is weer dat de achteruitgang van bepaalde ecotopen blijvend van aard is. Toch kan nog niet worden geconcludeerd dat hiermee ook het gehele ecosysteem achteruit gaat. Wel wordt aangenomen dat de ruimte voor hogere organismen om zich aan te passen aan verdere verstarring is afgenomen. Overigens is op basis van deze conclusies van de Oostwest studie het stortbeleid aangepast. Tegenwoordig wordt minder baggerspecie in het oostelijk deel gestort. De verwachting is dat als gevolg van deze beleidsaanpassing weer meer natuurlijke ontwikkelingen kunnen plaatsvinden in het oostelijke deel van de Westerschelde.

2.2.2 Kwaliteitstoets Oostwest studie

Na afronding van het grootste deel van de deelstudies die voor het Oostwest project zijn uitgevoerd, maar nog voor de publicatie van het eindrapport van dit project, zijn de belangrijkste resultaten van deze studies beoordeeld door een commissie van externe experts (WL, 1996). De commissie concludeerde dat het onderzoek op een zeer aansprekende manier is aangepakt en dat de juiste onderwerpen zijn onderzocht op een pragmatische manier. Geconcludeerd werd dat onderdelen van het uitgevoerde werk behoren tot pionierswerk. Naast dit over het algemeen positieve oordeel over de aanpak en de resultaten van de studie werden ook een aantal aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek. Deze aanbevelingen kunnen als volgt worden samengevat.

In de eerste plaats werd geconstateerd dat niet altijd is gekeken naar de meest recente ontwikkelingen met betrekking tot de kennis van estuariene processen. Zo is onvoldoende gebruik gemaakt van recente literatuur en van externe deskundigheid. Ook wordt aanbevolen om bij vervolgonderzoek dichter aan te sluiten bij onderzoek dat in EU-verband of in LWI kader wordt uitgevoerd, zoals de projecten ECOFLAT, INTRMUD en BEON Micro-Macro. Daarnaast wordt aanbevolen de vergelijkingen met andere estuaria in Europa verder uit te werken. De commissie stelde verder vast dat veel vaststellingen of beweringen eerder kwalitatief en/of speculatief zijn dan kwantitatief. Er is met de Oostwest studies veel waardevolle data verzameld, maar er is nauwelijks theoretische kennis bijgekomen. De

analyses zijn meer op verschijnselen en waarnemingen gericht dan op processen en mechanismen. Het gebruik van empirische relaties is een effectieve en pragmatische manier van werken, maar zou wel aangevuld en onderbouwd moeten worden door het gebruik van meer geavanceerde mathematisch-fysische modellen. Hiermee zou meer kwantitatief inzicht verkregen kunnen worden in bepaalde morfologische processen.

Meer specifiek wordt aanbevolen op een aantal terreinen meer onderzoek te verrichten. Aangegeven wordt dat de morfologische voorspellingen te veel zijn geconcentreerd op de geulen alleen, zonder rekening te houden met uitwisselingsprocessen tussen platen en geulen. De sedimentuitwisseling tussen platen en geulen en de daarmee samenhangende regulerende mechanismen moeten beter worden onderzocht alvorens verantwoorde lange-termijn voorspellingen mogelijk zijn. Ook wordt aanbevolen meer theoretisch en modelonderzoek uit te voeren naar de vorming en het gedrag van drempels, gezien de grote hoeveelheden baggerwerk die juist hier worden uitgevoerd. De mechanismen die leiden tot netto import van sediment in het estuarium moeten beter worden bestudeerd om lange-termijn voorspellingen te kunnen doen, aangezien de netto sediment-import via de monding niet verwaarloosbaar is ten opzichte van de interne herverdelingsstromen. Ook het optreden en de rol van overgangprocessen op middellange termijn (sedimentatie- en erosiegolven die zich door het estuarium verplaatsen) heeft nog onvoldoende aandacht gekregen. Voor het ecosysteem is de bodemsamenstelling van zeer groot belang. De ruimtelijke verdeling van slib en zand kan echter nog niet afdoende worden verklaard of voorspeld. Aanbevolen wordt hiernaar uitgebreide studie te doen. Daarnaast is nog onbekend wat de gevolgen zijn van veranderingen in de morfologie van de platen, zoals de plaathoogte, voor het fourageergedrag van vissen en garnalen. Aanvullend onderzoek naar lokale processen is hiervoor nodig.

Opgemerkt moet worden dat sinds de afronding van de kwaliteitstoets inmiddels enig werk op bovenstaande terreinen is verricht. Zo is uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar het gedrag van drempels (Verbeek *et al.*, 1998). Ook is de relatie tussen lokale fysische processen en het voorkomen en gedrag van dieren onderzocht in een aantal projecten (in EU-verband en LWI-kader).

2.3 Overig recent uitgevoerd onderzoek

Morfologie en processen in estuaria: stand van zaken en benodigd onderzoek

In de periode 1995 - 1997 is door een groep Britse onderzoeksinstituten, in opdracht van een aantal Britse overheidsinstellingen, een uitgebreid onderzoek uitgevoerd met als doel het vaststellen van onderzoeksbehoeften op het gebied van grootschalige, lange termijn ontwikkelingen in estuariene omgevingen. De studie bestond uit drie delen: een uitgebreid literatuuronderzoek, een onderzoek naar de wensen van gebruikers van eventueel te ontwikkelen instrumenten en het opstellen van een onderzoeksprogramma. De resultaten van de studie zijn samengevat in een tweetal rapporten (HR Wallingford, 1997 a & b). Het eerste rapport bevat tevens een zeer uitgebreide literatuurlijst.

Het literatuuronderzoek richtte zich op de kennis over de verschillende fysische processen die invloed hebben op de ontwikkeling van estuaria. Ook werd gekeken naar de

verschillende instrumenten die beschikbaar zijn voor de voorspelling van grootschalige en lange-termijn ontwikkelingen in estuaria. Gebleken is dat het inmiddels mogelijk is een groot aantal korte-termijn processen met voldoende nauwkeurigheid te beschrijven. Ook bleek dat met de huidige stand van de kennis er grote onzekerheden zijn verbonden aan het voorspellen van de lange-termijn ontwikkeling van estuaria onder invloed van natuurlijke en menselijke invloeden. Ook de terugkoppeling tussen ecologische en chemische processen en de morfologie van estuaria en de terugkoppeling tussen morfologische ontwikkelingen en waterkwaliteit is nog niet voldoende onderzocht. Geconcludeerd werd dat deze kennistekorten het beheer van estuaria ernstig hinderen.

Het onderzoek naar de wensen van toekomstige gebruikers van de eventueel te ontwikkelen instrumenten bestond uit een enquête onder een groot aantal onderzoekers en beheerders van estuaria (waaronder een drietal medewerkers van Rijkswaterstaat en WL). Opvallend was dat de belangrijkste wensen voor verbetering van voorspellingsmethoden voortkomen uit wettelijke verplichtingen om de effecten van ingrepen over een langere termijn te kunnen voorspellen. Ook werd het belang van betere verspreiding van kennis en instrumenten en meer contact tussen verschillende gebruikers van estuaria onderstreept. Veel gebruikers wezen erop dat voor de ontwikkeling van goede instrumenten meer veldgegevens en een beter inzicht in fysische processen noodzakelijk zijn.

Het onderzoeksplan benadrukt het belang van estuariene omgevingen, ook vanuit economisch oogpunt. Daarnaast wordt aangegeven hoezeer estuaria vandaag de dag onder druk staan van vele, vaak tegenstrijdige belangen. Geconcludeerd wordt dat beheerders met het huidige instrumentarium nog niet in staat zijn goede afwegingen te maken tussen de verschillende belangen. Voorgesteld wordt om bestaande en nog te ontwikkelen voorspellingsinstrumenten te integreren in een Estuary Impact Assessment System voor de analyse van de gevolgen van voorgestelde ontwikkelingen. Aspecten die hiermee kunnen worden beoordeeld zijn de gevolgen van die ontwikkelingen voor de veiligheid tegen overstromen, de scheepvaart, de waterkwaliteit en voor natuurbescherming. Wanneer dit systeem verder wordt uitgebreid met sociale, economische en juridische aspecten, ontstaat een Estuary Management System dat kan worden gebruikt bij het dagelijkse beheer van estuaria. Geadviseerd wordt om bij de ontwikkeling van dergelijke instrumenten de traditionele 'bottom-up' benadering met behulp van proceskennis te combineren met meer 'top-down' methoden als systeemanalyse en grootschalige, empirische modellering. Combinatie van beide benaderingen in hybride modellen en betere integratie van kennis op het gebied van morfologie, waterkwaliteit en ecologie kan de gewenste stap vooruit naar operationeel inzetbare beheersinstrumenten bewerkstelligen.

Moran onderzoek

In de jaren '80 werd het in Duitsland het eerste Moran (Morfologische Analysen Nordseeküste) onderzoek uitgevoerd. Doel van dit onderzoek was het beschrijven en analyseren van de morfologische ontwikkelingen in het Duitse Waddengebied. Een belangrijk resultaat van dit onderzoek was het definiëren van enige parameters om de morfologische dynamiek van het Waddengebied te beschrijven. In 1988 werd het vervolgonderzoek Moran 2 opgestart. In dit onderzoek worden de resultaten van het eerste onderzoek verbreed naar andere delen van het Waddengebied en worden de ontwikkelde

morfologische parameters gecorreleerd met hydrodynamische parameters. De resultaten van de genoemde onderzoeken zijn gepubliceerd door Hofstede (1991).

Beon onderzoek

In het BEON onderzoeksproject Micro-Macro is onderzoek afgerond naar de relatie tussen fysische parameters en de verspreiding van macro-benthos in een intergetijdegebied. Met behulp van een numeriek waterbewegings- en sedimenttransportmodel werd de relatie tussen de bodemschuifspanning en het voorkomen van benthos onderzocht. Tevens werd de relatie tussen de bodemschuifspanning en het slibgehalte van de bodem (als belangrijke randvoorwaarde voor het voorkomen van macro-benthos) op een intergetijdegebied onderzocht.

Intrmud onderzoek

Ook in het EU/Mast project INTRMUD wordt de relatie tussen fysische en biologische kenmerken van intergetijdegebieden onderzocht. Een belangrijk doel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een classificatiesysteem voor slibrijke intergetijdegebieden, gebaseerd op zo eenvoudig mogelijke veldwaarnemingen. Uiteindelijk moet dit leiden tot een kwalitatief model waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan over de reactie van slibrijke intergetijdegebieden op veranderingen in fysische randvoorwaarden als de getijslag, golfenergie of de beschikbaarheid van slib.

Ecoflat onderzoek

Intergetijdegebieden zijn zeer belangrijke componenten van macro- en meso-getijd estuaria. Het zijn complexe morfologische eenheden, die worden gevormd door de hydrodynamische condities in een estuarium. Een intergetijdegebied bestaat daarnaast uit een reeks verschillende habitats, variërend van megaribbels tot uitgebreide slibvlakten. Geconstateerd wordt dat er een groot verschil bestaat tussen de lage schaalniveaus waarop de belangrijkste processen spelen (voornamelijk microschaal) en het hoge schaalniveau waarop de milieuproblemen door de beheerder van een intergetijdegebied worden herkend (voornamelijk macroschaal). In het Ecoflat onderzoek wordt op multidisciplinaire wijze de omzetting van koolstof en nutriënten door een intergetijde-ecosysteem, en de uitwisseling van deze stoffen tussen het intergetijdegebied en het estuarium bestudeerd. Het doel hiervan is te komen tot voorspellende mathematische modellen die deze processen beschrijven en relateren aan de belangrijkste aandrijvende krachten die op het intergetijdegebied inwerken. Op deze manier kan het verschil tussen de schaal waarop de processen werkzaam zijn en de schaal waarin de beheerder voornamelijk is geïnteresseerd worden verkleind. Voor het onderzoek wordt een groot aantal metingen uitgevoerd, waarbij naast elkaar zowel morfologische parameters (zoals erosie en sedimentatie), ecologische parameters (zoals primaire produktie, mineralisatie) als waterkwaliteitsparameters (zoals zuurstofprofielen, pH, redox potentiaal) worden gemeten. Getracht wordt om met een combinatie van hydrodynamische modellen en ecologische modellen te komen tot voorspellingen van de ruimtelijke en temporele spreiding van macrobenthos in een estuarium. De Westerschelde zal hierbij als proeflokatie worden gebruikt.

LWI Westerschelde

In het kader van het LWI project Westerschelde is door WL de afgelopen jaren gewerkt aan de realisatie van de Ecomorfologische module. Met behulp van deze module kunnen de lange termijn gevolgen van morfologische ingrepen op het functioneren van het estuariene ecosysteem worden bepaald. Hiertoe worden veranderingen in de morfologie van het estuarium vertaald in ruimtelijke veranderingen van het slibgehalte in de bodem en veranderde ligging van platen en geulen. Deze veranderingen hebben gevolgen voor de arealen aan geschikte leefomgevingen voor verschillende bodemdieren. Hierdoor wordt het ecologisch functioneren van het systeem gewijzigd. Belangrijk vernieuwend aspect van dit onderzoek betreft de koppeling tussen de 1D hydrodynamische en morfologische modellering en ecologische parameters als de geschiktheid van een bepaalde lokatie voor een bepaalde soort en, uiteindelijk, de hoeveelheid aanwezige biomassa van iedere soort. Opgemerkt wordt dat deze relatie in de Ecomorfologische module voor een groot deel is gebaseerd op semi-empirische vergelijkingen.

De Ecomorfologische module is een onderdeel van het Estuarine Decision Support System, dat wordt ontwikkeld in het kader van het LWI project estuaria. Andere modules van dit systeem zijn de Baggerassessment module en de Socio-economische module. Deze zijn echter voor het huidige onderzoek minder relevant.

2.4 Literatuur

In het kader van deze definitiestudie is een literatuurscan uitgevoerd. Dit betreft geen uitgebreide literatuurstudie maar zoekopdracht bij een paar bibliotheken en het expertteam. Het doel van de literatuurscan is het aangeven van de recente ontwikkelingen op het gebied van morfodynamica van estuaria, om er voor te zorgen dat eventuele belangrijke ontwikkelingen elders in de wereld niet over het hoofd worden gezien. De scan heeft een lijst van relevante literatuur opgeleverd, zie bijlage A.

Een opvallend kenmerk van de meest recente ontwikkelingen op het gebied van morfodynamica is het toepassen van geïdealiseerde modellen. Deze werden in eerste instantie toegepast voor riviermorfologie. In een relatief korte periode is daarna een groot aantal toepassingen op het gebied van rivier-, kust- en estuariene morfologie gepubliceerd. Dit type modellen heeft een aantal kenmerken. Ten eerste zijn deze modellen altijd bedoeld om een bepaald verschijnsel te verklaren, maar zijn ze minder geschikt om een realistisch geval zo gedetailleerd mogelijk weer te geven. Mede om deze reden worden altijd sterke schematisaties gehanteerd. Ten tweede wordt altijd geprobeerd het te verklaren verschijnsel te isoleren, door gerichte schematisatie en het doen van bepaalde aannames. Ten derde zijn alle geïdealiseerde modellen analytisch van aard. Vooral lineaire en niet-lineaire stabiliteitsanalyse wordt toegepast. Geconstateerd wordt dat toepassing van dit type modellen op estuariene morfologie is achtergebleven ten opzichte van toepassingen op het gebied van rivier- en kustmorfologie. Potentieel biedt dit type modellen zeker ook vele mogelijkheden voor de estuariene morfologie. Grote problemen bij de toepassing van conventionele modellen, zoals het voorspellen van verandering van het aantal geulen, zal met geïdealiseerde modellen wellicht beter opgelost kunnen worden. De combinatie van geïdealiseerde modellen met bestaande procesmodellen kan vele mogelijkheden bieden.

Uit de literatuurscan is ook gebleken dat nog niet veel pogingen zijn ondernomen om morfologische dynamiek goed te omschrijven en te kwantificeren met behulp van indicatoren. Dit is gebleken uit het feit dat weinig literatuur over dit onderwerp werd gevonden. De enige bestaande literatuur op dit gebied, naast het werk van Sijmensen (1997), betreft een Duitse studie naar de morfodynamiek van de Duitse bocht (Hofstede, 1991). Interessant aan deze studie is dat er diverse indicatoren voor morfologische dynamiek zijn ontwikkeld en gehanteerd. Op het eerste gezicht lijkt de gehanteerde methode veel op de methode van Sijmensen. Beiden gebruiken bodemniveauperanderingen als basisparameter. Deze veranderingen worden in absolute zin afgeleid uit peilingen op verschillende tijdstippen. Sijmensen leidt met behulp hiervan bodemveranderingssnelheden af voor een relatief groot gebied, als indicator voor de morfologische dynamiek in het gebied. Hofstede maakt een veel fijnere indeling in het gebied. Bovendien leidt hij per deelgebied twee parameters af, de zogenaamde verzadigingswaarde van de bodemniveauperandering en een tijdschaal. Hij constateert dat de bodemniveauperandering in absolute zin voor een deelgebied tussen twee tijdstippen vaak door de volgende functie kan worden beschreven:

$$\Delta H = \Delta H_m \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}} \right)$$

Hierin ΔH_m is de verzadigingswaarde en is T de tijdschaal, beide een indicator voor de morfologische dynamiek van het deelgebied. Als deze constatering ook voor de Westerschelde geldt zal de door Sijmensen gedefinieerde indicator $\Delta H/\Delta t$ evenredig worden aan $1/\Delta t$ voor grote waarden van Δt . Dit is niet geverifieerd. Wel werd door Sijmensen geconcludeerd dat de door hem gedefinieerde indicator afneemt met het gehanteerde tijdsinterval, wat betekent dat de tendens wel klopt. Verder wordt door Hofstede de parameter $\Delta H_m/T$, met dimensie lengte per tijd, gedefinieerd als een algemene indicator voor morfologische dynamiek. Ook wordt beweerd dat deze parameter met het lokale hydrodynamische energieniveau kan worden gecorreleerd. Hofstede gaat nog een stap verder door iso-lijnen van deze indicator over het gehele onderzoeksgebied te tekenen om daarmee het gebied in eenheden met dezelfde morfologische dynamiek te verdelen. Het verdient de aanbeveling deze aanpak ook een keer toe te passen op de beschikbare gegevens van de Westerschelde. Daarbij moet wel bedacht worden dat deze methode naar verwachting alleen geschikt is voor de beschrijving van (de ruimtelijke variatie in) morfologische dynamiek. Modelleren (voorspellen) van morfologische dynamiek aan de hand van een dergelijk eenvoudig model is niet mogelijk.

Naast deze ontwikkelingen op het gebied van de proceskennis is er ook een duidelijke trend waarneembaar naar integratie van kennis op diverse terreinen die voor de beheerders van estuaria van belang zijn: waterbeweging, morfologie, ecologie en waterkwaliteit. In diverse onderzoeken wordt gewerkt aan eerste pogingen tot integrale modellering. Het onderzoeksprogramma dat werd gedefinieerd door de Britse overheid gaat hierin verder: het ontwikkelen van een Estuary Impact Assessment System en een Estuary Management System wordt gezien als een op middellange termijn haalbaar doel, waar door middel van recente aanbestedingen inmiddels al hard aan gewerkt wordt.

2.5 Kennistekorten

Aan de hand van de hier gepresenteerde inventarisatie van voorafgaand en lopend onderzoek en een korte literatuurscan, worden de volgende relevante kennistekorten geconstateerd (de nummers verwijzen naar het onderzoeksplan dat wordt gepresenteerd in hoofdstuk 6):

- Effecten van ingrepen worden niet voldoende onderscheiden van de autonome ontwikkelingen. Met behulp van een grote hoeveelheid data is onder andere in de Oostwest studie een goed beeld gegeven van de morfologische ontwikkelingen in de laatste decennia. Het is echter onvoldoende duidelijk geworden welke van deze ontwikkelingen aan menselijke ingrepen toe te schrijven zijn. (2-1)
- De relatie tussen morfologische dynamiek en bepaalde beheersaspecten is niet duidelijk. Er is over het algemeen weinig informatie te vinden over de invloed van veranderingen in de morfologische dynamiek op de veiligheid, waterkwaliteit, bodemkwaliteit en de ecologie van de Westerschelde of estuaria in het algemeen. (2-2)
- De lange-termijn grootschalige ontwikkeling van de Westerschelde is onvoldoende bekend. Dit blijkt onder meer uit de grote onzekerheid in de opgestelde zandbalans. Ondanks de grote hoeveelheid data bleek het moeilijk om een uitspraak te doen over import en export van sediment door de monding van het estuarium. (2-3)
- Er is over het algemeen weinig ervaring met het gebruik van indicatoren voor de beschrijving van morfologische dynamiek. (2-4)
- Er is onvoldoende kwantitatief inzicht in morfologische processen en mechanismen die werkzaam zijn in estuaria als de Westerschelde. De voorgaande studies hebben vooral kennis op fenomenologisch niveau opgedaan. Kennis op proces- en mechanismenniveau is vooral kwalitatief. (2-5)

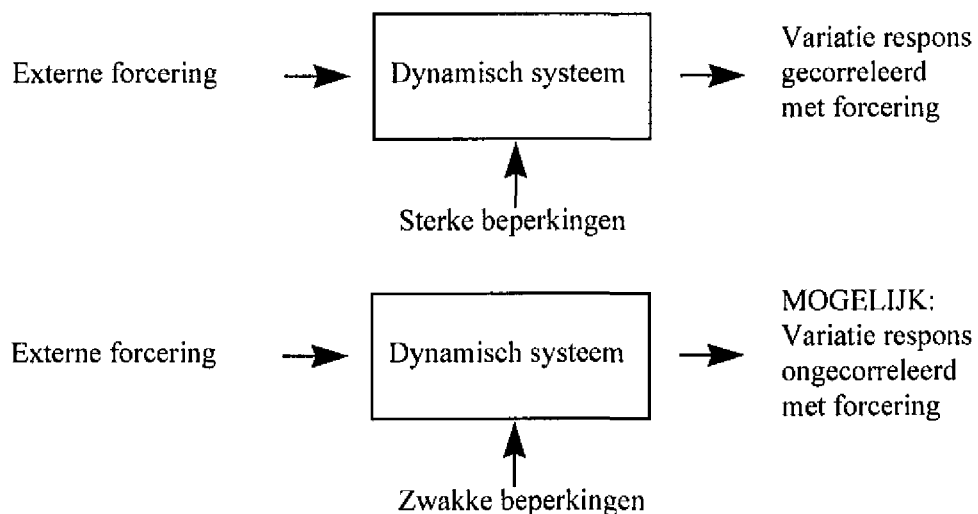
3 Kennis van en inzichten in morfologische dynamiek

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een conceptueel model voor de morfologische dynamiek van estuaria in het algemeen en de Westerschelde in het bijzonder gepresenteerd. Uitgaande van het fysische systeem en de situatie in de Westerschelde wordt eerst het morfodynamische systeem van de Westerschelde beschreven. Daarna worden de relaties tussen de verschillende onderdelen van het systeem nader geanalyseerd. Ook wordt een overzicht gegeven van de kennis die beschikbaar is over de processen die werkzaam zijn op de verschillende te onderscheiden schaalniveaus. Op basis van het opgestelde model is verder gekeken naar de effecten van ingrepen.

3.2 Conceptueel model morfologische dynamiek van estuaria

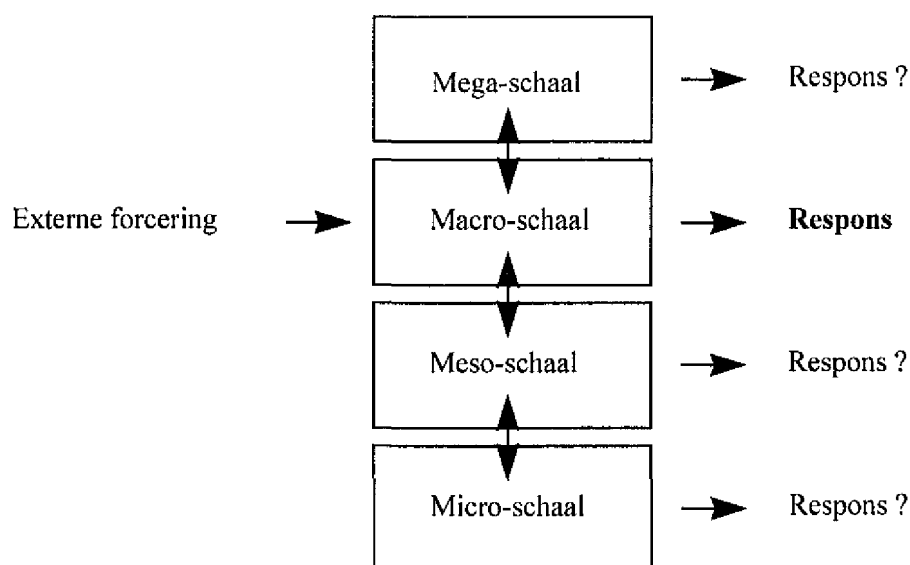
In het algemeen geldt dat het gedrag van een dynamisch systeem wordt bepaald door aan de ene zijde externe aandrijving en aan de andere zijde de beperkingen die het systeem worden opgelegd (Figuur 3-1). De externe aandrijving kan bestaan uit zowel natuurlijke aandrijving als menselijke ingrepen. Met de beperkingen worden bijvoorbeeld de vastgelegde grenzen van een estuarium bedoeld, in het geval van een estuarien morfodynamisch systeem. Wanneer de beperkingen zwak zijn, kan het systeem vrij gedrag vertonen. Dat wil zeggen dat er zich morfologische veranderingen kunnen voordoen die niet kunnen worden herleid tot variaties in de externe aandrijving. Dit vrije gedrag wordt veroorzaakt door de interne dynamiek van het systeem. Denk hier bijvoorbeeld aan de vorming van bodemribbels, bankvorming bij de kust en op open zee, maar ook aan de vorming van plaat-geul stelsels in estuaria. Beperkingen zijn meestal strijdig met dit vrije gedrag, dus wanneer er sterke beperkingen zijn zal vrij gedrag minder makkelijk optreden. In dat geval overheerst de respons op de externe aandrijving.



Figuur 3-1 Respons van een dynamisch systeem op externe forcering

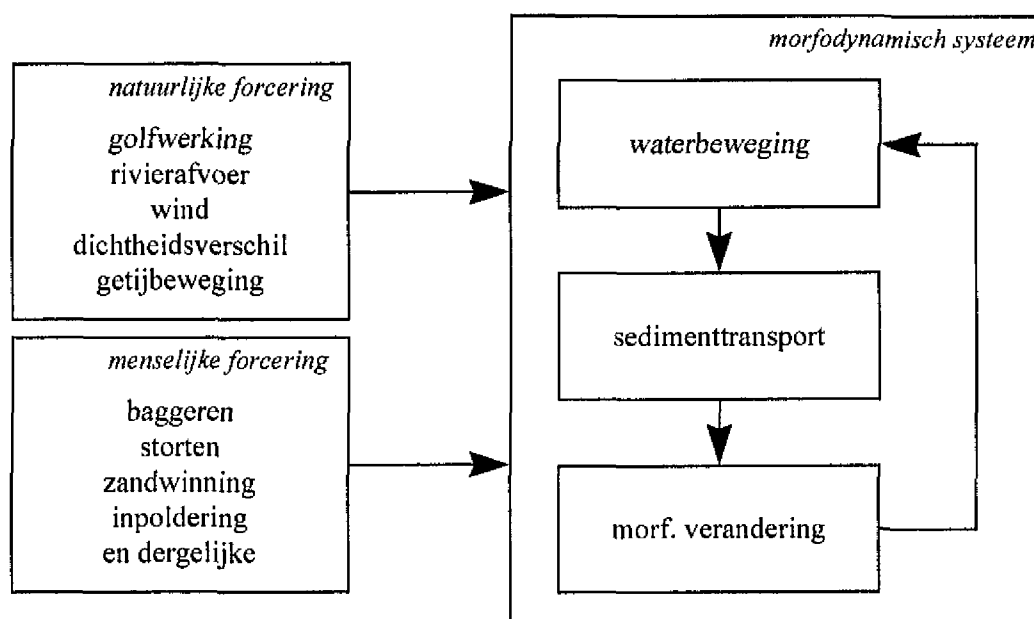
Normaal wordt het gedrag van de Westerschelde beschreven door onderscheid te maken tussen autonome ontwikkeling en effecten van ingrepen. Volgens het huidige conceptuele model is de autonome ontwikkeling de respons op natuurlijke forcering terwijl de effecten van ingrepen gelijk zijn aan de respons op die ingrepen. Het model zegt verder dat of de respons op ingrepen te herkennen is, sterk afhangt van de mate van beperking. Bij zwakke beperkingen vertoont het systeem meer vrij gedrag en is er een zwakke correlatie aanwezig tussen het gedrag van het systeem en de menselijke ingrepen.

Dit algemeen geschetste conceptuele model kan worden toegepast op het morfodynamische systeem van een estuarium als geheel, en het kan worden toegepast voor elk subsysteem binnen dat estuarium. Wanneer het systeem wordt onderverdeeld in vier schaalniveaus, de mega-, macro-, meso- en micro-schaal, kan elk schaalniveau als een dynamisch subsysteem worden beschouwd. Op elke schaal kan in principe externe forcering worden uitgeoefend en op elke schaal kan in principe ook een respons van die forcering worden verwacht. Dit is schematisch weergegeven in figuur 3-2. Van een externe forcering op een bepaald schaalniveau wordt in de eerste instantie een respons van het systeem op hetzelfde schaalniveau verwacht. Maar via de interne wisselwerkingen, de interacties tussen de verschillende schaalniveaus, kan er ook respons van het systeem op andere schaalniveaus ontstaan. De interacties tussen de verschillende schaalniveaus kunnen voor een deel als onderlinge beperkingen worden beschouwd. Zo beïnvloedt de morfodynamische ontwikkeling op megaschaal de beschikbare ruimte voor de ontwikkeling van geulensystemen op macroschaal. Daarmee worden de beperkingen voor de morfologische dynamiek op macroschaal versterkt of verzwakt. Hetzelfde geldt voor de interactie tussen de macroschaal en de meso-schaal. Het geulenpatroon op macroschaal bepaalt de randvoorwaarden voor de ontwikkeling van kortsluitgeulen. De invloed van lagere schaalniveaus op de hogere schaalniveaus gaat meestal via veranderingen van de eigenschappen van het systeem zelf, zoals verandering van de bodemruwheid invloed uitoefent op de waterbeweging, en daarmee op de hogere schaalniveaus. Voor het analyseren van de eigenschappen van het systeem moet gekeken worden naar de fysische processen die binnen het systeem relevant zijn.



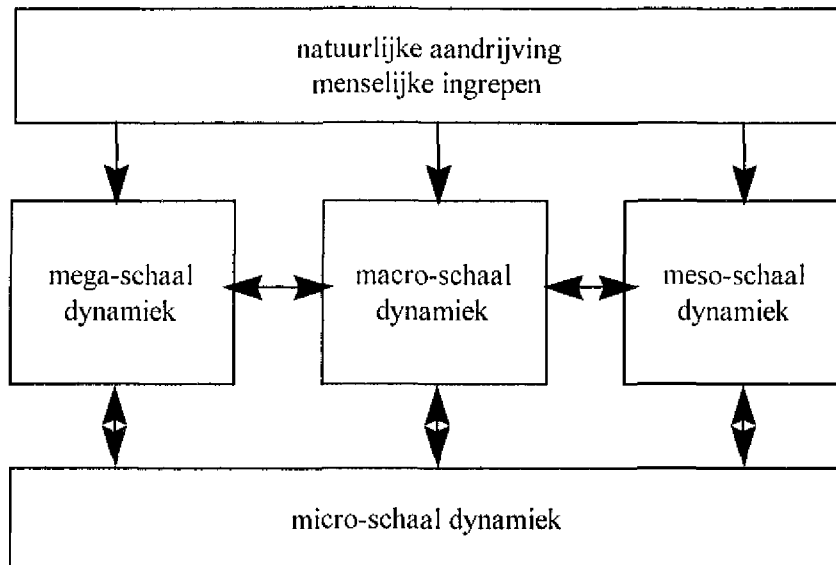
Figuur 3-2 Respons op externe forcering van een dynamisch systeem met verschillende schaalniveaus

Morfologische dynamiek is het resultaat van sedimenttransport als gevolg van de waterbeweging. In een estuarium zoals de Westerschelde wordt de waterbeweging beïnvloed door getijbeweging, golfwerking, wind, bovenstroomse rivierafvoer en dichtheidsverschillen tussen zeewater en rivierwater. Zoals figuur 3-3 aangeeft wordt het systeem naast de natuurlijke aandrijving ook beïnvloed door menselijke ingrepen. Sedimenttransport leidt tot morfologische veranderingen die vervolgens weer de waterbeweging beïnvloeden. Dit geheel van waterbeweging, sedimenttransport en morfologische veranderingen op de verschillende schaalniveaus vormt samen met de interacties tussen de schaalniveaus het morfodynamische systeem.



Figuur 3-3 Morfodynamisch systeem van een estuarium

Om meer inzicht in het systeem te verkrijgen wordt vervolgens gekeken naar de interactie tussen de verschillende vormen van dynamiek op de verschillende schalen. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat er voornamelijk interactie bestaat tussen verschijnselen van naastliggende schalen, bijvoorbeeld tussen megaschaal en macroschaal en tussen macroschaal en meso-schaal. Microschaal dynamiek vormt hierop een uitzondering. De microschaal dynamiek heeft via de bodemruwheid invloed op de waterbeweging en daarmee in principe vergelijkbare invloed op de dynamiek van andere drie schalen. Omgekeerd heeft de morfologische dynamiek op de andere drie schalen invloed op het stromingspatroon en daarmee invloed op de microschaal dynamiek. Deze interactie tussen de verschillende schaalniveaus is geschetst in figuur 3-4.



Figuur 3-4 Interactie tussen de verschillende schaalniveaus van morfologische dynamiek

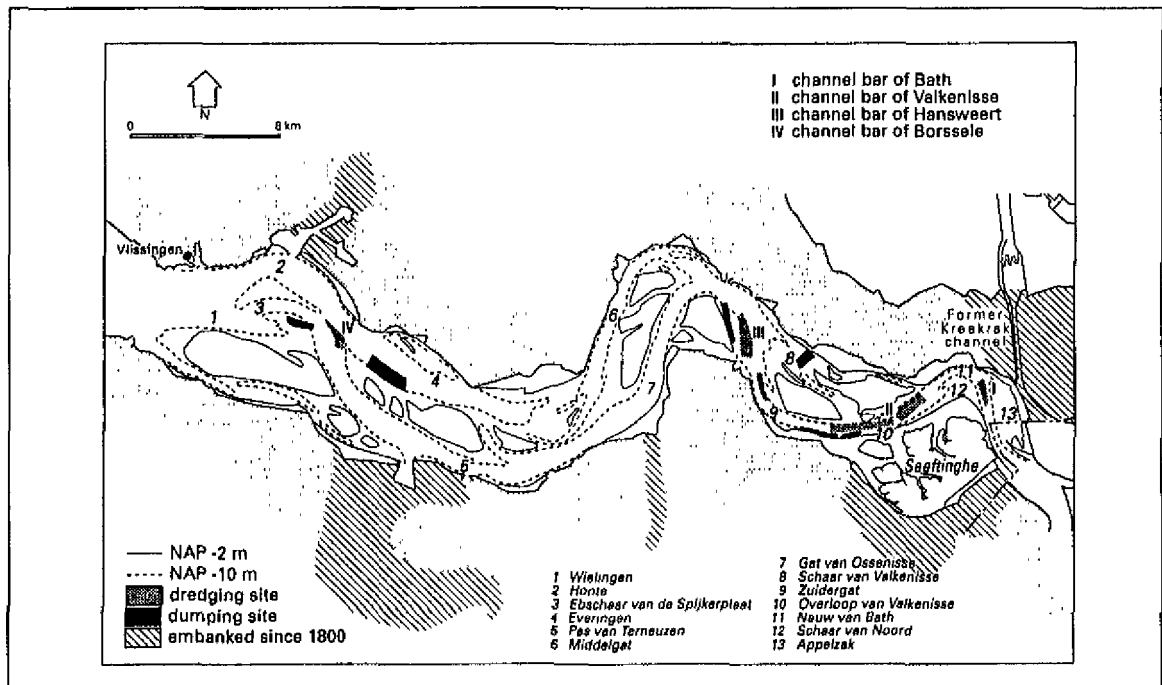
3.3 Morfologische dynamiek Westerschelde

3.3.1 Het morfodynamische systeem Westerschelde

Voor de Westerschelde geldt dat de getijbeweging de belangrijkste aandrijving voor de waterbeweging en het sedimenttransport is. Invloeden van de bovenstroomse afvoer van de Schelde en de daarmee samenhangende dichtheidsstroming spelen een veel minder belangrijke rol. Invloeden van wind en golven beperken zich vooral tot de ondiepere delen zoals de platen en slikken. Zoals in paragraaf 3.2 is uitgelegd speelt het sedimenttransport een centrale rol in het morfodynamische systeem. Daarom zal in het navolgende het morfodynamische systeem van de Westerschelde vanuit het sedimenttransport worden beschreven. Op deze manier zal een conceptueel model voor de morfologische dynamiek van de Westerschelde worden opgesteld.

In een estuarium kan onderscheid worden gemaakt tussen het momentane transport, het ebtransport, het vloedtransport en het resttransport. Het eb- en vloedtransport zijn de integraal van de momentane transporten gedurende respectievelijk de eb- en de vloedperiode. Het resttransport is het netto transport over de hele getijperiode en is dus gelijk aan het verschil tussen het eb- en vloedtransport. Zoals reeds werd vastgesteld, wordt het sedimenttransport in de Westerschelde vooral aangedreven door de getijstroming. Dit heeft tot gevolg dat de grootte van eb- en vloedtransport bijna gelijk zijn. Dit betekent dat de grootte van het resttransport veel kleiner is dan het eb- of vloedtransport. Nog belangrijker is het patroon van het resttransport. Kenmerkend hiervoor zijn de circulatiecellen in het resttransportveld. De belangrijkste circulatiecellen zijn die in de verschillende eb- en vloedgeulenstelsels. Een dergelijk eb- en vloedgeulenstelsel bestaat uit twee parallelle geulen, gescheiden door een plaat of plaatcomplex. Het Nederlandse deel van de Westerschelde kan worden beschouwd als een aaneenschakeling van dergelijke eb- en vloedgeulenstelsels (figuur 3-5). Van bovenstrooms naar benedenstrooms zijn dit achtereenvolgens: het Nauw van Bath - Schaar van Noord, het Zuidergat - Schaar van

Waarde, het Gat van Ossenissee - Middelgat, de Pas van Terneuzen - Everingen en de Honte - Schaar van Spijkerplaat (Van den Berg *et al.*, 1996).



Figuur 3-5 Topografie van de Westerschelde in 1992 (Van den Berg *et al.*, 1996)

Door het resttransport over de geulen te integreren kan dat resttransportveld worden ontbonden in een doorgaande component en circulaties binnen de genoemde eb- en vloedgeulenstelsels. De doorgaande component van het resttransport veroorzaakt morfologische veranderingen op de schaal van het gehele estuarium. De circulerende transporten binnen de geulenstelsels veroorzaken veranderingen op de schaal van deze stelsels. Op dezelfde manier kan het transportveld verder worden ontbonden naar kleinere schalen. Zo veroorzaken de sedimenttransporten over de platen veranderingen in de kortsluitgeulen. De kleinste relevante morfologische schaal is die van beddingvormen. Zo ontstaat een cascade van dynamische systemen, ieder met dynamische veranderingen op een specifieke ruimte- en tijdschaal:

Mega-schaal dynamiek. Veranderingen op schaal van het hele estuarium of van de grootste compartimenten van het estuarium. De bijbehorende tijdschalen zijn eeuwen. De relevante natuurlijke ontwikkelingen en menselijke ingrepen (forcering) zijn zeespiegelrijzing en doorgaande zandwinning.

Macro-schaal dynamiek. Veranderingen op het niveau van hoofd- en nevengeulen, zoals functiewisseling van de geulen. De bijbehorende tijdschalen zijn decennia. De relevante externe forcering bestaat uit verdiepingen, onderhoudsbaggerwerk, storten van baggerspecie, de 18,6 jarig cyclus van getij, en dergelijke.

Meso-schaal dynamiek. Veranderingen zoals het ontstaan, migreren en verdwijnen van kortsluitgeulen, sedimenttransport over de platen, plaat-geul uitwisseling van sediment. De bijbehorende tijdschalen zijn jaren. Relevante externe forcering bestaat uit extreme condities, getijbeweging, baggeren, storten en zandwinning.

Micro-schaal dynamiek. Veranderingen op het niveau van beddingvormen, zoals megaribbels. Bijbehorende tijdschalen zijn dagen. Relevante externe forcering is alleen natuurlijk (getijbeweging).

Opgemerkt wordt dat bovenstaande indeling in schaalniveaus van morfologische dynamiek een schematisatie is. In werkelijkheid is het onderscheid tussen de verschillende schalen niet altijd duidelijk. Toch is een dergelijke schematisatie nuttig voor het analyseren van het systeem.

3.3.2 Nadere analyse van de verschillende schaalniveaus

Macro-schaal circulaties van stroming en sedimenttransport vormen een belangrijk kenmerk van natuurlijke estuaria. Zonder deze circulatie, ofwel de macro-schaal dynamiek, verwordt het estuarium tot een getijrivier. Daarom wordt als hypothese gesteld: *Macro-schaal dynamiek is een noodzakelijke voorwaarde voor het in stand houden van het estuarium. Zonder de meergeulenstelsel zal het estuarium snel gaan verlanden.* Een buitenlands voorbeeld dat deze hypothese ondersteunt is de ontwikkeling van de Seine (Avoine *et al.*, 1981). Empirische relaties wijzen er ook op dat er een verband bestaat tussen de omvang van het totale dwarsprofiel van het estuarium en het aantal geulen in het dwarsprofiel (Allersma, 1992). Deze empirische relaties zijn aan de ene zijde een onderbouwing van de gestelde hypothese, maar aan de andere kant ook een aanwijzing dat een zekere minimum afmeting van het estuarium is vereist voor het behouden van meergeulenstelsels. Geconcludeerd mag worden dat er een interactie bestaat tussen de mega-schaal dynamiek en de macro-schaal dynamiek. Voor de beheerder is het belangrijk om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de dynamiek op deze twee schalen. Met name is de vraag hoe het ene schaalniveau via ingrepen in het andere schaalniveau kan worden beïnvloed interessant.

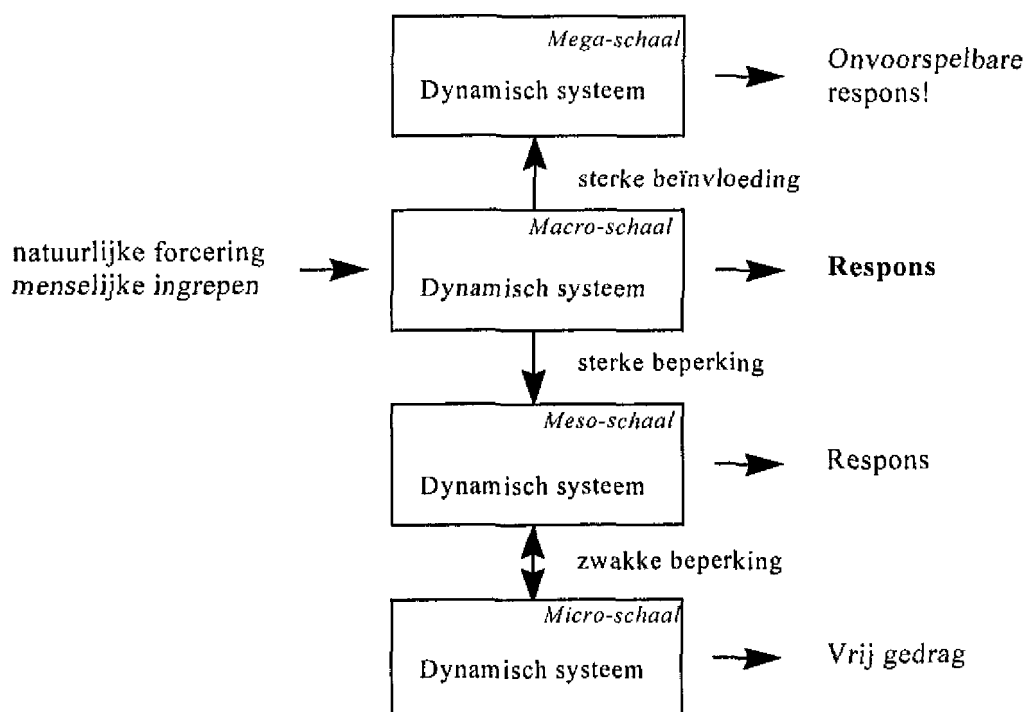
Ook tussen de macro-schaal dynamiek en de meso-schaal dynamiek is sprake van interactie. Het ontstaan, migreren en verdwijnen van kortsluitgeulen wordt als typisch voorbeeld gezien van meso-schaal dynamiek. Maar de kortsluitgeulen kunnen alleen aanwezig zijn als er sprake is van een meergeulenstelsel op macro-schaal. Macro-schaal dynamiek is dus een noodzakelijke voorwaarde voor mesoschaal dynamiek. Verder hangt het gedrag van kortsluitgeulen af van de plaathoogte en de verhouding tussen de hoofdgeul en de nevengeul. De waargenomen afname van activiteiten van kortsluitgeulen in het oostelijke deel van de Westerschelde wordt beschouwd als een gevolg van de verhoging van de platen en de afname van relatieve belangrijkheid van de nevengeulen ten opzichte van de hoofdgeulen. Dat een hogere plaat belemmerend werkt voor de activiteit van de kortsluitgeulen is goed te begrijpen, maar hoe de verhouding hoofd- en nevengeul de activiteiten van de kortsluitgeulen beïnvloedt is nog niet geheel duidelijk.

De activiteiten van kortsluitgeulen (meso-schaal dynamiek) hebben belangrijke invloed op de bodemkwaliteit, waterkwaliteit en ecologie, zoals in het volgende hoofdstuk zal worden uitgelegd. Daarom is het behouden van de meergeulenstelsels van essentieel belang, als noodzakelijke voorwaarde voor het bestaan van kortsluitgeulen. Het is ook belangrijk om een beter inzicht te verkrijgen in de mechanismen die de plaathoogte veranderingen (plaatgeul uitwisseling) bepalen, omdat juist die mechanismen invloed hebben op de activiteiten van de kortsluitgeulen. De kortsluitgeulen hebben omgekeerd invloed op de waterbeweging op macro-schaal en daarmee dus ook invloed op de macro-schaal dynamiek. Maar hoe deze invloed er precies uitziet, is niet bekend.

Een interessant verschijnsel is de interactie tussen de asymmetrie van beddingvormen en de getijcirculatie van water en sediment. Eb- of vloeddominantie leidt tot een asymmetrische vorm van de beddingvormen, waardoor de bodemruwheid voor eb- en vloedstroming verschillend wordt, wat de dominantie weer versterkt. Verder hangen de bodemvormen nauw samen met de bodemsamenstelling. De morfologie van de Westerschelde wordt voornamelijk bepaald door zand.

3.3.3 Effecten van ingrepen en beheersaspecten

De schematisatie van de morfologische dynamiek naar verschillende schalen geeft ook een hulpmiddel voor het analyseren op effecten van ingrepen. Menselijke ingrepen kunnen worden gezien als verstoringen op het natuurlijke systeem. Voor de hand liggend is de aanname dat verstoringen op een bepaalde schaal alleen directe invloed hebben op de morfologische dynamiek op die betreffende schaal. Merk wel op dat een bepaalde ingreep verstoringen op verschillende schalen kan betekenen. Baggeren in de hoofdgeul verstoort de verhouding tussen hoofd- en nevengeul en is dus een verstoring op de macro-schaal dynamiek. Tenzij de gebaggerde specie in hetzelfde geulensysteem wordt gestort betekent het echter ook een verstoring op de mega-schaal. Voor het analyseren van de effecten van een bepaalde ingreep is het belangrijk alle daarmee veroorzaakte verstoringen te onderkennen. Verder is het belangrijk de interacties tussen de verschillende schalen goed te begrijpen. De belangrijkste ingrepen die op dit moment in de Westerschelde plaatsvinden zijn het baggeren, zandwinnen en storten. De belangrijkste invloed die de beheerder via zijn beleid op deze ingreep kan uitoefenen is het vaststellen van de stortlocaties en de hoeveelheden te winnen zand. Dit betekent een ingreep op de macro- en mega-schaal dynamiek. Samen met de natuurlijke forcering van het systeem vormen deze ingrepen de belangrijkste aandrijving van het systeem. Samengevat in het eerder gepresenteerde conceptuele model van de morfologische dynamiek van estuaria ziet één en ander er voor de Westerschelde uit als weergegeven in figuur 3-6.



Figuur 3-6 Ingerep - respons relaties voor het morfodynamische systeem van de Westerschelde

In figuur 3-6 wordt een beperking gezien als een harde grens waarbinnen de processen op een ander (doorgaans lager) schaalniveau zich afspelen. Beïnvloeding is de invloed die processen op een bepaald schaalniveau hebben op processen op een ander (doorgaans hoger) schaalniveau. Zo wordt bijvoorbeeld door baggeren en storten sediment verplaatst binnen het systeem, zodanig dat deze activiteiten vooral voor aandrijving op macro-schaal zorgen. De waargenomen respons van het systeem op macro-schaal bestaat bijvoorbeeld uit de fixatie van de hoofdgeulen en het afgenomen relatieve belang van de nevengeulen. Ook op het meso-schaal niveau is respons waargenomen in de vorm van de afgenomen activiteiten van kortsluitgeulen. Blijkbaar is er een sterke wisselwerking tussen de macro-schaal en de meso-schaal dynamiek, zodanig dat de ontwikkelingen op macro-schaal niveau de processen op meso-schaal niveau beperken. Ook de interactie tussen de macro-schaal en de mega-schaal dynamiek wordt verwacht sterk te zijn. Een sterke aanwijzing hiervoor is de sterke correlatie tussen de omvang van het totale profiel van het estuarium en het aantal geulen daarin (Allersma, 1992). Dat er nog geen directe respons van de mega-schaal is waargenomen op de ingrepen op macro-schaal kan komen door de grote tijdschaal van die respons of door het feit dat de ingrepen tot nu toe nog binnen een bepaalde kritische grens zijn gebleven. Opgemerkt wordt dat het bestaan van parallelle geulen op een subtiel evenwicht of stabiliteit is gebaseerd (RIKZ, 1997 en Dunsbergen & De Gelder, 1998). Dit maakt de macro-schaal dynamiek een kwetsbaar (sub) systeem onder invloed van de bagger- en stortactiviteiten. Wanneer deze ingrepen boven een bepaalde grens zullen komen kan de geulenpatroon op macro-schaal wezenlijk worden beïnvloed. Het is dan de vraag hoe de mega-schaal morfologie hierop reageert. Het is belangrijk dit te onderzoeken omdat een eventuele negatieve respons dan onomkeerbaar kan zijn. De interactie van de micro-schaal dynamiek met de andere schaalniveaus is zwak en kan worden verwacht zwak te blijven. Daarom zal naar verwachting de micro-dynamiek vrij gedrag blijven vertonen.

3.4 Huidige kennis van het morfodynamische systeem

Volgens het conceptuele model dat werd beschreven in de voorgaande paragrafen, wordt de morfodynamische ontwikkeling van de Westerschelde bepaald door de externe forcering (natuurlijk en menselijk) en de eigenschappen van het morfodynamische systeem zelf (zie figuur 3-3). Het ligt dus voor de hand dat kennis van de externe forcering en kennis van het morfodynamische systeem zelf noodzakelijk zijn om inzicht te verkrijgen in de morfodynamische ontwikkelingen (de respons van het systeem). In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken van de huidige kennis van zowel externe forcering als van het morfodynamische systeem. Mede aan de hand van deze inventarisatie kan daarna bepaald worden welke kennistekorten het begrip van het morfodynamische systeem belemmeren.

3.4.1 Huidige kennis van de externe forcering

Bij de externe forcering wordt onderscheid gemaakt tussen natuurlijke forcering en menselijke ingrepen.

In het algemeen bestaat voor estuaria de natuurlijke forcering uit rivierafvoer, getijwerking, zeespiegelrijzing, dichtheidstromingen, wind en (korte) golven. Deze verschillende vormen van aandrijving variëren in de tijd. Deze variatie is deels deterministisch en deels stochastisch. De getijvariatie kan, op de voor de beheerder relevante tijdschalen, als

grotendeels deterministisch worden beschouwd wegens de astronomische oorsprong. Wind en golven kunnen als bijna volledig stochastisch worden beschouwd. Van belang is vooral de onderlinge interactie tussen de verschillende vormen van aandrijving, en de interactie tussen de aandrijving en het morfodynamische systeem. Zo is de dichtheidstroming sterk afhankelijk van de verhouding tussen de rivierafvoer en de omvang van het getijdebiet. Afhankelijk van de gekozen grens van het estuarium kan de getijforcering ook door de morfologische ontwikkeling binnen het estuarium worden beïnvloed. Bij studies naar morfodynamische ontwikkeling moet rekening worden gehouden met onzekerheden in de forceringen. Dit geldt zowel voor toekomstvoorspellingen als voor hind-casting studies, omdat de forcering altijd wordt geschematiseerd (input filtering). Een voor morfologische berekeningen vaak gebruikte input filtering is het definiëren van het zogenaamde morfologische getij. Volgens de definitie is dit het getij dat hetzelfde sedimenttransport veroorzaakt als het lange-termijn gemiddelde transport. Meestal wordt hiervoor een getij tussen het gemiddelde getij en springtij gekozen. De gevolgen van een dergelijke input filtering op korte-termijn ontwikkelingen is vrij goed bestudeerd (Latteux, 1995), maar de gevolgen voor lange-termijn ontwikkelingen zijn minder duidelijk. Het begrip morfologisch getij is analoog aan het begrip dominante afvoer bij riviermorfologie. Inmiddels is geconcludeerd dat met het gebruik van de dominante afvoer nooit alle morfologische karakteristieken goed kunnen worden gerepresenteerd. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat een soortgelijke conclusie ten aanzien van het morfologische getij zou kunnen worden getrokken.

Voor de Westerschelde geldt dat de bovenstroomse rivierafvoer relatief erg klein is. De invloed van deze rivierafvoer op de morfodynamische ontwikkeling van het estuarium is daarom vele malen kleiner dan die van de getijbeweging. Een gevolg hiervan is ook dat het estuarium sterk gemengd is, en dat het effect van dichtheidstroming niet zo belangrijk is. De belangrijkste forcering voor het sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling in de Westerschelde is getijstroming. Wind en golven hebben daarnaast ook bepaalde invloed, maar die beperkt zich tot de ondiepe delen zoals de platen en slikken. De getijforcering kan als grotendeels deterministisch worden beschouwd, dankzij de astronomische oorsprong. Wel is vastgesteld dat de getijwerking mede afhankelijk is van het zeespiegelniveau (Svašek, 1998). In de afgelopen eeuwen is een systematische toename van de getijslag geconstateerd (van ongeveer 4% per eeuw). In dezelfde periode is de zeespiegel met ongeveer 20 centimeter per eeuw gestegen. De getijslagtoename is niet een gevolg van de zeespiegelrijzing alleen. Ook de verdieping van de geulen binnen het estuarium heeft een belangrijke bijdrage geleverd. Gezien de onzekerheid van de zeespiegelrijzing in de toekomst en gezien het feit dat de vaargeulen in het estuarium verder worden verdiept moet bij de studie van de morfologische dynamiek rekening worden gehouden met verder veranderende getijforcering.

Door de gunstige geografische ligging op de grens van rivier en zee, zijn estuaria van groot belang voor de mensheid. Om deze reden vinden er veel ingrepen plaats in estuaria. Voor de Westerschelde zijn de belangrijke menselijke ingrepen: vaargeulbeheer (baggeren, storten, reguleringswerk zoals strekdammen), inpoldering / ontpoldering, oeververdediging en zandwinning. In nog sterkere mate dan bij de natuurlijke forcering is er bij de menselijke forcering sprake van terugkoppeling tussen de forcering en de morfologische ontwikkeling. Zo wordt de baggerhoeveelheid voor het vaargeulbeheer volledig bepaald door de morfologische ontwikkeling. De werkelijk onafhankelijke grootheden die de menselijke ingrepen karakteriseren zijn de dimensies van de vaargeul en de stortlocaties. Toch

gebruiken alle bestaande morfologische modellen voor de Westerschelde de bagger- en storthoeveelheden als invoergegevens. Deze gegevens worden geschat aan de hand van extrapolaties van gegevens uit het verleden. Dit vormt een zwakke schakel, die de voorspellende waarde van de modellen sterk vermindert. Aangezien het vaargeulbeheer als de belangrijkste menselijke ingreep in het morfodynamische systeem van de Westerschelde wordt gezien, verdient het aanbeveling aandacht te besteden aan de koppeling tussen de baggerhoeveelheden en de morfologische ontwikkeling in de modellen. Belangrijke vraag hierbij is bijvoorbeeld de vraag hoe de hoeveelheid baggerwerk wordt beïnvloed door het nieuwe stortbeleid (verder naar het westen brengen van de baggerspecie).

3.4.2 Huidige kennis van morfodynamische processen

Morfologische ontwikkeling is een gevolg van de interactie tussen het water en de bodem. De belangrijkste processen zijn waterbeweging en sediment transport (figuur 3-3). Zowel op het gebied van waterbeweging als op het gebied van het sedimenttransport is voldoende algemene kennis beschikbaar. Ontwikkeling van basiskennis van deze processen zal daarom geen deel uitmaken van de huidige studievoorstellen. Het is wel belangrijk om vast te stellen dat proces-gebaseerde modellering van morfologische ontwikkeling in getijgebieden zoals estuaria ver is achtergebleven bij modellering van riviermorfologische processen. Eén van de redenen hiervoor is de in getijdegebieden aanwezige terugkoppeling tussen de morfologie en de getijforcering, in tegenstelling tot het geval van rivieren. De omvang van het intergetijdegebied bepaalt de komberging en daarmee het getijvolume en dus de stroomsterkte. Een andere reden is de complexiteit van de processen in de getijgebieden. Er is een aantal kenmerkende processen en mechanismen werkzaam die de getijgebieden zoals estuaria bijzonder maken in vergelijking met andere watersystemen. Deze processen en mechanismen verdienen zeker de aandacht in de huidige studie.

Getijbeweging veroorzaakt een sterk niet-stationaire stroming en introduceert een extra tijdschaal (de getijperiode) in het systeem. De morfologische veranderingen worden bepaald door het netto transport, een relatief klein verschil tussen het eb- en het vloedtransport. Dit kleine verschil kan gevoelig zijn voor op het eerste gezicht minder belangrijke processen, zoals:

- De hogere harmonische componenten van de getijbeweging. De waterniveau variaties worden hoofdzakelijk bepaald door de hoofdcomponenten van het getij, zoals M2. Het netto-transport wordt echter in sterke mate bepaald door de getijasymmetrie, die weer bepaald wordt door de hogere harmonische componenten van het getij zoals M4, die meestal een orde kleiner zijn dan de hoofdcomponenten.
- De secundaire stroming in de dwarsrichting. Door de kromming van de stroomlijnen en door de Coriolis versnelling ontstaat spiraalstroming. Deze secundaire stroming, die veel kleiner is dan de hoofdstroming, kan een grote bijdrage leveren aan het netto-transport. Over de secundaire stroming in de dwarsrichting en de effect daarvan op de morfologie is er veel kennis ontwikkeld voor rivieren. Er is ook al enige ervaring met toepassingen van deze kennis voor getijgebieden, zie onder andere de ervaringen van Jeuken (pers. comm.).
- De secundaire stroming in de langsrichting. Ook in de richting van de hoofdstroming kan sprake zijn van secundaire stroming, afhankelijk van de vorm van het snelheidsprofiel in de vertikaal. Immers, een versnellende stroming heeft een ander

snelheidsprofiel dan een vertragende stroming. Dit verschil kan bijvoorbeeld een helling-opwaarts netto transport veroorzaken. Dit proces kan onder andere van belang zijn voor de plaat-geul uitwisseling en voor drempelvorming. Over secundaire stroming in langsrichting is relatief weinig bekend. Hier kan niet meer worden teruggevallen op de ervaringen bij riviermorphologie, omdat het daar een veel minder belangrijke rol speelt. Dit is een typisch probleem voor getijgebieden en verdient dus aandacht in de huidige studie.

- De over- en onderverzadiging met sediment. Voor zwevend transport geldt dat het werkelijke transport niet altijd gelijk is aan de transportcapaciteit, omdat het concentratieprofiel tijd nodig heeft om zich aan te passen aan veranderende omstandigheden (het relaxatie effect). Dit heeft tot gevolg dat een versnellende stroming onderverzadigd is en een vertragende stroming oververzadigd. Dit is onder andere in de baggergebieden een belangrijk sedimentatie veroorzakend mechanisme. Overigens wordt onder- en oververzadiging van zwevend transport in principe goed begrepen, en er is voldoende basis kennis over dit proces voorhanden.

Verder is het relatief kleine netto-transport ook extra gevoelig voor ingrepen. Dit alles maakt dat voor morfodynamische modellering in getijgebieden andere eisen aan de waterbeweging en sedimenttransport modellering moeten worden gesteld dan bij riviertoepassingen.

3.5 Indicatoren voor morfologische dynamiek

Indien het mogelijk is gebleken morfologische dynamiek van een estuarium op de verschillende schalen te beschrijven, moet het begrip concreet gemaakt worden met behulp van indicatoren. De te definiëren indicatoren voor de morfologische dynamiek op een bepaald moment moeten voldoen aan een tweetal eisen. In de eerste plaats dienen de indicatoren kwantitatief te bepalen te zijn. Dat wil zeggen dat het mogelijk moet zijn er een absoluut of relatief getal aan toe te kennen. In de tweede plaats moeten de waarden van de indicatoren objectief en eenduidig zijn vast te stellen uit velddata en/of uit modelresultaten. Verder is het wenselijk dat de diverse indicatoren de effecten van ingrepen duidelijk weergeven en dat de waarden van de indicatoren een duidelijk verband hebben met de vier aspecten waterkwaliteit, bodemkwaliteit, ecologie en veiligheid tegen overstromen.

3.5.1 Mogelijke indicatoren:

1. De gemiddelde bodemniveau veranderingen zoals gedefinieerd door Sijm (1997).
$$\text{Dynamiekgetal} = (\text{erosievolume} + \text{sedimentatievolume}) / (\text{gebiedsoppervlakte} * \text{tijdverschil})$$

Dit getal heeft de dimensie $[LT^{-1}]$ en fysisch betekent het de gemiddelde bodemniveau-veranderingssnelheid. Sijm heeft het getal bepaald voor de zes lodingsvakken en voor verschillende tijdsintervallen. Hij constateert dat het dynamiekgetal afneemt naarmate het gehanteerde tijdverschil groter wordt. Hij constateert ook dat het dynamiek getal in het oostelijke deel van Westerschelde is afgenomen.
2. Frequentie van functie-wisseling van de geulen. Functie-wisseling tussen hoofdgeul en nevengeul wordt als een belangrijk kenmerk van morfologische dynamiek op macroschaal beschouwd. Daarom wordt als indicator voorgesteld het aantal keren per

tijdseenheid dat een dergelijke functiewisseling plaatsvindt. Dit kan voor zowel het hele estuarium als voor een bepaald geul-plaat systeem worden gedefinieerd. Beperking: het tijdsinterval dat voor deze indicator wordt gebruikt moet relatief groot zijn ten opzichte van de morfologische tijdschaal behorend bij macro-schaal ontwikkeling.

3. Het aantal kortsluitgeulen per hoofdgeul-nevengeul-plaat systeem. Als één van de indicaties dat de ingrepen van de afgelopen decennia negatieve invloed hebben op de morfologische dynamiek op mesoschaal wordt genoemd dat steeds minder kortsluitgeulen voorkomen. Dit is de achtergrond van de definitie van deze indicator.
4. Het aantal kortsluitgeulen per eenheid lengte van het estuarium. Deze indicator is afgeleid van de vorige. In plaats van kijken per geul-plaat systeem wordt nu gekeken naar het hele estuarium. Om een vergelijking met andere estuaria mogelijk te maken wordt het aantal door de lengte van het estuarium gedeeld.
5. Totaal (eb-/vloed-) transport door de geul. Morfologische veranderingen hangen nauw samen met het sedimenttransport. Het totale sedimenttransport tijdens vloed / eb door een geul is een maat voor de snelheid waarmee een geul op ingrepen binnen de geul kan reageren. Opgemerkt wordt dat deze indicator veel makkelijker uit model resultaten is af te leiden dan direct uit metingen.
6. Het netto-transport door de geul. Morfologische veranderingen worden bepaald door het netto-transport, oftewel het verschil tussen eb- en vloed-transport. De grootte van het netto-transport is wellicht een indicator voor de morfologische dynamiek. Hier geldt nog sterker dat deze indicator moeilijk is te bepalen uit metingen. Model resultaten met betrekking tot deze indicator zijn ook meestal onnauwkeurig.
7. Het netto circulatie-transport rondom een plaat. Het netto-transport kan ontbonden worden in een doorgaande component en een component die circuleert rondom een plaat. De circulerende component is meer een indicator voor ontwikkelingen op macro-schaal terwijl de doorgaande component meer voor ontwikkeling op mega-schaal is.
8. Verhouding transport in nevengedalen ten opzichte van de hoofdgedalen. Uit de OOSTWEST studie is gebleken dat één van de kenmerken van de veranderingen tot nu toe is, dat de nevengeulen een steeds minder belangrijke rol spelen. Daarom wordt als indicator de relatieve verhouding tussen de transporten voorgesteld.
9. Verhouding ingreep ten opzichte van de transportcapaciteit in de beschouwde morfologische eenheid. Deze indicator wordt voorgesteld om de effecten van ingrepen te benadrukken. Uit een eerdere studie is gebleken dat wanneer de hoeveelheid baggeren/storten boven een bepaald percentage van het totale transport door de gedalen komt, een hoofdgedalen nevengeul systeem instabiel wordt (RIKZ, 1997; Dunsbergen & De Gelder, 1998; Fokkink, 1997).
10. Getijvolume door gedalen. In plaats van het totale sedimenttransport kan ook het getijvolume door een gedalen als indicator worden gebruikt.
11. Restdebiet door gedalen. Dit is analoog aan het netto transport door een gedalen.
12. Verhouding getijvolume hoofd- / nevengeul. Dit is analoog aan de verhouding tussen transport in neven- en hoofdgedalen.
13. Dominantie factor. Deze werd gedefinieerd door Van Kleef (1994), als de verhouding tussen eb- en vloedvolume door een gedalen. Verandering van deze factor blijkt goed te correleren met de morfologische verandering in een gedalen.

14. Verhouding tussen verschillende morfologische eenheden. Met morfologische eenheden worden hier eenheden zoals diepe geul, ondiep water, lage plaat, hoge plaat bedoeld. Deze indicator kan zowel per dwarsprofiel als per (deel-) gebied worden gedefinieerd.
15. Moran functie. Afkomstig van Hofstede (1991), zoals beschreven in hoofdstuk 2.
16. Netto transport bij de monding. Sediment import / export bij de monding van het estuarium is een indicator voor het optreden van veranderingen op megaschaal.
17. Slibgehalte in de bodem. De bodemsamenstelling is meestal goed gecorreleerd met het lokale energieniveau en is een indicator voor de morfologische dynamiek op microschaal.

3.5.2 Evaluatie

In tabel 3-1 is een samenvatting gegeven van de voorgestelde indicatoren. Per indicator is de eventuele bron, de dimensie, of het een momentopname dan wel een historische ontwikkeling betreft, de schaal van dynamiek waarop de indicator betrekking heeft, het achterliggende proces of verschijnsel, de beheersaspecten waarmee de indicator directe relaties heeft, en of de indicator uit velddata en/of modelresultaten af te leiden is aangegeven.

Opgemerkt wordt dat voor de meeste gedefinieerde indicatoren niet direct aan te geven is op welke beheersaspecten zij betrekking hebben. Maar dat hoeft natuurlijk niet te betekenen dat die indicatoren niet van belang zijn voor de beheerder. Alle indicatoren hebben wel betrekking op een bepaald aspect van morfologische dynamiek en daarmee hebben ze allemaal indirect betrekking op de vier beheersaspecten.

De indicatoren voor morfologische dynamiek moeten worden beschouwd als data reductie middel bij het analyseren van velddata en van modelresultaten. Het gebruik ervan moet afhankelijk zijn van de doel van de analyse. Voor een selectie voor de huidige studie is het belangrijk eerst duidelijkheid te krijgen in de relatie tussen morfologische dynamiek en de vier beheersaspecten. Voorgesteld wordt om voorlopig alle indicatoren te behouden.

nummer	Indicator	bron	dimensie	type	schaal	proces /verschijnsel	beheers- aspecten	data / model
1	Dynamiekgetal	Sisternans(1996)	L/T	H	macro/meso	morfologische verandering	BK, WK, E	d / m
2	frequentie functiewisseling geulen	-	l/T	H	macro	morfologische verandering	V, E	d
3	aantal kortsluitgeulen per plaat	-	-	M	meso	morfologie	BK, WK, E	d
4	aantal kortsluitgeulen per lengte estuarium	-	l/L	M	meso	morfologie	BK, WK, E	d
5	totaal transport door geul	-	L3/T	M	macro/meso	sedimenttransport	?	m / d
6	netto-transport door geul	-	L3/T	M	macro/meso	sedimenttransport	?	m / d
7	netto circulatie-transport rondom plaat	-	L3/T	M	macro	sedimenttransport	?	m / d
8	verhouding transport nevengeul / hoofdgeul	-	-	M	macro	sedimenttransport	?	m / d
9	verhouding ingreep / transport capaciteit	-	-	M	macro	sedimenttransport	?	m / d
10	getijvolume door geul	-	L3	M	macro/meso	waterbeweging	?	m / d
11	restdebiet door geul	-	L3/T	M	macro/meso	waterbeweging	?	m / d
12	verhouding getijvolume hoofd- / nevengeul	-	-	M	macro	waterbeweging	?	m / d
13	dominantie factor	van Kleef (1994)	-	M	macro	waterbeweging	?	m / d
14	verhouding verschillende morfologische eenheden	-	-	M	meso/macro	morfologie	E	d / m
15	Moran functie	Hofstede (1991)	L/T	H	meso/macro	morfologische verandering	BK, WK, E	d / m
16	netto transport bij de monding	-	L3/T	M / H	mega	sedimenttransport	?	m / d
17	slibgehalte in bodem	-	-	M	micro/meso	zand-slib segregatie	E	d
type		H : historische data nodig, variatie in tijd; M: moment opname						
Beheersaspecten		BK: bodemkwaliteit, WK: waterkwaliteit, V: veiligheid, E: ecologie						
data / model		geeft aan of een indicator uit model (m) of data (d) te halen is.						

3.6 Conclusies en hypothesen

Uit de voorgaande analyse is gebleken dat de macroschaal dynamiek een sleutel rol speelt in het estuariene systeem van de Westerschelde. Het behouden van de diverse hoofd- en nevengeulen stelsels is een noodzakelijke voorwaarde om de gewenste morfologische dynamiek van het estuarium te behouden en zo mogelijk te versterken. Uit de analyse is ook gebleken dat de volgende onderwerpen bij komend onderzoek nadere aandacht verdienen:

- De gevolgen van veranderingen in het geulenstelsel (macroschaal) op megaschaal ontwikkelingen (import en export van sediment)
- De gevolgen van megaschaal ontwikkelingen (zeespiegelrijzing en zandwinning) op de geulenstelsels (omgekeerde van voorgaande aandachtspunt)
- De uitwisseling tussen platen en geulen
- De invloed van de verhouding tussen hoofd- en nevengeulen op de activiteiten van kortsluitgeulen
- De invloed van kortsluitgeulen op macroschaal circulatiepatronen
- De samenhang tussen de asymmetrie van de beddingvormen en getijcirculatie

Naast de mesoschaal blijkt dat ook de macroschaal dynamiek een belangrijke rol speelt. Het is ook zo dat de macroschaal dynamiek het meest kwetsbaar is onder invloed van het baggeren en storten. De hoeveelheid sediment die wordt verplaatst door de baggeractiviteiten is klein ten opzichte van de totale inhoud van het estuarium. Dit betekent dat de verstoring op de megaschaal dynamiek relatief klein is. Het bestaan van een meergeulenstelsel is echter gebaseerd op een subtiële balans bij de splitsingspunten. Relatief kleine verstoringen kunnen hierbij mogelijk grote consequenties hebben voor de stabiliteit van het systeem. Omdat de veranderingen op macroschaal ook grote consequenties kunnen hebben voor de mega- en mesoschaal dynamiek is het uiterst belangrijk voor de beheerder om ervoor te zorgen dat de macro-schaal dynamiek niet ernstig worden aangetast. Het behouden van de meergeulenstelsels is van cruciaal belang. Een mogelijk beheersbeleid kan zijn "behouden van meergeulenstelsel en daarmee bevorderen van meso-schaal dynamiek". Voor de realisatie van het beleid is dringend kennis nodig over de *toelaatbare grens van ingrepen* die de meergeulenstelsels niet bedreigt. Een begin van een dergelijke analyse is gemaakt in de studie "Milieuaspecten Baggerspeciéstort Westerschelde" (RIKZ, 1997).

3.6.1 Nieuwe hypothesen

1. Het behoud van een meergeulenstelsel in het estuarium is een voorwaarde voor het behouden van de huidige omvang van het estuarium. Vermindering van macro-schaal morfologische dynamiek kan leiden tot versnelde verlandings.
2. Het voorgestelde nieuwe stortbeleid (het verder weg brengen van de baggerspecie van het oostelijke deel naar het westelijke deel van het estuarium) zal tot gevolg hebben dat de macroschaal forcering vermindert en de megaschaal forcering versterkt. Daarom wordt verwacht dat de macroschaal dynamiek minder zal worden beïnvloed terwijl de megaschaal dynamiek juist meer zal worden beïnvloed.

3. Ingrepen hebben vooral effect op ontwikkelingen van dezelfde ruimte- en tijdschalen als die van de ingrepen zelf. Voorbeeld: het baggeren in de hoofdgeul en storten in de bijbehorende nevengeul is een ingreep op macro-schaal en zal vooral invloed hebben op de macro-schaal dynamiek.
4. Voor dynamiek op verschillende schalen zijn verschillende indicatoren nodig. Het is daarom niet mogelijk om één indicator voor morfodynamiek te definiëren.
5. Om de macro- en meso-dynamiek te begrijpen is ook kennis van micro- en megadynamiek nodig. Dit betekent dat om de beheersvragen die vooral betrekking hebben met macro- en meso-dynamiek afdoende te kunnen beantwoorden ook onderzoek naar micro- en megadynamiek nodig is.
6. Er is een sterke samenhang tussen de macro- en mesodynamiek. Ontstaan, ontwikkeling en uitsterven van kortsluitgeulen kan niet los worden gezien van de ontwikkeling van het eb- en vloedgeulen systeem. In vergelijking hiermee zijn de samenhangen tussen mega- en macrodynamiek en tussen meso- en microdynamiek minder.
7. Op de mega- en macroschalen is de invloed van incidentele gebeurtenissen, zoals stormen, niet belangrijk.
8. Kortsluitgeulen ontstaan vooral tijdens stormen. Toch is het niet noodzakelijk om de invloed van de stormen mee te nemen om het gedrag van de kortsluitgeulen te bestuderen, omdat de tendens tot ontstaan en het gedrag van kortsluitgeulen vooral worden bepaald door de getijstrooming.
9. Drempelvorming en de daarmee samenhangende benodigde hoeveelheid baggerwerk hangt sterk samen met plaat-geul uitwisseling. Het is daarom de vraag of het verder wegbrengen van de baggerspecie de benodigde baggerinspanning zal verminderen.
10. De totale ingreep (de optelsom van alle rechtstreeks door de mens veroorzaakte sedimenttransporten, dus baggeren, zandwinnen en storten) in de Westerschelde is in dezelfde orde van grootte als het netto natuurlijke sedimenttransport.
11. Het is beter de morfologische eenheden (zoals volgens Huijs (1996)) te hanteren dan de compartimenten afgeleid van de lodingskaarten.
12. Morfologische dynamiek is niet gunstig voor scheepvaart omdat een dynamischer systeem voor meer sedimentatie in baggergebieden zorgt.
13. De morfologische veranderingen in de Westerschelde worden vooral bepaald door zandtransporten. Toch is het ook belangrijk slibtransporten mee te nemen in de studie naar morfologische dynamiek.

3.6.2 Kennistekorten

- Onvoldoende inzicht in de interactie tussen mega- en macroschaal dynamiek. De hypothese dat verdwijning van het meergeulenstelsel tot versnelde verlanding leidt, dient nader bestudeerd te worden. (3-1)
- Onvoldoende inzicht in de interactie tussen macro- en mesoschaal dynamiek. Hoe hoofd- en nevengeulen elkaar beïnvloeden is onvoldoende duidelijk. (3-2)
- Onvoldoende inzicht in de mechanismen die plaathogteveranderingen (ruimtelijk en temporeel) veroorzaken. Zelfs de bestaande evenwichtsrelaties voor de plaathogtes zijn nog erg onbetrouwbaar. (3-3)
- Onvoldoende kennis over de ontwikkeling van beddingvormen (microschaal dynamiek) en de invloed daarvan op getijcirculatie en sedimenttransport. (3-4)

- Onvoldoende kennis over de toelaatbare of kritische grens van ingrepen. De gedachte hierbij is dat bij overschrijding van deze grens het systeem de tendens krijgt naar een hele andere toestand te gaan, in plaats van de tendens terug te keren naar de oude toestand. (3-5)
- De relatieve bijdrage van de verschillende vormen van natuurlijke aandrijving (waaronder getijwerking en stormen) is nog onvoldoende gekwantificeerd. (3-6)
- Onvoldoende proceskennis over de relatie tussen de benodigde baggerhoeveelheid enerzijds en de noodzakelijke vaargeuldimensies en baggerstrategie anderzijds. Voorspellingen van baggerhoeveelheden zijn nog gebaseerd op extrapolaties. (3-7)
- Onvoldoende kwantitatieve kennis over de invloed van diverse drie-dimensionale processen en mechanismen (zoals secundaire stroming in dwars- en langsrichting en over- en onderverzadiging van suspensief transport) op de morfologische dynamiek in de Westerschelde. (3-8)
- Onvoldoende proceskennis over het transport van zand-slib mengsels en over de invloed daarvan op de bodemsamenstelling (slibgehalte). (3-9)
- Er is een kloof tussen datakennis en empirische kennis enerzijds en kennis op proces- en mechanismeniveau anderzijds. Empirisch gevonden morfologische relaties kunnen nog niet verklaard worden met behulp van inzicht in processen en mechanismen. (3-10)

4 De rol van morfologische dynamiek voor de Westerschelde

4.1 Inleiding

Zoals in het eerste hoofdstuk reeds is gedefinieerd, wordt onder morfologische dynamiek de intensiteit en frequentie van morfologische veranderingen en het daaraan gerelateerde sedimenttransport verstaan. Verondersteld wordt dat de afname van de morfologische dynamiek nadelige invloed heeft op het functioneren van de Westerschelde als een gezond, compleet en natuurlijk estuarium (Vroon *et al.*, 1997). Gezien de eisen die aan een dergelijk estuarium dienen te worden gesteld kan aan morfologische dynamiek mogelijk een belangrijke rol worden toegekend voor de water- en bodemkwaliteit, de ecologie van het estuarium en de veiligheid tegen overstromen. De exacte rol die morfologische dynamiek speelt voor deze vier beheersaspecten is echter niet in detail bekend. Uiteraard kan de gedachte dat morfologische dynamiek van groot belang is pas worden onderbouwd als deze relaties beter bekend zijn. Om die reden wordt in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de huidige kennis over en inzichten in de relatie tussen morfologische dynamiek en de vier genoemde beheersaspecten. Het doel hiervan is het beschrijven van de rol van morfologische dynamiek voor het beheer van de Westerschelde en het vaststellen van de belangrijkste kennistekorten die het beter onderbouwen van die rol in de weg staan. Met deze kennis kan tevens duidelijk worden welke gevolgen een afname van de dynamiek heeft voor het estuariene systeem en kan bij ingrepen gericht gestuurd worden om achteruitgang van de genoemde beheersaspecten te voorkomen of te beperken.

Dit hoofdstuk is samengesteld in samenwerking met deskundigen op het gebied van water- en bodemkwaliteit en ecologie. Een uitgebreide beschrijving door deze deskundigen van de interactie tussen morfologische dynamiek en de genoemde beheersaspecten is opgenomen in bijlage C.

4.2 Veiligheid tegen overstromen

De ontwikkelingen in de morfologische dynamiek van de Westerschelde hebben zowel direct als indirect effect op de veiligheid van het estuarium.

Een direct effect van morfologische dynamiek op de veiligheid tegen overstromen is het risico van ondermijning van de dijken. Dit risico is zeker aanwezig wanneer geulen zich vrij kunnen verplaatsen door het estuarium. Echter, door fixatie van de geulen is de ruimte waarbinnen de geulen zich vrij kunnen verplaatsen in de loop van de tijd steeds verder beperkt. De fixatie van de geulen is het gevolg van inpolderingen en bedijkingen in het verleden, waardoor de (horizontale) ruimte in het estuarium wordt beperkt. Door geulmigratie (macro-dynamiek) zijn de geulen tegen deze grenzen van het estuarium komen te liggen. De buitenbochten en oevers van de geulen worden verdedigd met behulp van harde oeverbeschermingen, om te voorkomen dat de geulen verder naar de dijken zullen migreren, waardoor de veiligheid van die dijken in gevaar zou kunnen komen. De veiligheid

tegen overstromen wordt in de huidige situatie dus gewaarborgd door het met behulp van harde beschermingen beperken van de morfologische dynamiek op plaatsen waar die dynamiek risico's voor de dijken kan opleveren. Relatief snelle veranderingen in de horizontale ligging van de hoofdgeul kunnen nog wel optreden als gevolg van functiewisseling. Deze vorm van morfologische dynamiek kan tot gevolg hebben dat een hoofdgeul langs een voorheen niet aangevallen deel van de oever komt te liggen. Een ander gevolg van de toegenomen fixatie van de hoofdgeul en de afname van de morfologische dynamiek (op macro-schaal) is de toegenomen voorspelbaarheid van de ontwikkelingen in de Westerschelde. Doordat in de loop van de jaren een steeds groter deel van de buitenoevers van de geulen is beschermd, is de erosie van de buitenbochten tot staan gebracht. Het risico dat geulen zich snel of onverwacht naar (eventueel nog niet beschermde) dijkvakken toe verplaatsen is hierdoor afgenomen, wat de veiligheid van die dijken ten goede komt.

Een indirect effect van de veranderingen in de morfologische dynamiek op de veiligheid tegen overstromen wordt veroorzaakt door de veranderingen die optreden in de waterbeweging. Deze veranderingen zijn een gevolg van veranderingen in de morfologie van het estuarium als gevolg van fixatie en verdieping van de hoofdgeul. De verdieping van de hoofdgeul is het gevolg van menselijke activiteiten als baggerwerk en zandwinning. De verstarring en vergroting van de hoofdgeul, samen met de afname van de omvang en dynamiek van de nevengeulen, heeft geleid tot afname van de bodemwrijving en versterking van de getijdoordringing. Ook veranderingen in de lengte van de geulen als gevolg van functiewisseling (kan een natuurlijk proces zijn), uitbochten (natuurlijk proces) of juist bochtafsnijding (kan een natuurlijke ontwikkeling of menselijke invloed zijn) hebben invloed op de getijdoordringing. Hierdoor veranderen de hoogwaterstanden en de getijslag in (vooral) het oostelijk deel van de Westerschelde. Deze ontwikkeling heeft rechtstreeks gevolgen voor de veiligheid van de dijken. Verhoging van de hoogwaterstanden en vergroting van de getijslag heeft een vergroting van de overstromingsfrequentie van de dijken tot gevolg. Tenslotte kan de afname van het areaal aan slikken en schorren of verlaging van deze gebieden tot gevolg hebben dat de afstand tussen diep water en de dijkvoet afneemt of minder ruw wordt. Hierdoor zou de dijkvoet aan ruwere hydrodynamische condities kunnen worden blootgesteld, wat weer een bedreiging voor de veiligheid kan betekenen.

Overigens bevinden de hier beschreven ontwikkelingen zich voornamelijk op het macroschaal niveau. Het blijkt dat de ontwikkelingen op dat schaalniveau directe en indirecte invloed hebben op voor de beheerder belangrijke veiligheidsaspecten. Ontwikkelingen op lagere schaalniveaus zullen de dominantie van het macroschaalniveau niet kunnen beïnvloeden: lokaal zullen de waterstanden niet op een voor de dijkbeheerder relevante manier afwijken van de globale getijbeweging.

Kennis die voor het beoordelen van de invloed van morfologische dynamiek op de veiligheid tegen overstromen van belang is, betreft vooral voorspelling van de toekomstige ligging van de geulen (directe invloed) en de interactie tussen morfologie en waterbeweging (indirecte invloed). De belangrijkste onderwerpen die hierbij van belang zijn en nader onderzocht dienen te worden, zijn de mechanismen die bepalend zijn voor het optreden van functiewisseling tussen verschillende geulen, de invloed van de toename van het getijdebiet (zoals verdere verruiming van de hoofdgeulen en verdere concentratie van het getijdebiet in die hoofdgeulen) en de invloed van veranderende ruwheid op de waterbeweging. Een aantal

van deze onderwerpen wordt op dit moment reeds aangepakt, onder andere in het kader van de projecten Verdieping en Kust 2000.

4.3 Kwaliteit van water en bodem

Morfologische dynamiek speelt een rol voor de kwaliteit van water en bodem van de Westerschelde. Door morfologische veranderingen en het daaraan gerelateerde sedimenttransport wordt de bodem omgewerkt waardoor in de bodem opgeslagen vervuilende stoffen en voedingsstoffen vrijkomen. Een ander voorbeeld van de relatie tussen morfologische dynamiek en de water- en bodemkwaliteit is de buffering of verdunning van aan slib gebonden verontreinigde stoffen als gevolg van een lage of juist hoge morfologische dynamiek.

Status van de kwaliteit van water en bodem in de Schelde

De kwaliteit van bodem en vooral van het water van de Westerschelde is in de jaren '80 en '90 verbeterd, maar laat nog veel te wensen over (ICBS, 1997). Vooral in de slibrijke delen van de Schelde (zoals de Zeeschelde) is daarnaast ondanks uitgebreide sanering nog een grote hoeveelheid zware metalen en andere microverontreinigingen in de bodem opgeslagen. Ook in het oostelijke en middendeel van de Westerschelde is een deel van de waterbodem matig verontreinigd (RIKZ, 1995). De in de bodem aanwezige hoeveelheid vervuiling is vele malen groter dan de jaarlijkse aanvoer. Veranderingen in de aanwezige hoeveelheid slib kunnen veranderingen in de concentraties aan slib gebonden verontreinigingen en in het water opgeloste verontreinigingen veroorzaken (WL | DELFT HYDRAULICS, 1988).

De organische vervuiling van het estuarium wordt niet direct beïnvloed door parameters als zuurstofgehalte, pH en zoutgradiënt. Over het algemeen is de belasting van organische stoffen rechtstreeks afhankelijk van de lozingen. Gebleken is dat er geen organisch materiaal of BOD via de Westerschelde in de Noordzee terechtkomt (WL | DELFT HYDRAULICS, 1988). Op dit punt vervult de Schelde haar functie als (filterend en reinigend) estuarium dus nog naar behoren. Ook van organische stoffen is een grote voorraad opgeslagen in de bodem.

De rol van morfologische dynamiek voor water- en bodemkwaliteit

Op verschillende manieren is er sprake van interactie tussen morfologische processen in de Westerschelde en de kwaliteit van het water en de bodem in het estuarium. Gezien deze interactie kan ook worden verwacht dat veranderingen in morfologische processen invloed zullen hebben op de water- en bodemkwaliteit. Dit betreft zowel veranderingen in de tijd als veranderingen in de ruimte. De volgende kenmerken van de morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde zijn van belang voor de kwaliteit van water en bodem.

Ten eerste wordt hier de uitwisseling van vervuilende stoffen tussen water en bodem als gevolg van sedimentatie en resuspensie processen genoemd. Bij gelijkblijvende aan- en afvoer van vervuilende stoffen op een bepaalde plaats in het estuarium, zijn de kwaliteit van water en bodem complementair aan elkaar. Als de bodemkwaliteit ten gevolge van erosie van vervuilde bodemlagen verbetert, zal een grotere hoeveelheid vervuilende stoffen in de waterkolom terechtkomen. Als daarentegen de waterkwaliteit verbetert doordat aan slib

gebonden vervuilende stoffen sedimenteren, zal de bodemkwaliteit achteruitgaan. Morfologische dynamiek op microschaal (sedimentatie en erosie) is hierbij één van de sturende mechanismen. Een ander in dit verband belangrijk proces is het netto transport van slib als gevolg van getij-asymmetrie en getijcirculatie. Overigens kunnen veranderingen in de water- en bodemkwaliteit op een bepaalde plaats omgekeerde effecten hebben op een andere plaats, doordat voorheen schoon water nu vervuilende stoffen meevoert die elders weer worden afgezet. Lokale veranderingen in de morfologische dynamiek hebben op die manier (bij gelijkblijvende aan- en afvoer) relatief weinig invloed op de kwaliteit van water en bodem op de schaal van het gehele estuarium. Deze situatie verandert wanneer er wel wijzigingen optreden in de aan- en afvoer. Zo kan de aanvoer van vervuilende stoffen naar de Westerschelde toenemen bij toenemende morfologische dynamiek in de Zeeschelde, vooral als dit gepaard gaat met een toename van het zuurstofgehalte in de Zeeschelde (waarschijnlijk, door de aanleg van een rioolwaterzuiveringsinstallatie in Brussel), waardoor naar verwachting nog meer vervuilende stoffen kunnen vrijkomen uit de bodem. Deze situatie kan sterke negatieve consequenties hebben voor de kwaliteit van water en bodem in de Westerschelde. Aan de andere kant kan een toename van de morfologische dynamiek in de Westerschelde een netto transport van vervuilende stoffen van de bodem naar het water veroorzaken. Aangezien een groter deel van de met het water meegevoerde vervuilende stoffen naar de Noordzee wordt afgevoerd dan van de in de bodem opgeslagen vervuiling, neemt op die manier de afvoer toe en treedt een netto verbetering op van de kwaliteit van water en bodem. Afname van de morfologische dynamiek in de Westerschelde kan tot gevolg hebben dat een groter deel van de vervuilende stoffen sedimenteert, waardoor de afvoer naar zee wordt verkleind. Gevolg is dan dat de kwaliteit van de bodem achteruitgaat door accumulatie van aan slib gebonden verontreinigingen. Deze situatie heeft zich voorgedaan in het Haringvliet en Hollands Diep. Na de aanleg van de Haringvlietdam is de morfologische dynamiek in dit voormalige estuarium sterk afgenomen, waardoor slibrijk bodemmateriaal van zeer slechte kwaliteit kon accumuleren. Tegenwoordig wordt deze zwaar vervuilde bodem langzaam bedekt met een laag materiaal van betere kwaliteit, doordat de aanvoer van vervuilende stoffen uit de rivieren is verminderd.

Naast mobilisatie van vervuilende stoffen kan toenemende morfologische dynamiek ook leiden tot het vrijkomen van grote hoeveelheden in de bodem opgeslagen voedingsstoffen. Het gaat daarbij weliswaar niet om hoge concentraties of hoogwaardige voedingsstoffen, maar als de totale hoeveelheid omgewerkt sediment zeer groot is kan deze bron toch een belangrijke bijdrage leveren aan de beschikbaarheid van nutriënten in de Westerschelde. Overigens zal dit niet leiden tot een toename van de primaire produktie, want die wordt in de huidige situatie reeds beperkt door de beperkte beschikbaarheid van licht in het troebele water van de Westerschelde.

Ten tweede is de verspreiding van slib over het estuarium en de variatie hierin (dynamiek!) van groot belang voor de beoordeling van de kwaliteit van water en bodem. Dit verband ligt gezien de sterke band tussen vervuiling van de waterbodem en het voorkomen van slib voor de hand. Zoals hierboven werd beschreven vindt de uitwisseling van slib tussen water en bodem plaats door sedimentatie- en erosieprocessen op microschaal. De lokatie waar deze processen actief zijn (en dat bepaalt de slibverspreiding) wordt mede bepaald door morfologische dynamiek op hogere schaalniveaus. De configuratie van morfologische eenheden als platen en geulen bepaalt uiteindelijk de spreiding van hoog- en laagdynamische gebieden in de Westerschelde. Hierbij is overigens natuurlijk wel sprake van terugkoppeling tussen dynamiek op microschaal en dynamiek op hogere schaalniveaus:

wanneer erosie of sedimentatie op microschaal plaatsvindt heeft dat uiteindelijk gevolgen voor alle schaalniveaus. Hiermee samenhangend is de slibbalans van het estuarium van belang. Aan- en afvoer van aan slib gebonden vervuilende stoffen worden beschreven door de bruto termen van deze balans. Samenhangend met de ruimtelijke spreiding van slib is de verhouding tussen zand en slib op een bepaalde plaats en op een bepaald tijdstip van groot belang voor de bodemkwaliteit op die plaats en op dat tijdstip. Gezien de sterk verschillende eigenschappen van zand en slib wat betreft de binding van vervuilende stoffen en de gevoeligheid voor erosie en sedimentatie is deze verhouding tussen beide sedimentsoorten zowel sterk afhankelijk van de lokale morfodynamische condities als bepalend voor de kwaliteit van de bodem.

Naast de hiervoor beschreven verbanden tussen morfologische dynamiek en de kwaliteit van water en bodem kan er ook worden gedacht aan een terugkoppeling van de bodemkwaliteit naar de morfologie. Dit verband ontstaat doordat chemische processen de fysische eigenschappen van de bodem kunnen beïnvloeden. Concreet kan dit bijvoorbeeld het geval zijn wanneer de Zeeschelde weer meer zuurstof zou gaan bevatten, waardoor de nu deels gereduceerde bodems weer geoxydeerd kunnen raken. Door verkitting van geoxydeerde ijzerdeeltjes zal de bodem dan minder gevoelig worden voor erosie. Op deze manier kan verbetering van de waterkwaliteit dus een afname van de morfologische dynamiek tot gevolg hebben! Overigens kan ook worden verwacht dat er meer bodemleven aanwezig is in geoxydeerde bodems, waardoor een deel van dit effect door bioturbatie wellicht weer teniet wordt gedaan. Het is dus niet op voorhand te zeggen of een verbetering van het zuurstofgehalte van de Zeeschelde nadelige of gunstige gevolgen heeft voor de kwaliteit van water en bodem in de Westerschelde.

Samengevat spelen bij het beoordelen van de interactie tussen morfologische dynamiek en de kwaliteit van bodem en water de volgende processen en parameters een rol.

- Snelheid van sedimentatie en resuspensie, inclusief de temporele en ruimtelijke variatie hierin. Van groot belang is hierbij dat, in tegenstelling tot wat bij morfologische berekeningen gebruikelijk is, vooral de *bruto* termen van belang zijn.
- Menging van sediment in de bodem, diepte en snelheid van omwerking. Hieraan gekoppeld: de voortplantingssnelheid van bodemvormen.
- De porositeit en de dichtheid van het bodemmateriaal.
- De samenstelling (slibinhoud en percentage organisch materiaal) van het bodemmateriaal.
- Nauwkeurige kwantificering van de slibbalans!

Belangrijke waarneming is hierbij dat de hierboven genoemde processen (met uitzondering van de slibbalans) en parameters voornamelijk betrekking hebben op het microschaal niveau. Het blijkt dat, hoewel de interesse van de beheerder zich voornamelijk op het macro-schaal niveau richt, de interactie tussen de verschillende processen plaatsvindt op een lager schaalniveau. Zoals gezegd, werken de gevolgen van veranderingen op het laagste schaalniveau uiteindelijk wel door naar hogere schaalniveaus: verplaatsing van platen en geulen is uiteindelijk ook een sedimentatie-erosie proces.

Kennis over de interactie tussen morfologische dynamiek en de kwaliteit van water en bodem

Nu in de vorige paragraaf de rol van morfologische dynamiek voor de kwaliteit van water en bodem van de Westerschelde is aangegeven, kan vervolgens worden beoordeeld welke kennis op dit gebied aanwezig is en of er behoefte is aan kennisontwikkeling.

Zoals gezegd vindt de interactie tussen water en bodem plaats door middel van morfologische processen op microschaal. Tot nu toe worden voor de beschrijving van deze processen zeer eenvoudige modellen gehanteerd. Deze komen er bijvoorbeeld op neer dat het slib in de bovenste paar millimeter van de bodem een verblijfstijd van ongeveer een dag heeft en dus zeer snel uitwisselt met de waterkolom. De onderliggende laag van een halve meter heeft een verblijfstijd van een jaar, en wisselt dus minder snel uit. Hierbij wordt geen rekening gehouden met ruimtelijke en temporele variatie in de beschreven processen. Gezien de veronderstelde snelle uitwisseling tussen water en bodem, is er geen verschil in kwaliteit tussen water en bodem. Dit model is uiteraard een zeer grove schematisatie van de werkelijkheid, en verdient gezien het belang ervan nadere uitwerking. Hierbij moet vooral aandacht zijn voor betere (dynamische) beschrijving van de erosie-sedimentatieprocessen. Een zeer belangrijk aandachtspunt hierbij is dat voor de bepaling van water- en bodemkwaliteit kwantificering van de *bruto* transporten noodzakelijk zijn. Dit in tegenstelling tot morfologische berekeningen, waarbij doorgaans alleen netto termen worden gebruikt.

De verspreiding van slib in de Westerschelde en de Zeeschelde is op dit moment redelijk beschreven aan de hand van veldwaarnemingen, maar er bestaat slechts weinig kwantitatief inzicht in de dynamiek van de slibverspreiding. Dit is een belemmering voor de beschrijving en voorspelling van water- en bodemkwaliteit. Ook de slibbalans is op dit moment slechts globaal bekend. Nauwkeuriger inzicht in de slibtransporten over de Belgisch - Nederlandse grens en over de zeewaartse rand van het estuarium (waarbij ook hier weer de bruto termen van belang zijn) is wenselijk.

Deze verhouding tussen zand en slib is op dit moment slechts bekend uit veldwaarnemingen (met name de McLaren bemonstering), maar kan nog niet afdoende worden beschreven of voorspeld met numerieke modellen. Gezien de sterk verschillende eigenschappen van zand en slib is dit een probleem bij het doen van kwantitatief onderbouwde uitspraken over de kwaliteit van water en bodem. Aangeraden wordt om aandacht te besteden aan het probleem van beschrijving en voorspellen van sedimentgradatie.

4.4 Ecologie

De koppeling tussen de ecologie en de fysische omgeving wordt gelegd door middel van de beschrijving van fysiotopten (het 'abiotisch huis'). Een fysiotoop wordt bepaald door de specifieke combinatie van een aantal fysische kenmerken van de betreffende lokatie. Hierbij gaat het om zaken als het hydraulisch klimaat (waarbij zowel de gemiddelde waarden als de extremen van belang zijn), het micro-klimaat (schuifspanningen aan de bodem, overstromingsduur en dergelijke) en de mate van veranderlijkheid van de bodemligging. Een aantal van deze fysische kenmerken wordt bepaald door de morfologische dynamiek van de lokatie, zoals de snelheid van bodemophoging of juist verlaging en het slibgehalte van het bodemmateriaal. Veranderingen in deze fysische kenmerken van een bepaalde

lokatie als gevolg van veranderingen in de morfologische dynamiek hebben dus direct invloed op de geschiktheid van die locatie voor bepaalde soorten.

De morfologische dynamiek die een estuarium als de Westerschelde van nature kenmerkt, is onder andere de oorzaak van de verscheidenheid aan fysiotopten en overgangen die in een estuarium wordt aangetroffen. Voorbeelden van deze verscheidenheid zijn de gelijktijdige aanwezigheid van zandige en slibrijke gebieden, lage en hoge bodemdynamiek, diepe en ondiepe delen en zout-zoet gradiënten. Door deze grote variatie van fysische condities ontstaan er door het estuarium heen verschillende fysiotopten met daarbij specifieke soorten en levensgemeenschappen. Dit draagt bij aan de compleetheid van het estuarium. Een grote verscheidenheid aan morfologisch dynamische omstandigheden kan dus van belang zijn voor het goed functioneren van een estuarien systeem. Hieraan kan gekoppeld worden dat de soortensamenstelling en de variatie in de tijd en ruimte daarin van groot belang is bij het beoordelen van de conditie van het ecosysteem.

Uit de Oostwest studie (Vroon *et al.*, 1997) is naar voren gekomen dat in de laatste decennia het areaal van belangrijke fysiotopten is afgenomen. Een voorbeeld hiervan is het ondiepwatergebied. Dit fysiotoop is in omvang afgenomen door het opvullen en zelfs verdwijnen van kortsluitgeulen (afname mesodynamiek) en door het steiler worden van de plaatranden als gevolg van verdieping van de geulen en ophoging van de platen. Uit de Oostwest studie is echter niet gebleken dat door het verminderen van de van het beschikbare oppervlak van bepaalde fysiotopten de biodiversiteit is afgenomen. Toch wordt verondersteld, mede op basis van algemene ecosysteemtheorie, dat door een verdere afname van de morfologische dynamiek de ruimte voor hogere organismen om zich verder aan te passen beperkt wordt. Op basis van deze gedachte kan de beheerder van de Westerschelde er naar streven bij toekomstige ingrepen de huidige dynamiek zo veel mogelijk te behouden en waar mogelijk te versterken om belangrijke leefgebieden te behouden.

Hiërarchisch model

De ecologische ontwikkeling van een estuarium wordt gestuurd door een groot aantal processen die in tijd en ruimte in onderling verband staan. Deze processen zijn in meer of mindere mate hiërarchisch geordend. De dominante sturingsrichting gaat van boven naar beneden, maar er zijn ook terugkoppelingsmechanismen, voornamelijk op de lagere niveaus. In volgorde worden hier onderscheiden:

Klimaat ⇒ Meteorologie ⇒ Hydrodynamica ⇒ Geomorfologie ⇒ Bodemontwikkeling ⇒ Vegetatie ⇒ Dierleven

Het leven in de Westerschelde wordt op megaschaal (het gehele estuarium) beïnvloed door de saliniteitsgradiënt (*hydrodynamica*) van west naar oost, die de Westerschelde opdeelt in een mariene zone, een mariene overgangszone en een brakke en zoete zone. Op de macroschaal van schorren, platen, slikken en geulen is vooral de hoogteligging (*geomorfologie*) van belang, gevolgd door de lokale hydraulische en morfologische omstandigheden die onder andere de sedimentkarakteristieken (*bodemontwikkeling*) sturen (meso- en microschaal).

In de volgende paragrafen wordt per groep van organismen de afhankelijkheid van fysische factoren en de situatie in de Westerschelde besproken.

Benthos en algen

De ruimtelijke verspreiding van benthische leefgemeenschappen wordt voornamelijk bepaald door de saliniteit en de hoogteligging. De levensgemeenschappen van droogvallende platen wordt gedomineerd door schelpdieren en wormen, maar verschuift wat betreft soortensamenstelling van het mariene deel naar het brakke deel. Gaande van west naar oost neemt de totale biomassa aan benthische soorten af en vindt er tevens een verschuiving plaats in de wijze van voedselvergarig. De morfologische dynamiek kan invloed uitoefenen op de saliniteitsgradiënt en de hoogteligging van de bodem op mega- en vooral macro-schaal. Een toenemende concentratie van het getijdebiet in de hoofdgeul kan resulteren in het verleggen van de zout-zoet overgang, zoals reeds is uitgelegd in de paragraaf over de rol van morfologische dynamiek voor de veiligheid tegen overstromen. Geomorfologische ontwikkelingen op macro- en mesoschaal zijn bepalend voor de hoogteligging van de slikken en platen. Hydraulische en morfologische dynamiek op microschaal beïnvloeden sedimentkarakteristieken als stabiliteit, organisch stofgehalte en slibgehalte. Sedimentatie en erosie kunnen rechtstreeks verstorend werken door begraving van bodemdieren of door omwoeling van het sediment. Deze mobiliteit van het sediment kan bepalend zijn voor de vestigingsmogelijkheden van bepaalde soorten. Voorts heeft de dynamiek invloed op de mediane korrelgrootte, het slibgehalte en de hoeveelheid particulier organisch koolstof (POC). Ook deze kenmerken van het bodemmateriaal bepalen de geschiktheid van een bepaalde lokatie voor bepaalde soorten. Wanneer, als gevolg van veranderingen in het hydraulisch regime op een lokatie, hierin grote veranderingen optreden, zullen aanwezige soorten worden vervangen door andere. Dit soort veranderingen treden overigens van nature veelvuldig op als gevolg van beïnvloeding van de microdynamiek door hogere schaalniveaus.

De troebelheid van het water wordt bepaald door de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal. De troebelheid kan worden beïnvloed door de morfologische dynamiek op macro-, meso- en microschaal, maar wordt ook beïnvloed door de saliniteit. De troebelheid van het water is naast de nutriëntenhoeveelheid, de temperatuur en de saliniteit bepalend voor de primaire productie in de Westerschelde. De troebelheid is de beperkende factor voor algengroei in de Westerschelde. De troebelheid in de Westerschelde is overigens zo hoog dat deze slechts lokaal wordt beïnvloed door de bagger- en stortactiviteiten.

Vogels

De verspreiding van vogels wordt gestuurd door de aanwezigheid van fourageer-, rust- en/of broedhabitat. Verder speelt de troebelheid een rol voor visetende vogels. Morfologische dynamiek kan op alle schalen invloed uitoefenen op de aanwezigheid van geschikte habitats. De geschiktheid van een bepaalde habitat wordt mede bepaald door fysische kenmerken als hoogteligging (met daarvan afgeleide kenmerken als overstromingsduur en overstromingsdiepte), sedimentsamenstelling en toegankelijkheid voor predatoren. Deze kenmerken zijn afhankelijk van morfologische dynamiek op macroschaal (ligging en omvang plaatcomplexen, troebelheid), mesoschaal (hoogteligging) en microschaal (sedimentsamenstelling, troebelheid). Veranderingen in morfologische dynamiek hebben op deze manier op ieder schaalniveau invloed op de aanwezigheid van geschikte fysiotopten. Gezien de grote mobiliteit van vogels heeft morfologische dynamiek niet direct invloed op het voorkomen en de verspreiding van vogels. Slechts als ten gevolge van veranderingen in

het estuarium grote oppervlakten van een bepaalde fysiotoop verdwijnen zijn negatieve gevolgen voor vogels te verwachten.

Vissen

Estuaria zijn normaal gesproken zeer visrijke gebieden. In de Westerschelde worden echter minder soorten aangetroffen dan verwacht zou kunnen worden (Vroon *et al.*, 1997). Dit is overigens voornamelijk een gevolg van de zware organische belasting van het systeem (Mol *et al.*, 1997). De ondiepe, voedselrijke gebieden vervullen een belangrijke functie als paai- en kinderkamergebied. De verminderde beschikbaarheid van geschikt voortplantingsareaal voor sommige soorten, zoals ondiepe, slibrijke gebieden heeft er mede voor gezorgd dat er een verstarring van de natuurlijke ontwikkelingen is opgetreden. Op basis van de algemene ecosysteemtheorie kan worden aangenomen dat de ruimte voor vissen om zich aan te passen aan verdere verstarring is afgenomen (Vroon *et al.*, 1997). Baggeractiviteiten kunnen zowel nadelig als voordelig werken. Ter plaatse van het baggeren en storten kan een versterkte microdynamiek optreden door vergrote zandtransporten, waartegen de meeste soorten niet bestand zijn (begraving, beperkt zicht). De verhoogde troebelheid echter geeft sommige soorten beschutting tegen predatoren, juist vanwege het slechte zicht.

Schorren

De estuariene gradiënt vertaalt zich duidelijk naar de variatie aan schorvegetaties langs het estuarium. De Westerschelde, inclusief de rivier Schelde, kent zoutwater-, brakwater- en zoetwaterschorren. Naast deze gradiënt in de lengte-as van het estuarium is er een tweede gradiënt in zoutgehalte en overspoelingsfrequentie in de dwarsrichting, waardoor ook in die richting variatie in schorvegetatie aanwezig is. Naast een belangrijke ecologische functie, vervullen schorren ook een functie als bergingsgebied bij hoogwateropzet en als sedimentatiegebied. Het schorareaal in de Westerschelde is voornamelijk als gevolg van inpolderingen sterk achteruit gelopen. Bovendien is de morfologische structuur van de Westerschelde inmiddels dusdanig veranderd dat het proces van natuurlijke verlanding aan het versnellen is. Het Verdrongen Land van Saeftinge dreigt binnen 20 jaar zo hoog opgeslibd te zijn dat het niet meer door het Scheldewater wordt overstroomd. Vergroting van de komberging in het estuarium en daarbij horende vergroting van de stroomsnelheden en verdieping van de geulen zou meer dynamische omstandigheden kunnen creëren, zodat verlanding wordt tegengegaan. Nergens langs de Westerschelde ontstaan op een natuurlijke wijze jonge schorren.

Samenvattend kunnen de volgende voor de ecologie belangrijke, door morfologische dynamiek beïnvloedbare parameters worden genoemd, uitgesplitst naar schaalniveau:

Schaalniveau	Parameter	Relatie met ecologie via
Megaschaal	Saliniteitsgradiënt	Troebelheid en rechtstreekse geschiktheid
Macroschaal	Hoogteligging	Overstromingsduur en -diepte Arealen van bepaalde fysiotopen
	Saliniteitsgradiënt	Troebelheid en rechtstreekse geschiktheid
	Sedimentgradatie	Slibgehalte en gehalte POC
Mesoschaal	Hoogteligging	Overstromingsduur en -diepte Arealen van bepaalde fysiotopen
	Sedimentgradatie	Slibgehalte en gehalte POC
Microschaal	Sedimentgradatie	Slibgehalte en gehalte POC
	Sedimentatie / Erosie	Begraving / blootlegging en troebelheid

Ecologische dynamiek

Over het algemeen worden de levensgemeenschappen van de Westerschelde gekenmerkt door het vermogen zich snel aan te passen aan de veranderende omstandigheden in hun leefmilieu. Dit geldt met name voor de benthische organismen die leven in de zandbodem. Veel soorten zijn in staat mee te migreren met de natuurlijke sedimentatie of erosie. Op andere locaties in het zoute milieu, bijvoorbeeld op de Noordzee, zijn plekken aan te wijzen waar het habitat minder veranderlijk is, zodat daar een verregaande successie kan optreden en soorten kunnen worden aangetroffen die zeer oud zijn.

De effecten van het optreden van kortsluitgeulen of andere snelle morfologische veranderingen in de Westerschelde zullen gering zijn. Wanneer een deel van de Westerschelde wordt omgewoeld, zal deze plek weer snel gekoloniseerd worden. Eerst zullen allerlei mobiele predatoren de dode organismen opruimen en vervolgens zal deze plek snel in gebruik worden genomen door mobiele worm- en kreeftachtigen. De voortplanting van de meeste benthische soorten gaat via vrij zwevende larven, zodat, mits de vestigingscondities goed zijn, de plek weer snel bewoond kan worden door schelpdieren. Het is bekend van sommige ecosystemen dat deze af en toe teruggeworpen moeten worden van het climaxstadium naar het pionierstadium, maar dit is niet van primair belang voor de ecosystemen in de Westerschelde. Het is echter wel van belang voor de kenmerkendheid en compleetheid van de Westerschelde dat de hoge dynamiek van onder andere de platen wordt behouden, zodat een plaatgroei periodiek wordt afgetopt en er geen kans is dat er een schor ontstaat. Alleen op deze wijze zullen alle voor een estuarium belangrijke en karakteristieke fysiotopen, inclusief hun levensgemeenschappen en biologische produktiviteit aanwezig zijn, met de daarbij van nature optredende fluctuaties.

Kennistekorten rol morfologische dynamiek voor ecologie

Uit de hiervoor gegeven samenvatting van de voor de ecologie belangrijke, door morfologische dynamiek beïnvloedbare parameters blijkt dat op alle schaalniveaus sprake is van interactie tussen morfologische dynamiek en ecologie. De belangrijkste aspecten hierbij betreffen de saliniteitsgradiënt, de hoogteligging van platen en slikken, sedimentgradatie en

daarmee samenhangend sedimentatie-erosieprocessen op microschaal. Alhoewel bij al deze aspecten sprake is van kennistekorten, is voor het goed begrijpen van de rol van morfologische dynamiek voor de ecologie van het estuarium in eerste instantie vooral meer kennis op meso- en microschaal noodzakelijk. De processen op de grotere schalen sturen vooral de hoogteligging en de arealen van de verschillende fysiotopten, terwijl de op dit moment belangrijkste ecologische vragen meer samenhangen met de dynamiek op kleinere en kortere schaal en slibtransporten:

- De voorspelling van het bodemslibgehalte onder invloed van de morfodynamische omstandigheden.
- De invloed van morfodynamiek op de troebelheid.
- De voorspelling van netto en bruto sedimentatie en erosiesnelheden op kleine schaal, zoals op platen en langs de randen van schorren.

Net als bij de interactie tussen morfologische dynamiek en de kwaliteit van water en bodem blijkt dus ook hier vooral behoefte aan meer kennis op de laagste schaalniveaus.

4.5 Conclusies en hypothesen

De rol van morfologische dynamiek voor de veiligheid van de Westerschelde komt voornamelijk indirect tot uiting in de mogelijke invloed van morfologische veranderingen op de waterstanden en de hydrodynamische condities in het estuarium. Deze processen spelen zich vooral af op het macroschaal niveau, al is bodemwrijving tevens afhankelijk van ontwikkelingen op lagere schaalniveaus. De interactie van lagere schaalniveaus wordt beperkt geacht. Overigens stelt de veiligheid van de Westerschelde juist op het macroschaal niveau sterke beperkingen aan de ruimte voor morfologische dynamiek door fixatie van de geulwanden. Hierdoor wordt ook de directe invloed van morfologische dynamiek op de veiligheid (ondermijning van waterkeringen) in de huidige situatie beperkt geacht.

De rol van morfologische dynamiek voor de kwaliteit van water en bodem komt voornamelijk tot uiting in de verspreiding van slib over het estuarium. Dit geldt met name voor de bodemkwaliteit, maar omdat de waterkwaliteit via sedimentatie en resuspensie processen hiervan afhankelijk is, is er ook een verband tussen de waterkwaliteit en morfologische dynamiek. Dit geldt sterker naarmate het aangevoerde water schoner wordt en de waterkwaliteit meer afhankelijk wordt van de grote voorraad in de bodem opgeslagen vervuilende stoffen. Dit geldt in sterke mate voor de Zeeschelde, maar ook voor de Westerschelde. Het verband tussen morfologische dynamiek en de kwaliteit van het Scheldewater via de waterbeweging is wat minder sterk: toename van de getijdoordringing zal wellicht een verschuiving van het turbiditeitsmaximum tot gevolg hebben, maar veel gevolgen voor waterkwaliteitsparameters worden daar niet van verwacht.

De rol van morfologische dynamiek voor de ecologie van het estuarium is op alle schaalniveaus herkenbaar. Op de hoogste schaalniveaus (de mega- en macroschaal) verloopt de interactie via de saliniteitsgradiënt over het estuarium. Veranderingen in morfologische dynamiek kunnen door veranderingen in de waterbeweging veranderingen in de zoutgradiënt en daarmee de troebelheid over het estuarium tot gevolg hebben, waardoor de ligging van verschillende habitats in de lengterichting van het estuarium verandert. Overigens wordt deze invloed niet zeer groot geacht. Op macro- en mesoschaal niveau bestaat de interactie tussen morfologische dynamiek en ecologie vooral uit de invloed van

de morfologische ontwikkelingen op de hoogteligging van platen en slikken. Hierdoor worden overstromingsduur en -diepte en arealen van bepaalde fysiotopen bepaald. Ook bepaalt morfologische dynamiek op macro- en mesoschaal mede de verspreiding van slib over het estuarium. Op de laagste schaalniveaus vindt de interactie tussen ecologie en morfodynamiek vooral plaats door sedimentatie-erosieprocessen. Hierdoor wordt de sedimentgradatie op een bepaalde plaats in het estuarium bepaald, wat weer een belangrijke fysische randvoorwaarde is voor de verschillende habitats.

4.5.1 Nieuwe hypothesen

1. Bij een toename van de morfologische dynamiek in de slibrijke delen van de Zeeschelde en het oostelijk deel van de Westerschelde kan de waterkwaliteit afnemen als gevolg van het vrijkomen van significante hoeveelheden vervuilende stoffen. Door verdere verspreiding van deze stoffen kan de kwaliteit van het bodemmateriaal in slikken en schorren van de Westerschelde ook verslechteren.
2. Er bestaat een directe relatie tussen morfologische dynamiek en voor de beheerder relevante aspecten zoals de kenmerkendheid, de compleetheid, de natuurlijkheid en het zelfregulerend vermogen van het estuarium. Bij een afname van de morfologische dynamiek nemen deze aspecten ook af.

4.5.2 Kennistekorten

- Interactie van de waterkolom met de bodem (sedimentatie - erosie processen). (4-1)
- Effect van morfodynamiek op troebelheid. (4-2)
- Verspreiding van slib over het estuarium, kwantificering van netto en bruto slibtransporten. (4-3)
- Percentage slib in de bodem op een bepaalde plaats en op een bepaald tijdstip. (4-4)

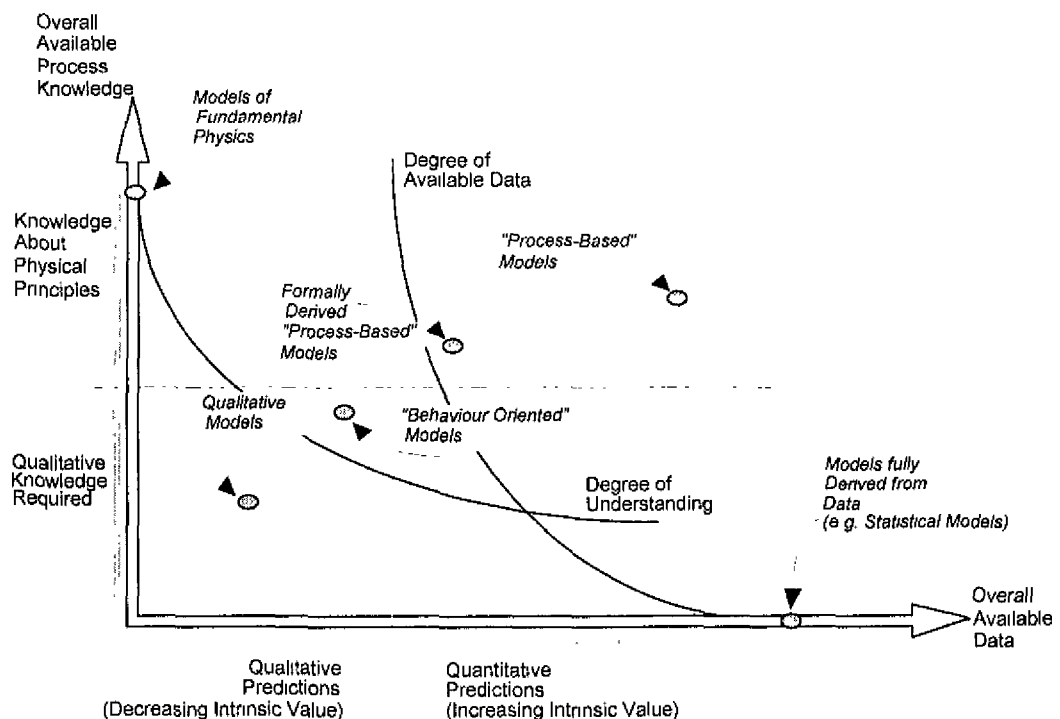
5 Onderzoeksbenaderingen

5.1 Inleiding

Nadat in de voorafgaande hoofdstukken een overzicht is gegeven van de huidige kennis van morfologische dynamiek en van de belangrijkste kennistekorten op dat terrein, wordt in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de ter beschikking staande onderzoeksmethoden. De geconstateerde kennistekorten kunnen dan samen met deze beschikbare onderzoeksmethoden in het volgende hoofdstuk worden geïntegreerd tot een samenhangende serie onderzoeksvoorstellen.

5.2 Onderzoeksbenaderingen: generiek

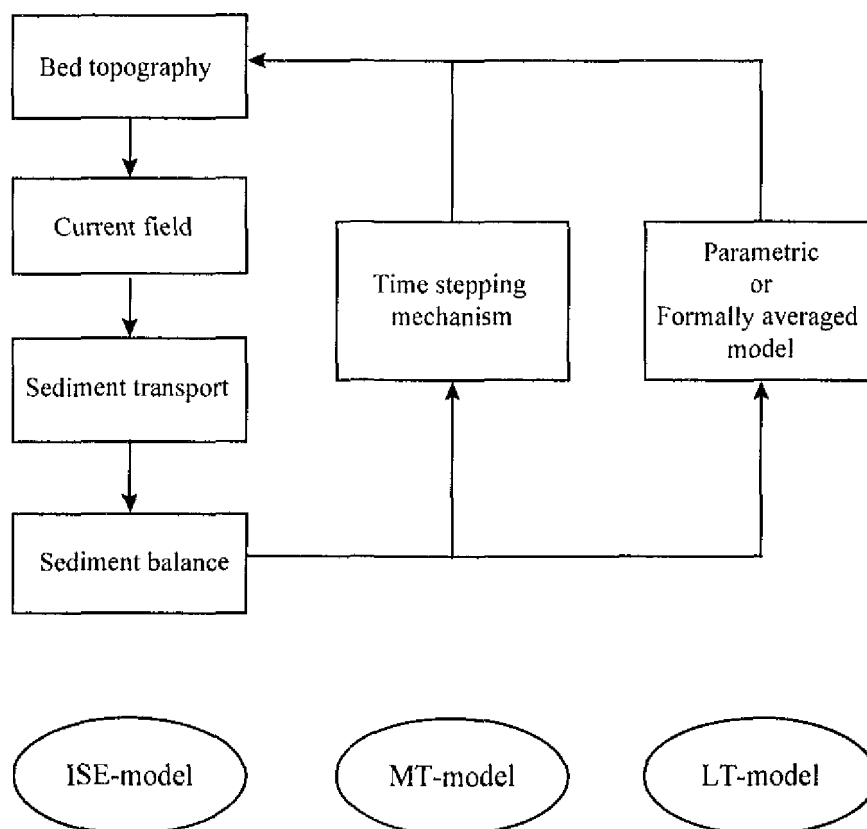
Algemeen gesproken kunnen onderzoeksbenaderingen worden geklassificeerd volgens het type informatie waarop zij zijn gebaseerd: proceskennis, datakennis of een combinatie van beide. De verhouding tussen het gebruik van deze twee 'kennisbronnen' bepalen de aard van de onderzoekstechniek (figuur 5-1). Aan de ene zijde van het spectrum bevinden zich methoden die systemen beschrijven waarvan de fysische processen goed worden begrepen, maar waarvoor nog onvoldoende waarnemingen beschikbaar zijn. Een voorbeeld hiervan is het recent gemeten gedrag van neutrino's, waarvan de eigenschappen reeds decennia lang op theoretische gronden werden voorspeld maar waarvan pas onlangs de eerste waarneming kon worden geregistreerd.



Figuur 5-1 Modelklassificatie aan de hand van beschikbare data en proceskennis

Aan de andere kant van het spectrum vindt men modellen die systemen beschrijven waarvan het gedrag uitputtend is vastgelegd door middel van gemeten data. Voor morfodynamische systemen van estuaria is geen van deze twee extremen van toepassing: de fysische processen zijn zeker niet geheel bekend en data is niet onbeperkt beschikbaar.

Voor morfologische dynamiek heeft men in praktijk dus te maken met de vier typen modellen die zijn afgebeeld in het midden van figuur 5-1, zoals ook beschreven in paragraaf 5.3. Voor problemen op verschillende schaalniveaus zijn vaak verschillende typen modellen nodig. Lange-termijn voorspellingen gebaseerd op het draaien van kleinschalige modellen voor een lang tijdsinterval is waarschijnlijk niet de beste aanpak. Om vanuit de fysische kennis op kleine schalen tot modellen voor grootschalige problemen kan gebruik gemaakt worden van model-reductie. Dit is gebaseerd op het idee dat, door gebruik van min of meer formele analyse en integratie methoden, het model tot de gewenste schaal kan worden omgezet zonder de details van kleinschalige effecten te beschrijven. Een voorbeeld is getoond in figuur 5-2. Door gedetailleerd stroming en sedimenttransport te modelleren kan men komen tot de initiële bodemniveau verandering (het initiële sedimentatie-erosie model). Maar om morfologische ontwikkelingen over langere tijd te simuleren kan men gebruik maken van het feit dat morfologische tijdschaal veel groter is. Terugkoppeling van de bodem naar de waterbeweging vindt dus alleen na elke *morfologische* tijdstap plaats. Zo ontstaat het middellange termijn model. Voor voorspellingen op nog langere tijdschaal is men aangewezen op parameterisatie of middelingstechnieken.



Figuur 5-2 Morfologische modelconcepten

De belangrijkste methoden voor modelreductie voor morfologische problemen zijn:

1. Reductie van het aantal aanroepen van dure modules.
2. Introductie van eenvoudige methoden voor de aanpassing van stroming na kleine bodemniveau veranderingen, bijvoorbeeld continuïteits correctie.
3. Semi-empirische middeling over ruimte en tijd.
4. Formele modelreductie en analyse.

Bij rivier- en kustmorfologie heeft de laatste aanpak succes gehad, vooral in combinatie met stabiliteitsanalyse. Dit wordt toegepast voor het verklaren van ritmische morfologische verschijnselen. Na de model vereenvoudiging is een basistoestand gedefinieerd, die een oplossing is van het vereenvoudigde model zonder de te verklaren verschijnselen. Door het bekijken van de ontwikkelingen van kleine verstoringen op de basistoestand worden de verstoringen die de neiging hebben om te groeien geïdentificeerd. De verstoringen die het snelst groeien worden gerelateerd aan de verschijnselen die men waarneemt in het veld.

5.3 Praktisch: inventarisatie beschikbare technieken

Als fysische schaalmodellen buiten beschouwing worden gelaten (wegens onoverkomelijke nadelen zoals de hoge kosten) geeft de inleiding van De Swart bij de workshop (bijlage B) een compleet beeld van de mogelijke technieken voor het voorspellen van morfologische ontwikkelingen. Hieronder wordt de nadruk vooral gelegd op toepassingen op de Westerschelde en een analyse op de mogelijkheden en onmogelijkheden van de technieken.

Met het woord model worden twee verschillende begrippen bedoeld, namelijk het generieke instrument en de specifieke applicatie modellen. Het is goed om deze twee dingen duidelijk van elkaar te onderscheiden. Zo is Delft3D-MOR een software pakket, dus een instrument. Hetzelfde geldt voor ESTMORF en ASMITA. Een generiek instrument kan ook een methode zijn, zoals de stabiliteitsanalyse. Een applicatie model ontstaat wanneer een bepaald instrument op een bepaald gebied voor een bepaald probleem is toegepast. Een voorbeeld hiervan is het model voor de drempel van Hansweert, opgezet met behulp van Delft3D-MOR (Groenewoud, 1997).

Zoals door De Swart aangegeven bij de workshop (zie ook De Vriend & Ribberink, 1996) kunnen vier modeltypen worden onderscheiden: procesgeoriënteerde modellen, geïdealiseerde modellen, (semi-) empirische modellen en datagedreven modellen. Hieronder wordt per modeltype geïnventariseerd welke generieke instrumenten beschikbaar zijn, welke applicatiemodellen voor de Westerschelde beschikbaar zijn, wat de mogelijkheden en tekortkomingen van deze instrumenten en applicatiemodellen zijn en welke ontwikkelingen op niet al te lange termijn mogelijk zijn.

5.3.1 Procesgeoriënteerde modellen

Als generieke instrumenten van dit type zijn op dit moment twee 2D/3D systemen beschikbaar: het SIMONA systeem en het Delft3D systeem. De twee systemen vertonen veel overeenkomsten, vooral wat betreft stromingsmodellering en golfmodellering. Dit maakt het mogelijk dat een applicatiemodel opgezet in het ene systeem makkelijk om te zetten is naar het andere systeem. Verder is ook het SOBEK 1D-netwerk systeem beschikbaar.

Bij de 2D/3D systemen is wat betreft morfologische berekeningen het Delft3D systeem op dit moment het verst ontwikkeld. Daarom wordt alleen de stand van zaken van dit systeem hier besproken. In het systeem zijn op dit moment de 3D stromingsmodule, de golfmodule, de quasi-3D sedimenttransport module en de bodemveranderingsmodule geïmplementeerd. De quasi-3D sedimenttransport module maakt gebruik van de 2DH-mode van de stromingsmodule, gecombineerd met een secundair stromingsmodel dat de secundaire stroming in de dwars richting ten gevolge van kromming van de stroomlijnen en de Coriolis kracht weergeeft. Zowel slib als zand kunnen (apart) worden gemodelleerd en voor zand wordt onderscheid gemaakt tussen bodemtransport en zwevend transport. Ondanks de beschikbaarheid van de 3D stromingsmodule is 3D sedimenttransport nog niet geïmplementeerd in het systeem. In het quasi-3D ontbreekt nog de secundaire stroming in langsrichting (de vorm van het stroomsnelheidsprofiel is anders bij versnellende stroming dan bij vertragende stroming). Dit proces kan een belangrijke rol spelen bij drempelvorming. Verder is het ook nog niet mogelijk zand en slib tegelijk te simuleren.

Het 1D-netwerk systeem SOBEK is in de eerste instantie voornamelijk opgezet voor riviertoepassingen. Maar gezien het voordeel van de snelle rekentijd en de specifieke schematisatie biedt dit systeem ook mogelijkheden voor estuaria zoals de Westerschelde. Een specifieke toepassing van dit systeem kan zijn het analyseren van de stabiliteit van meergeulen systemen onder invloed van baggeren en storten. Dankzij het EENDMORF project (in het kader van DYNASTAR) is hiervoor een solide theoretische basis gelegd. Voor dit specifieke probleem, dat erg belangrijk is voor de morfologische dynamiek op macro-schaal, bieden de 2D/3D systemen voorlopig nog onvoldoende mogelijkheden, onder andere vanwege de beperkingen in de simulatieduur.

Tot nu toe is de toepassing van de procesgeoriënteerde modellen in de Westerschelde beperkt geweest. Er zijn twee applicatiemodellen met het Delft3D systeem bekend: het model voor de drempel bij Hansweert (Groenewoud, 1997) en het Scheldebekken model dat wordt opgezet voor het Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout in België. Het tweede model is echter alleen nog een sedimenttransport model. Het enige model dat is opgezet met behulp van het SOBEK systeem is het model op basis van de reeds lang bestaande IMPLIC schematisatie (Fokkink, 1997). Geconcludeerd moet worden dat er nog onvoldoende ervaring is met de toepassing van de procesgeoriënteerde modellen in de Westerschelde. Wellicht zijn nog veel mogelijkheden van dit type modellen onbenut voor de oplossing van de problemen in dit estuarium.

De mogelijkheden van de procesgeoriënteerde modellen zitten vooral bij het verkrijgen van inzichten en korte termijn voorspellingen. Voorspellingen met deze modellen dienen vergelijkenderwijs te gebeuren. Wat schaalniveau betreft zitten de mogelijkheden vooral bij macro- en meso-schaal morfologische dynamiek. De beschikbare simulatieduur, vooral wat de 2D/3D modellen betreft, is echter nog te kort ten opzichte van de relevante tijdschalen die bij de macro-schaal dynamiek horen. Onderzoek naar een efficiëntere manier van simuleren is nodig om deze beperking op te heffen. Op zich biedt het Delft3D systeem hier wel mogelijkheden voor. Het probleem ligt bij input-filtering, interpretatie van resultaten en dergelijke.

Korte samenvatting ten behoeve van de onderzoeksplannen:

- Implementeren van het 3D effect, vooral in de langsrichting, in de 2D/3D systemen is nodig.

- De combinatie van zand met slib is nog niet goed te modelleren, hiervoor is fundamenteel onderzoek nodig.
- Er wordt meer toepassing van de beschikbare instrumenten, zowel 2D/3D als 1D, sterk aanbevolen om de benodigde ervaring op te doen.
- Er is onderzoek nodig om de simulatieperiode te verlengen, om zodoende studie naar problemen met betrekking tot morfologische dynamiek mogelijk te maken. Combinatie met andere modeltypen wordt aanbevolen.

5.3.2 Geïdealiseerde modellen

Er zijn nog geen generieke instrumenten (software pakketten) beschikbaar voor het opzetten van geïdealiseerde modellen, wel zijn er methoden ontwikkeld. Dit heeft te maken met het feit dat dit type modellen geheel is gebaseerd op specifieke schematisaties. Voor ieder ander probleem worden andere schalen gekozen en specifieke vereenvoudigingen en aannamen gedaan. Een veel gebruikte techniek hierbij is de stabiliteitsanalyse, zowel lineair als niet-lineair. Er zijn veel ontwikkelingen op dit gebied in de afgelopen jaren (zie paragraaf 2.4, de literatuurscan).

Toepassingen van dit type modellen voor estuaria in het algemeen en voor de Westerschelde in het bijzonder zijn nog maar beperkt beschikbaar. Toepassing op estuariene omgevingen is achtergebleven vergeleken met toepassingen voor rivier- en kustproblemen. Voor de Westerschelde zijn de enige toepassingen: het 1-tak model van De Jong en Heemink (1995) en de simpele stabiliteitsanalyse van het meergeulen systeem onder invloed van baggeren en storten (WL | DELFT HYDRAULICS, 1997). Verder is kort geleden gestart een 2D analyse van het vloed- en eb-geulen systeem door Schuttelaars. Het model van De Jong en Heemink is ontwikkeld met het oog op de mega-schaal dynamiek. De beide andere modellen zijn toegespitst op de macro-schaal dynamiek. Blijkbaar zijn de mogelijkheden van dit type modellen nog onvoldoende benut voor estuaria in het algemeen en voor de Westerschelde in het bijzonder.

Veelbelovende vooruitgang wordt voorzien wanneer geïdealiseerde modellen in combinatie met procesgeoriënteerde modellen zullen worden toegepast. De geïdealiseerde modellen kunnen vooral van dienst zijn bij het bepalen van de simulaties die met de procesgeoriënteerde modellen moeten worden uitgevoerd en bij de interpretatie van de uitvoerresultaten van de procesmodellen.

Korte samenvatting ten behoeve van de onderzoeksplannen:

- Verder ontwikkelen van toepassingen voor de Westerschelde.
- Toepassen in combinatie met procesmodellen.

5.3.3 (Semi-) Empirische modellen

Voor de Westerschelde zijn de (semi-) empirische modellen misschien het verst ontwikkelde type modellen, dankzij het ESTMORF project. De beschikbare generieke softwarepakketten zijn ESTMORF en ASMITA. Het programma van Van Dongeren en De Vriend en het wat oudere EMPREL programma behoren ook tot deze categorie (Van Dongeren & De Vriend, 1994).

Het basisconcept van ESTMORF en ASMITA is in principe hetzelfde. Het verschil tussen de twee zit in de schematisatie van de geometrie. ESTMORF is toegespitst op netwerk systemen en gekoppeld aan een netwerk stromingsmodel. ASMITA is daarentegen geschikt voor een aantal willekeurig gedefinieerde morfologische eenheden. De basis van dit type modellen wordt gevormd door empirische relaties die het morfologische evenwicht in een estuarium definiëren. De kwaliteit van deze relaties bepaalt in hoge mate de prestaties van de modellen. Dit verklaart bijvoorbeeld waarom dit type modellen veel beter presteert voor geulen dan voor platen. Er is een applicatiemodel voor de Westerschelde beschikbaar, gebaseerd op ESTMORF. Dit model is gebaseerd op de bestaande IMPLIC schematisatie. Deze toepassing is succesvol gebleken. Ook is gebleken dat de schematisatie verbeterd kan worden door meer vanuit een morfologische invalshoek te kijken. Naast de ESTMORF toepassing zijn twee ASMITA modellen voor de Westerschelde beschikbaar. Het ene model gebruikt de lodingsvakken in het estuarium als morfologische eenheden, in combinatie met het mondingsgebied. Het andere model is gebaseerd op de morfologische schematisatie van Huijs (1996). Het is gebleken dat simulaties van grootschalige, lange-termijn morfologische ontwikkelingen hiermee goed mogelijk zijn.

Behalve de afhankelijkheid van goede empirische relaties voor het morfologische evenwicht, is de rigide schematisatie een andere belangrijke beperking van dit type modellen. Er is bijvoorbeeld geen mogelijkheid voor het ontstaan van een nieuwe geul. Dit betekent dat de voorspellingsduur korter kan zijn dan de mogelijke simulatieduur, afhankelijk van de gedetailleerdheid van de schematisatie van de geometrie. De voor- en nadelen van dit type model zijn complementair met die van de procesgeoriënteerde modellen. Daarom wordt sterk aanbevolen dit type modellen in combinatie met procesgeoriënteerde modellen toe te passen.

Korte samenvatting ten behoeve van de onderzoeksplannen:

- Operationaliseren van de nu bestaande modellen.
- Toepassen van ESTMORF op een andere (meer morfologisch ingedeelde schematisatie).
- Toepassen in combinatie met procesgeoriënteerde modellen.

5.3.4 Datagedreven analyse en modellering

In deze paragraaf wordt een aantal data georiënteerde technieken beschreven die perspectieven kunnen bieden voor het vaststellen en kwantificeren van relaties die worden ontleend aan datasets. Bij deze data analyse worden in grote lijn twee uitgangspunten onderscheiden. Enerzijds is dat *data analyse*, waarbij bij het afleiden van relaties en afhankelijkheden de beschikbare data niet vooraf wordt onderscheiden in oorzaken (input) en gevolgen (output). Anderzijds is dat *data modelling*, waarbij black-box modellen worden gekonstrueerd om de afhankelijkheid van de ene set van grootheden van een andere set vast te stellen, ofwel input-output relaties. Voor een nauwkeurige beschrijving van deze technieken wordt verwezen naar bijlage D. In het navolgende wordt een samenvatting van deze bijlage gegeven.

Opgemerkt wordt dat de hier gepresenteerde lijst van technieken zeker niet volledig is. Op het moment dat de analyse technieken daadwerkelijk moeten worden toegepast kan het noodzakelijk zijn om alternatieve technieken in te zetten, technieken te combineren, of zelfs speciale technieken te ontwikkelen, gegeven de te hanteren doelstelling en de daarvoor beschikbare data. Daarnaast, en wellicht ten overvloede, zij vermeld dat de resultaten van

data-georiënteerde analyse en modelleertechnieken alleen diagnostische waarde hebben. Dat houdt in dat zij relaties identificeren en kwantificeren, maar zeker niet fysisch verklaren. Dat laatste is de taak van de gebruiker bij de interpretatie van de resultaten.

Data analyse technieken

Deze technieken variëren van relatief eenvoudige algemene statistische data analyse via korrelatie en spectraal analyse tot multi-variate analyse op basis van principal components analysis en clusterings technieken. In het eenvoudigste geval wordt gedacht aan standaard visualisatie en statistische analyse van de beschikbare gegevens. Dit omvat onder andere scatterplots voor het visualiseren van afhankelijkheden, het karakteriseren van de data aan de hand van hun statistische verdeling, bijvoorbeeld in de vorm van belangrijke kentallen en trendanalyse. Een groot aantal van deze methoden is reeds toegepast op de data die voor de Westerschelde voorhanden is. Met behulp van korrelatiefuncties kunnen afhankelijkheden in de temporele en ruimtelijke evolutie van reeksen (tijd of plaats) worden gedetekteerd en gekwantificeerd. Daarnaast kunnen uit spektraal analyse tijd of ruimte schalen worden herkend. Bij de interpretatie van de resultaten dienen deze te worden gerelateerd aan de fysische processen, zoals die op basis van systeemkennis verwacht worden een rol te spelen. Principal Components Analysis (PCA) is een multivariate analyse techniek. Het idee van PCA is om in een dataset combinaties van de gemeten parameters te vinden die het grootste deel van de spreiding in die dataset verklaren. Hiermee worden niet alleen de dominante afhankelijkheden in de dataset kwantitatief beschreven, ook kan datareduktie worden toegepast. Deze en gerelateerde methoden hebben dus als voordeel dat het meest significante deel aan een dataset kan worden onttrokken, dat daarna nader geëvalueerd en geïnterpreteerd moet worden, bijvoorbeeld door deze te relateren aan fysische systeemkennis. Clustertechnieken tenslotte, zijn belangrijke hulpmiddelen voor klassifikatie binnen een gegeven data set, dat wil zeggen het detekteren van deelverzamelingen die binnen het totaal ten opzichte van elkaar gescheiden liggen. Zo'n scheiding kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een andere ruimtelijke of temporele herkomst van de betreffende samples, grote veranderingen in de externe forcering (bijvoorbeeld events) of intrinsieke eigenschappen van het systeem waaraan de data ontleend is.

Data-georiënteerde modelleertechnieken

Hierbij kan worden gedacht aan regressie technieken, neurale netwerken en overdrachtsfuncties. Het meest bekend zijn lineaire regressie technieken, waarbij op basis van gemeten waarden de parameters van een lineair model worden geschat, bijvoorbeeld met behulp van een kleinste kwadraten methode. De input en output kunnen multi-dimensionaal zijn. Deze aanpak is statisch omdat tijds- of plaatsafhankelijkheid geen rol speelt (en de volgorde van de input-output combinaties er niet toe doet). De lineaire aanpak kan overigens zonder veel moeite naar een niet-lineaire regressie worden uitgebreid door hogere orde combinaties van de input grootheden mee te nemen. Het probleem is hierbij een goede bovengrens van die orde te vinden (waarbij zo mogelijk systeemkennis moet worden ingebracht). Neurale Netwerken zijn black-box modellen, waarmee niet-lineaire functies willekeurig dicht kunnen worden benaderd. Neurale Netwerken zijn ook volledig geparameteriseerd, en de parameters (de gewichten in het netwerk) moeten aan de hand van een dataset van input-output combinaties worden geïdentificeerd. Zo kan een Neuraal Netwerk worden gezien als een generalisatie van lineaire regressie. Dankzij zijn structuur kan een Neuraal Netwerk echter met aanzienlijk minder parameters veel beter niet-lineaire relaties modelleren dan standaard niet-lineaire regressie technieken. Overigens zijn in het algemeen nog steeds relatief omvangrijke datasets nodig om een Neuraal Netwerk toe te

kunnen passen. Bij de hier genoemde modelleertechnieken werd steeds uitgegaan van statische datasets, dat wil zeggen dat de diverse input-output combinaties niet in de tijd (of plaats) zijn gekoppeld. Dat is wel het geval als men de overdrachtsfunctie van één of meer input tijdreeksen (of ruimtelijk patronen) naar een output reeks wil bepalen, om op deze manier een dynamisch systeem te beschrijven. Voor het bepalen van de overdrachtsfuncties van zo'n dynamisch systeem zijn vanouds de bekende lineaire black-box modellen bekend. Zulke modellen bestaan eruit dat de output van een bepaalde tijdstap wordt bepaald door een lineaire weging van de output van één of een aantal voorafgaande tijdstappen, en de input (forcing) van een aantal voorafgaande tijdstappen. Ook hier is een elegante en krachtige niet-lineaire generalisatie mogelijk op basis van Neurale Netwerken. Deze bestaat uit zogenaamde Auto-Regressieve Neurale Netwerken zoals die onlangs bij WL zijn ontwikkeld, geïmplementeerd en toegepast. Voor het modelleren van niet-lineaire transferfuncties lijken deze veel perspectief te bieden (Van den Boogaard *et al.*, 1998).

Toepassing van data-gedreven modelleertechnieken

Opgemerkt wordt dat, gezien de huidige stand van zaken bij het toepassen van dit soort analyse en modelleermethoden, het niet voor de hand ligt om te starten bij de meer gecompliceerde methoden. Op dit moment worden bij de analyse van de aanzienlijke hoeveelheid data die van de Westerschelde beschikbaar is vrijwel alleen gebruik gemaakt van enkelvoudige regressie en correlatie analyse. Voorgesteld wordt om iteratief te werken en de toepassing van data-gedreven technieken te combineren met andere vormen van modellering. Uitgaande van de beperkingen van het huidige modelinstrumentarium (zowel wat betreft de fysische onderbouwing als wat betreft mogelijkheden voor voorspelling en wat betreft technische beperkingen zoals rekentijd) kunnen de hiervoor beschreven analyse methoden worden ingezet om relaties, afhankelijkheden en verbanden in de beschikbare dataset te achterhalen. Met behulp van deze kennis kunnen vervolgens de modelformuleringen worden versterkt. Bij de keuze voor een bepaalde methode wordt geadviseerd om de hier beschreven volgorde (ruwweg) te hanteren. Hiermee wordt voorkomen dat in eerste instantie een complexe analyse methode wordt gehanteerd, waarvan de uitkomsten fysisch niet of moeilijk interpreteerbaar blijken.

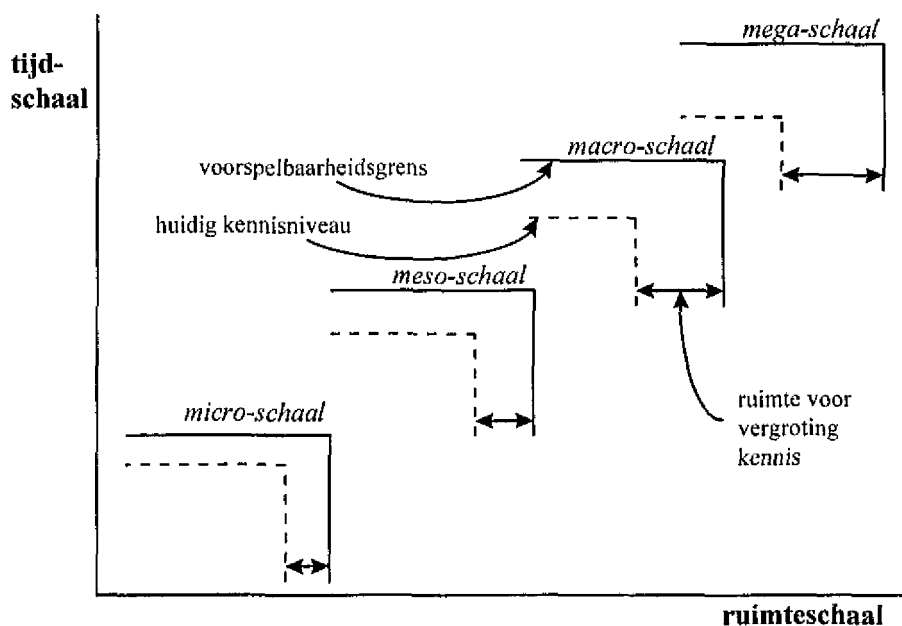
Een succesvol resultaat van een op een dergelijke manier aangepakt onderzoek betreft het inverse sedimenttransport model, dat door WL in opdracht van het RIKZ is opgezet voor de Eems-Dollard (Mulder & Mijwaard, 1997).

5.3.5 Andere instrumenten

Noemenswaardig is de ontwikkeling van het Estuarine Decision Support System voor de Westerschelde, in het kader van LWI programma Estuaria. Binnen dit Decision Support System is een aantal modules ontwikkeld waarmee de effecten van verschillende beheersmaatregelen op het milieu van de Westerschelde kunnen worden voorspeld. Achter een aantrekkelijke gebruikers-interface gaan al dan niet vereenvoudigde versies schuil van enige hiervoor genoemde modellen. Speciale aandacht is besteed aan de interactie tussen verschillende beheersaspecten, zoals bijvoorbeeld morfologie en ecologie. Dit instrument kan vooral van dienst zijn bij het meer toegankelijk maken van de resultaten van complexe modelberekeningen.

5.4 Praktisch: stand van zaken en reële doelen Westerschelde

Geconstateerd wordt dat morfodynamische ontwikkelingen niet op ieder willekeurig detailniveau voorspelbaar zijn. Als gevolg van bijvoorbeeld het stochastische karakter van de natuurlijke aandrijving van verschillende morfodynamische processen is er in de praktijk sprake van een zekere voorspelbaarheidsgrens. Dit geldt voor de morfologische dynamiek op ieder schaalniveau (figuur 5-3). De voorspelbaarheidsgrens is de uiterste limiet die met nu en in de toekomst beschikbare voorspeltechnieken kan worden bereikt. Voor overschrijding van deze grens is aggregatie naar een hoger schaalniveau noodzakelijk, waarbij een passende sluthypothese voor de invloed van het lagere schaalniveau moet worden gehanteerd. Een voorbeeld hiervan is de onmogelijkheid om het gedrag van megaribbels (microschaal) te voorspellen op een termijn van tientallen jaren (macroschaal). De voorspelbaarheidslimiet ligt hier waarschijnlijk bij het beschrijven van de exacte vorm en afmetingen van ribbels onder bepaalde hydraulische omstandigheden. Voor voorspellingen over het gedrag van het estuarium op langere termijn moet worden overgegaan op een hoger schaalniveau, waarbij de invloed van megaribbels bijvoorbeeld als bodemruwheid wordt meegenomen.



Figuur 5-3 Verhouding tussen bestaande kennisniveau en de voorspelbaarheidsgrens op verschillende schaalniveaus

Naast de voorspelbaarheidslimiet wordt de huidige mogelijkheid tot voorspelling gelimiteerd door de beschikbare kennis. Tussen de voorspelbaarheidslimiet en het huidige kennisniveau ligt de ruimte voor vergroting van kennis. Voor de huidige definitiestudie is het zeer belangrijk juist deze ruimte te identificeren en op een zo goed mogelijke manier te voorzien in opvulling ervan. In eerste instantie moet hiervoor het huidige kennisniveau worden vastgesteld. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen de datakennis, modelkennis en algemene kennis van het natuurlijke systeem. Dit kennisniveau kan per schaalniveau worden vastgesteld (figuur 5-3).

Rijkswaterstaat heeft in de loop van de jaren zeer veel data verzameld voor de Westerschelde, onder ander binnen het kader van het OOSTWEST studie. Een goed

overzicht van de huidige toestand van de Westerschelde is gegeven door Mol *et al.* (1997). Over het algemeen kan worden gesteld dat de beschikbaarheid van data over de Westerschelde niet het grootste probleem vormt. De huidige meet- en monitoringprogramma's (onder ander voor het project MOVE, MOnitoring VERdieping) bieden ook in de toekomst naar alle waarschijnlijkheid garantie voor voldoende data. Wel is tijdens de OOSTWEST studie gebleken dat ondanks de grote hoeveelheid beschikbare data, het moeilijk is de ontwikkeling op megaschaal kwantitatief nauwkeurig vast te stellen. De belangrijkste oorzaak van dit probleem is dat de bodempeilingen voor verschillende delen van de Westerschelde in verschillende perioden werden uitgevoerd. Met de klassieke techniek van peilen is het onmogelijk dit probleem op te lossen. Wellicht bieden remote sensing technieken in de toekomst uitkomst voor dit probleem. Een ander probleem met de grote hoeveelheid beschikbare data is de toegankelijkheid (die juist door de grote hoeveelheid wordt belemmerd) voor de beheerder en ook voor onderzoekers. Voor wat betreft de morfologische dynamiek kunnen de indicatoren zoals gedefinieerd in de huidige studie fungeren als methode voor datareductie. Mede om deze reden is het belangrijk aandacht te besteden aan het onderzoek naar indicatoren voor morfologische dynamiek. Overigens moet worden opgemerkt dat een ander groot probleem bij het beoordelen van gemeten data de moeilijkheid om natuurlijke ontwikkelingen los te koppelen van de gevolgen van menselijke ingrepen is.

Modellen:	Procesgestuurd	Geïdealiseerd	Semi-empirisch	Data gedreven
megaschaal	2D/3D stromingsmodellen (RWS)	-	ASMITA (WL)	-
macroschaal	Delft3D-MOR (Groenewoud) SOBEK (RWS - WL)	UU onderzoek	ESTMORF (RWS-WL)	JARKUS analyse
mesoschaal	Delft3D-MOR (Jeuken)	-	-	-
microschaal	-	-	-	-

Tabel 5-1 Toepasbaarheid verschillende modelsoorten op de verschillende schaalniveaus.

De algemene kennis, vooral wat betreft het kwalitatieve gedrag van het morfodynamische systeem in de Westerschelde, kan ook als voldoende worden beschouwd. Het belangrijkste knelpunt wordt gevormd door de gebrekkige methoden om kwantitatieve voorspellingen te kunnen opstellen. Om deze reden is er juist met modelonderzoek het meeste te bereiken bij het dichten van het gat tussen het huidige kennisniveau en de voorspelbaarheidslimiet. In paragraaf 5.3 is een inventarisatie van nu en in de nabije toekomst beschikbare modelleringstechnieken gegeven. Voor de Westerschelde is de huidige stand van zaken samengevat in tabel 5-1, waarin per schaalniveau globaal is aangegeven welke modellen beschikbaar zijn.

Op het gebied van de procesmodellering is de afgelopen decennia forse vooruitgang geboekt. Tegenwoordig kan men met vrij hoge nauwkeurigheid de waterstand in een estuarium voorspellen, zowel met 1D als met 2D/3D modellen. De meeste modellen zijn echter nog niet in staat de getij-asymmetrie in het hele estuarium goed te reproduceren. In

recente studies (Fokkink, 1997) is gebleken dat voor het goed reproduceren van voortplanting van de hogere getijcomponenten het van belang is om een richtingsafhankelijke bodemruwheid te introduceren. Dit is nog onmogelijk in de huidige generatie 2D/3D waterbewegingsmodellen. De richtingsafhankelijke bodemruwheid kan worden gezien als een gevolg van de interactie tussen de waterbeweging en de morfologische dynamiek op micro-schaal. Er is op dit moment onvoldoende kennis voor het voldoende nauwkeurig voorspellen van de ruwheid. Verbeteringen in deze situatie kunnen ook niet worden verwacht binnen de looptijd van de huidige studie. Zelfs voor rivieren is er nog geen betrouwbare ruwheidsvoorspeller beschikbaar.

De stroomsnelheden zijn al veel minder nauwkeurig te voorspellen dan de waterstand. Dit is een gevolg van onder andere de veel sterkere ruimtelijke variatie in de snelheden, vergeleken met de waterstand. De fouten in de voorspelling van de snelheden worden nog eens versterkt in het sedimenttransport door het niet-lineaire verband tussen deze twee aspecten. Algemeen geldt voor de mogelijkheden om goed te kunnen modelleren dus als volgorde van afnemende nauwkeurigheid:

Waterstand $\Rightarrow$ Stroomsnelheid $\Rightarrow$ Sedimenttransport $\Rightarrow$ Netto transport

Geconcludeerd kan worden dat ook op het procesniveau er nog kennisontwikkeling nodig is voor het begrijpen van morfologische ontwikkelingen in estuaria. Op dit moment gaapt er nog een kloof tussen de proces-gebaseerde morfodynamische modellen en de veldwaarnemingen. De gesimuleerde morfodynamische ontwikkelingen voldoen meestal nog niet aan de empirische relaties tussen de morfologische grootheden en de waterbeweging, afgeleid uit velddata.

Specifiek voor de Westerschelde kan nog het volgende worden opgemerkt. Er zijn voor de Westerschelde krachtige waterbewegingsmodellen voorhanden, maar deze zijn meestal niet gebouwd vanuit een morfologische invalshoek. Het zal niet eenvoudig zijn om deze modellen te koppelen aan sedimenttransport modellen. Daarnaast is er nog relatief weinig ervaring met sedimenttransport modellering en morfodynamische modellering in de Westerschelde. Een eerste stap om hierin wat verandering te brengen is gezet met het uitvoeren van de modelstudie Suspensief Sedimenttransport Westerschelde door WL, in opdracht van RIKZ. In vergelijking met de grote data-kennis is de procesmodellering ver achtergebleven. Opgemerkt wordt dat de resultaten van modellen belangrijke bijdragen kunnen leveren aan de kennisontwikkeling van morfodynamische processen.

Mede aan de hand van bovenstaande overwegingen kan per vak in de matrix een vergelijking worden gemaakt tussen de huidige stand van de kennis en de vooruitgang die met een redelijke inspanning kan worden bereikt. De mogelijkheden voor verdere ontwikkeling en toepassing zijn globaal samengevat in tabel 5-2. Over het algemeen kan worden gezegd dat de potentie van de procesmodellen op dit moment nog onvoldoende worden benut. Op mega-schaal kunnen hiermee weliswaar geen lange-termijn voorspellingen gemaakt worden, maar deze modellen kunnen inzicht verschaffen in de mechanismen die verantwoordelijk zijn voor de import en export van sediment bij de monding. Op macro-schaal en meso-schaal is al onderzoek met Delft3D gestart, zoals het drempelonderzoek en het onderzoek naar kortsluitgeulen. Maar ook voor de plaat-geul uitwisseling en de interactie tussen macro- en meso-schaal dynamiek kunnen procesmodellen nog meer mogelijkheden bieden. Op micro-schaal niveau is er op dit moment nog geen model operationeel. In combinatie met het zand-slib segregatie probleem

kan ook dit schaalniveau met procesmodellen worden bestudeerd. Op het gebied van de geïdealiseerde modellen ligt de estuariene morfologie achter bij rivier- en kustmorfologie. Voor de Westerschelde is door de Universiteit Utrecht net begonnen met dit type modellen voor estuariene toepassingen. Er zijn nog voldoende mogelijkheden op macro-, meso-, en wellicht ook micro-schaal niveau. De semi-empirische modellen zijn inmiddels behoorlijk ver ontwikkeld. Hun toepassingsgebied ligt vooral op de mega- en macro-schaal niveaus. De maximale voorspelbaarheidslimiet wordt hiermee bijna bereikt. Verbeteringen van dit type modellen moet vooral komen van verbeterde evenwichtsrelaties met betrekking tot de platen. Verder dienen zij beter geoperationaliseerd te worden voor effectieve toepassingen. Het gebied van data-gedreven modellen is nog bijna geheel onontgonnen voor de Westerschelde. Mogelijkheden van dit type modellen voor de Westerschelde moeten nog nader onderzocht worden. De grootste kans op succes ligt bij toepassing op de macro- en mesoschaal niveaus.

	proces modellen	geïdealiseerd	semi-empirisch	data gedreven
megaschaal	import/export mechanismen	-	operationaliseren	-
macroschaal	Plaat - geul uitwisseling drempelvorming	stabiliteits analyse parallele geulen toelaatbare grens ingrepen	operationaliseren evenwichtsrelatie platen	analyse veldmetingen
Mesoschaal	interactie met macroschaal	analyse cyclisch gedrag kortsluitgeulen	-	analyse veldmetingen
Microschaal	In combinatie met zand-slib segregatie	?	-	-

Tabel 5-2 Mogelijkheden voor ontwikkeling en toepassing van de verschillende modelsoorten op de verschillende schaalniveaus

Het is duidelijk dat vooruitgang bij het verkleinen van de afstand tussen het huidige kennisniveau en de voorspelbaarheidslimiet niet in iedere cel van tabel 5-2 even gemakkelijk bereikt kan worden. Ook is toepassing van deze vooruitgang bij het dagelijkse beheer van een estuarium als de Westerschelde niet voor alle cellen in gelijke mate mogelijk. Zoals eerder genoemd is de ontwikkeling van semi-empirische modelbenaderingen inmiddels in een vrij ver gevorderd stadium. Diverse gereedschappen die met relatief weinig extra inspanning voor praktisch advieswerk kunnen worden ingezet zijn reeds voorhanden. Aan de andere kant staat de ontwikkeling van geïdealiseerde modelconcepten en de toepassing van geavanceerde data-gedreven analysemethoden nog in de kinderschoenen. Ondanks de hooggespannen verwachtingen, zal praktische toepassing van deze methoden bij het beheer van de Westerschelde ook bij aanzienlijke inspanning nog tenminste enige jaren op zich laten wachten. De toepassing van proces georiënteerde modelsystemen neemt een middenpositie in. Er is nog relatief weinig ervaring met de toepassing van dit soort modellen voor sedimenttransportberekeningen, hoewel de

modelconcepten inmiddels vrij ver zijn ontwikkeld en er reeds praktische software toepassingen voorhanden zijn.

Gezien de eerder beschreven kwaliteiten van de verschillende modelconcepten wordt hier aangeraden de komende jaren te blijven werken aan meerdere modelconcepten. Aanpak en ambities dienen daarbij te worden afgestemd op de benodigde ontwikkelingen. Zo zal voor verdere ontwikkeling van geïdealiseerde modellen nog fundamenteel (inputgestuurd) onderzoek nodig zijn over een termijn van tenminste een aantal jaren, terwijl procesmodellen en zeker semi-empirische modellen op korte termijn kunnen worden ingezet bij praktische toepassingen en oplossing van beheersvraagstukken.

5.5 Conclusies

In het voorafgaande is een overzicht gegeven van de nu beschikbare onderzoeksmethoden en de nu reeds beschikbare toepassingen daarvan op de Westerschelde. Opgemerkt wordt dat de beschikbaarheid van data over de Westerschelde op dit moment relatief goed is. Juist op het gebied van de kwantitatieve verwerking daarvan is echter nog veel te bereiken. De toepassing van de verschillende beschikbare onderzoeksmethoden en modelsystemen is in het voorafgaande uitgesplitst naar de verschillende schaalniveaus. Gezien de voor ieder schaalniveau andere verhouding tussen het huidige kennisniveau en de voorspelbaarheidslimiet, ligt deze aanpak voor de hand. Daarnaast is het duidelijk dat voor de aanpak van een probleem op één bepaald schaalniveau, het te gebruiken gereedschap niet voor alle schaalniveau geschikt hoeft te zijn. Zo hoeft een morfologisch model niet per definitie in staat te zijn om de natuurlijke lange termijn ontwikkeling van het estuarium weer te geven om effecten van bepaalde ingrepen te kunnen voorspellen. Naast deze praktische overweging is het waarschijnlijk niet eens mogelijk om een allesomvattend morfodynamisch model te bouwen. Ook in de toekomst zal een serie modellen van verschillende typen en op verschillende detailniveaus nodig blijven om verschillende vragen van de beheerder te kunnen beantwoorden.

Speciale aandacht is besteed aan de rol die data-gedreven analyse en modeltechnieken zouden kunnen spelen. Gezien de grote hoeveelheid beschikbare data en de relatief geringe inspanning die juist op dit terrein is gepleegd tot nu toe, moet hier flinke vooruitgang kunnen worden geboekt. Hierbij wordt overigens wel nadrukkelijk gesteld dat data-gedreven methoden bij voorkeur moeten worden toegepast in combinatie met en ter wederzijdse ondersteuning van andere modelleertechnieken.

5.5.1 Kennistekorten

- Onvoldoende ervaring met de toepassing van proces gebaseerde modellen voor sedimenttransport en morfodynamische ontwikkelingen. Voor drie-dimensionaal sedimenttransport modellering schiet de bestaande software zelfs tekort. (5-1)
- Onvoldoende kennis van modellering van gegradeerd sediment in het algemeen en met zandslib mengsels in het bijzonder. (5-2)
- Bodemgegevens lijden aan het feit dat verschillende delen van het estuarium op verschillende tijden worden gepeild. Synchrone peilingen zullen alleen mogelijk zijn met nieuwe, innovatieve meettechnieken zoals remote sensing. (5-3)

- De grote hoeveelheid data is niet voldoende toegankelijk. Data reductie met behulp van nieuwe data-analyse technieken en met behulp van indicatoren kan wellicht oplossing bieden. (5-4)
- Gebrek aan goede empirische relaties voor plaathoogte vormt nu een belemmering voor toepassingen van (semi-) empirische modellen. (5-5)
- De mogelijkheden van geïdealiseerde modellen zijn tot nu toe nog onvoldoende benut voor de Westerschelde. (5-6)
- De verschillende typen modellen worden te weinig in combinatie toegepast. (5-7)

6 Onderzoeksplannen

6.1 Inleiding

Uit de analyse van de problematiek omtrent de morfologische dynamiek van de Westerschelde in deze definitiestudie is duidelijk geworden dat er op een aantal belangrijke punten meer proceskennis nodig is om de beheerder te kunnen adviseren om het proces van afnemende morfologische dynamiek te beperken en indien mogelijk de dynamiek zelfs te bevorderen. Deze benodigde kennis kan in twee categorieën worden verdeeld:

1. Algemene kwantitatieve inzichten in morfologische processen. Het is duidelijk geworden dat het behoud van macro schaal dynamiek (meergeulenstelsel) een belangrijk aandachtspunt is. Zonder een meergeulenstelsel zal het estuarium snel gaan verlanden. Geconcludeerd wordt dat er een hoge interactie bestaat tussen de mega schaal en macro schaal dynamiek en macro dynamiek en meso dynamiek. Inzicht in de sturende processen op deze schalen en de interacties tussen deze schalen is van groot belang om de rol van de grootschalige morfologische dynamiek bij de verlanding van het estuarium duidelijk te krijgen.
2. Kennis van ingreep-effect relaties. De belangrijkste ingrepen die op dit moment in de Westerschelde plaatsvinden zijn baggeren en storten. De belangrijkste invloed die de beheerder, via zijn beleid, op deze ingreep kan uitoefenen is het vaststellen van de stortlocaties. De hoofdvraag bij deze menselijke ingreep in de Westerschelde is waar de grens ligt van een dergelijke ingreep waaronder het meergeulenstelsel dusdanig gaat veranderen en dat er allerlei veranderingen gaan optreden op de andere schaal niveaus.

Een belangrijke constatering is dat voor het verkrijgen van deze kennis en inzichten het verder operationaliseren en verbeteren van verschillende type modellen noodzakelijk zal zijn.

Ten aanzien van de rol van morfologische dynamiek voor het estuarium is duidelijk geworden dat er een belangrijke kennislacune zit bij het gedrag van slib. Zowel voor de ecologie en water- en bodemkwaliteit spelen verspreiding van slib in het estuarium en de uitwisselingsprocessen tussen water en bodem een grote rol. Kwantificering van de slibbalans en inzicht in de invloed van morfodynamische processen op het bodemslibgehalte zijn daarbij belangrijke aandachtspunten.

In de paragrafen 6.2 tot en met 6.4 worden onderzoeksvoorstellen met betrekking tot de kwantitatieve processen, ingreep - effect relaties en de rol van morfologische dynamiek verder uitgewerkt. In paragraaf 6.5 wordt kort ingegaan op een aantal lopende onderzoeken in de Westerschelde en worden deze onderzoeken vergeleken met de huidige onderzoeksvoorstellen. Hieruit worden eventuele overlappen en mogelijkheden tot wederzijdse versterking afgeleid. Tenslotte worden de prioriteiten van de verschillende onderzoeken vastgesteld door ze te toetsen aan het belang voor de beheerder, de moeilijkheid en haalbaarheid van het onderzoek, en de relaties tussen de verschillende onderwerpen onderling.

De verschillende onderzoeksonderwerpen worden schematisch weergegeven met behulp van een aantal trefwoorden per onderzoeksonderwerp. De nummers die worden genoemd bij het trefwoord kennistekort verwijzen naar de gesignaleerde kennistekorten in de samenvattingen van de voorafgaande hoofdstukken.

6.2 Algemene kwantitatieve proceskennis

Er is nader onderzoek nodig om de autonome ontwikkelingen te begrijpen en de invloed van menselijke ingrepen op de morfodynamische ontwikkelingen duidelijk te krijgen. De basis hiervoor wordt gevormd door een gedegen proceskennis op de verschillende schaalniveaus en de mogelijke interactie tussen de schalen. Samengevat zijn de volgende kennistekorten herkend:

Op macro schaal is het voorkomen en de stabiliteit van het meergeulenstelsel nog onvoldoende begrepen. Gezien het belang van een meergeulenstelsel voor het estuarium is onderzoek hiernaar van essentieel belang. De voorwaarden voor het ontstaan van kortsluitgeulen en de mechanismen van sediment uitwisseling tussen platen en geulen zijn onvoldoende bekend om de ontwikkelingen in de meso dynamiek te begrijpen. Op micro schaal niveau is het verband tussen de bodemvormen en de hydrodynamische en sedimentologische condities niet duidelijk. De bodemvormen hebben direct invloed op de wrijving die de waterbeweging ondervindt. Kennis op dit gebied is van belang voor de modellen omdat deze nu nog uitgaan van een gegeven ruwheid gedurende de simulatie periode. In 2D/3D modellen kan op dit moment nog geen rekening worden gehouden met richtingsafhankelijke ruwheden.

De volgende onderzoeksonderwerpen kunnen worden gedefinieerd:

Beddingvormen en ruwheid van bodem onder getij omstandigheden.

<i>Aanpak kennistekort</i>	(2-5), (3-4), (3-9), (4-2)
<i>Methodiek</i>	Theoretische analyse, uitbreiding riviertheorieën naar estuaria, 2D model onderzoek
<i>Middelen / inspanning</i>	Gegevens beddingvormen Westerschelde, 2D modelsysteem
<i>Beoogde producten</i>	Ruwheidsvoorspeller onder getijomstandigheden; inzicht in de invloed van micro-schaal dynamiek op macro- en meso-schaal dynamiek
<i>Verwante onderzoekprogramma's</i>	-

Zand-slib segregatie in estuaria

<i>Aanpak kennistekort</i>	(3-9), (3-4), (4-2), (4-3), (4-4), (5-2)
<i>Methodiek</i>	Theoretische analyse, modelonderzoek
<i>Middelen / inspanning</i>	Gegevens slibverspreiding Westerschelde, 2D/3D modelsysteem
<i>Beoogde producten</i>	Methodiek / model voor voorspellen van de bodemsamenstelling
<i>Verwant onderzoek</i>	STW-voorstel van de TU Delft

Ontstaan en gedrag van kortsluitgeulen.

<i>Aanpak kennistekort</i>	(3-2), (3-8), (5-1)
<i>Methodiek</i>	Data analyse, theoretische analyse, modelonderzoek
<i>Middelen / inspanning</i>	2D/3D modelsysteem
<i>Beoogde producten</i>	Inzicht in de voorwaarden voor het ontstaan van kortsluitgeulen, model voor ontwikkeling van kortsluitgeulen en de invloed hiervan op de macrodynamiek
<i>Verwante onderzoekprogramma's</i>	Promotie-onderzoek van Claire Jeuken

Sedimentuitwisseling tussen platen en geulen.

<i>Aanpak kennistekort</i>	(2-5), (3-3), (3-7), (3-8), (5-1)
<i>Methodiek</i>	Modelonderzoek, data analyse
<i>Middelen / inspanning</i>	2D/3D modelsysteem
<i>Beoogde producten</i>	Inzicht in mechanismen en processen die verantwoordelijk zijn voor plaat-geul uitwisseling, parameterisatie in modellen
<i>Verwante onderzoekprogramma's</i>	Verdere ontwikkeling model Estmorf, afstudeerprojecten TU Delft

Drempelvorming

<i>Aanpak kennistekort</i>	(2-5), (3-6), (3-7), (3-8), (3-10)
<i>Methodiek</i>	Modelonderzoek, data analyse
<i>Middelen / inspanning</i>	2D/3D modelsysteem
<i>Beoogde producten</i>	Verbeterd inzicht in processen en mechanismen voor drempelvorming, voorspellingsmodel voor omvang baggerbezwaar
<i>Verwante onderzoekprogramma's</i>	Het drempelonderzoek dat is uitgevoerd door RIKZ Middelburg en het onderzoek Suspensief Sedimenttransport Westerschelde dat door WL wordt uitgevoerd in opdracht van RIKZ. Zie onder andere de aanbevelingen voor nader onderzoek uit het rapport Drempels in de Westerschelde (Verbeek <i>et al.</i> , 1998). Konkrete aanbevelingen betreffen de rol van gefixeerde geulwanden, een nadere analyse van de uitgevoerde modelberekeningen, ontwikkeling van een gevalideerd morfologisch model van de Westerschelde en onderzoek naar de toepasbaarheid van het modelinstrumentarium op de middellange termijn.

Stabiliteit parallelle geulen

<i>Aanpak kennistekort</i>	(3-1), (3-5), (3-10), (5-6), (5-7)
<i>Methodiek</i>	Theoretische analyse, gebruik principe-modellen
<i>Middelen / inspanning</i>	Veldgegevens morfologische ontwikkeling verschillende estuaria
<i>Beoogde producten</i>	Inzicht in de stabiliteit van parallelle geulen, inzicht in het verband tussen het aantal stabiele geulen en andere voorwaarden (zoals de afmetingen van het estuarium, ingrepen, externe forcering, ...)
<i>Verwante onderzoeksprogramma's</i>	Onderzoek van Schuttelaars (IMAU, Universiteit Utrecht)

Ontwikkeling van voorspellingsinstrumenten

De nadruk bij de hiervoor genoemde onderzoeksonderwerpen ligt op het theoretisch onderbouwen, beter kwantificeren en met behulp van modellen kunnen voorspellen van kwalitatief bekende fenomenen. Met dit resultaat van deze definitiestudie wordt tevens tegemoet gekomen aan de wens om kwantificering van de grote hoeveelheid nu beschikbare kennis, die bij de Kwaliteitstoets Oostwest werd geuit.

Onlosmakelijk verbonden met deze wens tot nadere kwantificering is de noodzaak van het (verder) ontwikkelen van numerieke modellen. Opgemerkt wordt dat het ontwikkelen van voorspellingsinstrumenten door de beheerder nooit kan worden gezien als een doel op zich. Gezien het belang van dit soort instrumenten bij het oplossen van beheersvraagstukken en de geconstateerde achterstand die is ontstaan bij het kwantitatief verwerken van de meetgegevens van de Westerschelde, wordt hier echter toch voorgesteld om enige inspanning te plegen om dit soort instrumenten verder te ontwikkelen.

Voor deze definitiestudie is een inventarisatie van de bestaande instrumenten uitgevoerd. Op basis van de conclusies uit die inventarisatie wordt aanbevolen bij het verder ontwikkelen van voorspellingsinstrumenten vooral aandacht te besteden aan:

Ontwikkeling van data-gedreven modellen

Ontwikkelen van data-gedreven modellen kan een goede bijdrage leveren aan de ontwikkeling van meer inzicht in de relevante processen die verantwoordelijk zijn voor morfologische dynamiek in de Westerschelde. Op dit moment bestaat er nog geen model van dit type voor de Westerschelde. De grote hoeveelheid beschikbare data vormt echter een goede basis voor dit type modellen.

Aanpak kennistekort (5-5), (5-4), (3-6)

Operationaliseren 2D/3D modelsysteem

Het opzetten en completeren van een 2D/3D modelsysteem. Het bestaande systeem Delft3D-MOR is nog onvoldoende benut voor de Westerschelde. Er is hiermee wel een begin gemaakt in het kader van het drempelonderzoek (Verbeek *et al.*, 1998) en het promotie-onderzoek van Jeuken (in prep.), maar het opzetten van meer modellen en uitbreiden van het systeem is zonder meer wenselijk bij de aanpak van de geconstateerde kennistekorten en het oplossen van beheersproblemen in de Westerschelde.

Aanpak kennistekort (4-1), (4-2), (5-1), (5-7)

Vergroten voorspellende kracht modellen

Vergroten van de voorspellende kracht door een combinatie van verschillende typen instrumenten te gebruiken. Gedacht wordt aan combinatie van geïdealiseerde modellen met 2D/3D procesmodellen of een combinatie van procesmodellen met semi-empirische modellen. Ook wordt gedacht aan nieuwe technieken zoals integratie van data-gedreven analyse en modellering met proces georiënteerde modellering.

Aanpak kennistekort (5-7), (3-10)

6.3 Onderzoek naar ingreep - effect relaties

Gezien het intensieve menselijke gebruik van de Westerschelde is de reactie van het morfodynamische systeem op menselijke ingrepen van groot belang voor de beheerder. Menselijke ingrepen kunnen worden beschouwd als verstoringen van de natuurlijke ontwikkeling van het estuarium. Het systeem heeft de neiging zich weer te herstellen of zich aan te passen aan de verstoringen. Verwacht wordt dat de neiging om zich weer te herstellen of zich aan te passen aan de nieuwe situatie afhangt van de omvang van de ingreep. Blijft de ingreep onder een bepaalde grens, dan zal het systeem de neiging hebben zich te herstellen naar het oude evenwicht. Is de ingreep groter dan die bepaalde grens, dan zal het systeem de neiging hebben naar een nieuw evenwicht te gaan.

Kennis over deze toelaatbare grens van ingrijpen is van groot belang voor het kunnen voorspellen van de effecten van ingrepen. Een concreet voorbeeld hierbij is de vraag bij welke hoeveelheid baggerwerk of stortactiviteiten in een bepaald gebied het aantal geulen zal worden beïnvloed. Belangrijkste achtergrond van deze vraag is de gedachte dat een verandering van een meergeulen-stelsel naar een estuarium met één enkele geul grote veranderingen op vrijwel alle schaalniveaus met zich mee zal brengen, waaronder verlanding op grote schaal.

Onderzoek naar andere estuaria

De tot nu toe in de Westerschelde uitgevoerde data-analyse heeft geleerd dat het vaak zeer moeilijk is om de effecten van ingrepen te onderscheiden van natuurlijke ontwikkelingen. Om deze analyse uit te breiden met meer praktijkervaring en om te leren van wat elders is gebeurd, vooral met betrekking tot de effecten van ingrepen, wordt aanbevolen literatuuronderzoek te doen naar de ontwikkelingen van andere estuaria. Hierbij wordt met name gedacht aan de Seine en het Humber estuarium, vanwege de fysische overeenkomsten tussen de Westerschelde en deze estuaria, het vergelijkbaar intensieve gebruik, het (vanwege de ligging in West-Europa) vergelijkbare beheer en de beschikbaarheid van grote hoeveelheden gegevens van deze estuaria.

Aanpak kennistekort (2-1), (3-1), (3-2), (4-3)

Vaststellen toelaatbare grens van ingrepen

<i>Aanpak kennistekort</i>	(3-5), (3-2)
<i>Methodiek</i>	Stabiliteitsanalyse, onderzoek met geïdealiseerde modellen, ondersteund door procesmodellen
<i>Middelen / inspanning</i>	Diverse modellen
<i>Beoogde producten</i>	Vastgestelde toelaatbare grenzen van verschillende ingrepen in verschillende gebieden in het estuarium

Operationaliseren van semi-empirische modellen

Semi-empirische modellen als ESTMORF en ASMITA zijn de afgelopen jaren al vrij ver ontwikkeld. Als voorspellingsinstrumenten kunnen zij worden geïmplementeerd en geoperationaliseerd bij Rijkswaterstaat. Deze modellen kunnen vervolgens worden ingezet bij het voorspellen van de middellange tot lange termijn reactie van het morfodynamische systeem op natuurlijke ontwikkelingen en op ingrepen.

Aanpak kennistekort (2-1), (2-3), (3-10)

Onderzoek naar de stabiliteit van parallelle geulen

Reeds eerder genoemd bij de aanpak van elementaire kennistekorten op het gebied van algemene kwantitatieve morfodynamische kennis is het onderzoek naar de stabiliteit van parallelle geulen. Voor het bepalen van ingreep - effect relaties is dit onderzoeksonderwerp van groot belang, daarom wordt dit onderwerp hier nogmaals genoemd.

Monitoren en meten

Gezien het feit dat er nog onvoldoende kennis is over morfologische dynamiek, en vooral omdat er nog onvoldoende voorspellingsinstrumenten beschikbaar zijn, is het van groot belang de ontwikkelingen van het estuarium, onder invloed van de verdieping van de vaargeulen die nu wordt uitgevoerd, goed te monitoren. Hiervoor bestaat al het project MOVE. Het is belangrijk om bij dit project aandacht te besteden aan de verschillende aspecten van morfologische dynamiek van de Westerschelde. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de indicatoren voor de morfologische dynamiek zoals gedefinieerd in dit project.

Aanpak kennistekort (5-4), (5-5), (5-3)

6.4 De rol van morfologische dynamiek

Bij deze definitiestudie is ervan uitgegaan dat morfologische dynamiek belangrijk is voor het estuarium. Deze gedachte is gebaseerd op de rol die morfologische dynamiek heeft voor bepaalde beheersaspecten, zoals voor een aantal aspecten is uitgewerkt in hoofdstuk 4. Ook is echter gebleken dat de relatie tussen morfologische dynamiek en deze en andere beheersaspecten nog niet geheel duidelijk is. Daarom wordt hier voorgesteld nader onderzoek te doen naar het belang van morfologische dynamiek voor de vier beheersaspecten veiligheid, ecologie, waterkwaliteit en bodemkwaliteit. Hierbij moet overigens nauw worden aangesloten op de eerder in dit hoofdstuk genoemde onderzoeken

naar betere kwantificering van morfodynamische processen. Vooral het gedrag van slib (water-bodem interactie, troebelheid, slibverspreiding en slibinhoud van de bodem op een bepaalde plaats) verdient daarbij veel aandacht.

Verband tussen morfologische dynamiek en beheersaspecten

<i>Aanpak kennistekort</i>	(2-2), (2-4), (4-1,2,3,4)
<i>Methodiek</i>	Data analyse
<i>Middelen / inspanning</i>	Verzamelen en verwerken van veldgegevens
<i>Beoogde producten</i>	Inzicht in het verband tussen morfologische dynamiek op verschillende schalen en de beheersaspecten van het estuarium
<i>Verwante onderzoekprogramma's</i>	Eerder in dit hoofdstuk genoemd aspectonderzoek naar morfodynamische processen

Indicatoren voor morfologische dynamiek

Wanneer er een goed beschreven verband bestaat tussen morfologische dynamiek en beheersaspecten van het estuarium, kunnen goed gekozen indicatoren voor morfologische dynamiek voor het beheer belangrijke parameters worden. Om morfologische dynamiek in estuaria te beschrijven is een serie mogelijke indicatoren gegeven in deze definitiestudie. De toepasbaarheid en de relevantie van deze indicatoren moet echter nog nader onderzocht worden om een definitieve selectie te kunnen maken van geschikte indicatoren. De doelstelling van deze selectie is het komen tot een serie getoetste, technisch te bepalen en voor de beheerder relevante indicatoren voor morfologische dynamiek. Hiermee kan het Westerschelde estuarium in het verleden, in de huidige toestand en aan de hand van toekomstverwachtingen (modelresultaten) worden beschreven.

<i>Aanpak kennistekort</i>	(2-4), (2-2), (5-4)
<i>Methodiek</i>	1. Pre-selectie 2. Toepassen van de overgebleven indicatoren op historische velddata 3. Toets de uitkomsten op relevantie voor beheer, en op relatie met ingrepen 4. Nagaan in hoe ver ze ook uit de resultaten van verschillende modellen zij te halen
<i>Middelen / inspanning</i>	Verzamelen en verwerken van veldgegevens (GIS-bestanden)
<i>Beoogde producten</i>	1. Getoetste indicatoren 2. Beeld van de historische ontwikkelingen van morfologische dynamiek van de Westerschelde 3. Eventuele relatie tussen menselijke ingrepen en morfologische dynamiek
<i>Concrete onderwerpen</i>	Onder andere het herhalen van de Duitse Moran studie voor de Duitse Bocht voor de Westerschelde

6.5 Lopende onderzoeken

Op dit moment wordt een aantal onderzoeken met betrekking op de Westerschelde uitgevoerd. Om overlap of herhaling te voorkomen en versterking van de verschillende onderzoeken te bevorderen wordt hieronder voor een aantal onderzoeken bekeken wat de relatie is met de in het voorgaande weergegeven voorstellen.

Lange termijn gedrag Westerschelde, definitiestudie zeespiegelrijzing (projectleider: Ad Langerak)

In mei 1998 is de definitiestudie naar het lange termijn gedrag van de Westerschelde onder invloed van zeespiegelrijzing afgerond. Het doel van deze studie was aan te geven hoe kan worden vastgesteld wat de gevolgen van versnelde zeespiegelrijzing zijn voor het Westerschelde estuarium en welke maatregelen genomen kunnen worden om eventuele ongewenste gevolgen te voorkomen. De tijdschaal van de processen waar naar is gekeken is 50 tot 100 jaar. De ruimteschaal is die van de Westerschelde en de uitwisseling daarvan met omliggende gebieden. In de in dit rapport gehanteerde definitie gaat het hierbij om de megaschaal. Geconcludeerd wordt dat de te verwachten versnelde zeespiegelrijzing en getijveranderingen geen bedreiging vormen voor de natuurfunctie van de Westerschelde. Gebleken is dat de morfologische veranderingen van de afgelopen decennia in de Westerschelde zelf meer invloed op de getijslag hadden dan de hydraulische randvoorwaarden. Bij deze morfologische veranderingen spelen menselijke activiteiten als vaargeulbeheer en zandwinning een minstens zo grote rol als zeespiegelrijzing en getijslagtoename. Het effect van de huidige zandwinning is bijvoorbeeld sterker dan dat van de verwachte zeespiegelrijzing. Tevens werd geconcludeerd dat de gevolgen van menselijk ingrijpen en van natuurlijke externe invloeden niet gemakkelijk van elkaar zijn te scheiden. Daarom werd aanbevolen de studie naar de invloed van zeespiegelrijzing te verbreden naar een studie van het lange termijn gedrag van de Westerschelde.

Eenvoudig gesteld komt het onderzoek naar de lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde volgens de definitiestudie Lange Termijn Gedrag Westerschelde neer op het kwantificeren van de zandtoevoer voor de komende honderd jaar en de interne herverdeling van dat zand. Voorgesteld wordt dit probleem gefaseerd aan te pakken. In de eerste plaats dient een procesbeschrijving (historische ontwikkeling en huidige situatie) plaats te vinden. Daarna een gevoeligheidsanalyse (invloed hydraulische randvoorwaarden en morfologische veranderingen). Tenslotte kunnen met behulp van morfodynamische modellen diverse beleidsscenario's worden doorgerekend. Belangrijke onderwerpen die bij de aanpak van dit onderzoek de aandacht verdienen zijn onder andere: koppeling zandtoevoer en hydraulica (aangeraden wordt de kwalitatief bekende zanduitwisseling nader te onderzoeken met behulp van procesmodellering en veldmetingen van sedimentconcentraties), opstellen van kombergingsgrafieken (om een verband te kunnen leggen tussen komberging en menselijk ingrijpen, ook in de Oosterschelde), bodemweerstand (variatie hierin over het getij en over de getijcyclus). Voor het analyseren van de veranderingen in geometrie en getij op de lange termijn wordt aangeraden gebruik te maken van een combinatie van meerdere typen modellen. In de eerste plaats kan gebruik worden gemaakt van een gedragsmodel om de grootschalige ontwikkelingen te beschrijven. Gezien de gestelde eisen zullen modellen als ESTMORF of ASMITA in eerste instantie hiervoor in aanmerking komen. Om de relaties in deze gedragsmodellen goed te beschrijven en de resultaten te kunnen evalueren dient de

ontwikkeling en het gebruik van deze modellen te worden ondersteund met procesmodellering.

Het op deze manier gedefinieerde onderzoek naar het lange termijn gedrag van de Westerschelde sluit nagenoeg naadloos aan op de in dit rapport gedane voorstellen. Het advies aandacht te besteden aan een betere beschrijving van de bodemweerstand in de huidige generatie procesmodellen, de inzet van gedragsmodellen voor de analyse van lange termijn ontwikkelingen en de ondersteuning van deze modellen met procesmodellen om (nu nog alleen empirisch bekende) relaties te onderzoeken zijn ook in de huidige studie naar voren gekomen. Gezien deze raakpunten is nauwkeurige afstemming van de uitvoer van de verschillende studies noodzakelijk.

Veiligheid tegen overstromen (projectleider: Aline Arends)

Door RIKZ wordt als vervolg op het Oostwest onderzoek in het kader van het project Verdieping gekeken naar de ontwikkeling van de waterstanden in de Westerschelde. Geconstateerd is dat de waterstanden in het oostelijk deel van de Westerschelde veel sneller stijgen dan in het westelijk deel (50 centimeter per eeuw in het oosten tegen 25 centimeter in het westen). Het gevolg hiervan is dat op langere termijn het risico van overstromingen onaanvaardbaar hoog wordt, zoals reeds is uitgelegd in hoofdstuk 4. De oorzaak van de versterkte waterstandsverhogingen wordt gezocht in de grote hoeveelheid ingrepen die in de Westerschelde heeft plaatsgevonden. Het causale verband tussen de ingrepen en de waterstandsverhogingen is echter nog niet in detail bekend.

De studie wordt aangepakt met behulp van getij-analyse en 1D mathematische modellering van de waterbeweging. Op deze manier wordt getracht de waargenomen veranderingen te simuleren met numerieke methoden. In eerste instantie wordt getracht met behulp van het model te achterhalen welke fysische parameters verantwoordelijk kunnen zijn voor de waterstandsverhogingen. Hierbij wordt gedacht aan verruiming van de geulen, veranderingen van de komberging en aanpassing van de bodemruwheid. Bij de berekeningen vindt geen terugkoppeling plaats van de waterbeweging op de morfologie. Ingrenen als baggeren en storten en functiewisseling van geulen worden als randvoorwaarde aan het model opgelegd. Het schaalniveau waarop de studie zich voornamelijk richt is het mega-schaalniveau: het gehele estuarium.

De relatie met de huidige onderzoeksvoorstellen wordt gelegd met de rol die morfologische dynamiek speelt voor het beheersaspect veiligheid. Zoals gezegd zijn morfologische veranderingen waarschijnlijk de oorzaak voor de veranderingen in de waterbeweging. Het verband tussen beide wordt gezocht met behulp van conventionele methoden, zonder terugkoppeling tussen waterbeweging en morfologie. Wanneer het onderzoek is afgerond zal de invloed van morfologische veranderingen op het beheersaspect veiligheid naar verwachting duidelijker zijn geworden.

Kust 2000 onderzoek (Daan Dunsbergen)

In het kader van het project Kust 2000 wordt door RIKZ onderzoek uitgevoerd naar de aanpak van erosieproblemen langs de Nederlandse kust. Voor het deelonderzoek Zeegaten is de monding van de Westerschelde daarbij een pilot-lokatie. Het onderzoek richt zich in eerste instantie op de erosieproblematiek van de Walcherse kust, waar het Oostgat dicht

onder de zwaar verdedigde oever loopt. Daarnaast wordt gekeken naar langjarige trends in het gedrag van de Scheldemonding en naar de rol van zandwinning en baggeractiviteiten in dat zeegebied.

De studie wordt aangepakt met behulp van een getij-analyse (data-analyse en mathematische modellering), waarbij ook getracht wordt een verband te leggen met morfologische veranderingen. Dit wordt gedaan door de reactie van de waterbeweging op opgelegde wijzigingen in de morfologie te analyseren. Daarnaast is een zandbalans van de monding van de Westerschelde opgesteld, naar analogie van de vergelijkbare zandbalans die in het kader van het Oostwest project voor de gehele Westerschelde is opgesteld. Het belangrijkste resultaat van deze balans is dat kan worden vastgesteld dat het totale mondingsgebied in de loop van de jaren zand verliest. Het is echter nog niet duidelijk of dat verlies in landwaartse of in zeewaartse richting optreedt. Ook is getracht om, naast de grootschalige zandbalans, een gedetailleerde zandbalans op te stellen voor verschillende morfologische eenheden. Daarnaast is een uitgebreid meetprogramma afgewerkt om de invloed van extreme gebeurtenissen op de stabiliteit van het Oostgat te achterhalen. Uit de metingen is overigens gebleken dat de invloed van stormen op de ligging van de geul (de invloed van events op het macro-schaalniveau) beperkt is. Getracht zal worden één en ander met behulp van golfmodellering nader te analyseren. Tenslotte is in deze studie tot dusver ook enige aandacht besteed aan het beschrijven van morfologische ontwikkelingen met behulp van empirische relaties en indicatoren. Het schaalniveau waarop de studie zich richt is in eerste instantie het mega-schaalniveau (de Westerscheldemonding op zeer lange tijdschalen) en het macro-schaal niveau (geulen en platen als eenheid en de invloed van events daarop).

De relatie met de huidige definitiestudie is op een paar punten te leggen. In de eerste plaats wordt ook in het Kust 2000 onderzoek getracht te achterhalen welke rol morfologische processen spelen bij het beheersaspect veiligheid. Vergelijkbaar met het hiervoor beschreven onderzoek naar de veiligheid van de Westerschelde gebeurt dat met conventionele methoden. Daarnaast wordt redelijk systematisch getracht te achterhalen welke processen voor veranderingen op bepaalde schaalniveaus verantwoordelijk zijn, zoals eerder in dit rapport beschreven. Daarnaast wordt net als bij de huidige definitiestudie getracht morfologische veranderingen te beschrijven met behulp van indicatoren. Overigens worden hierbij in eerste instantie geen duidelijke verschillen tussen beide studies geconstateerd. In het Kust 2000 onderzoek worden dezelfde kennistekorten gesignaleerd als in deze definitiestudie.

Gedrag van kortsluitgeulen (Claire Jeuken)

In het kader van het promotieonderzoek van Claire Jeuken (Universiteit Utrecht, in samenwerking met Rijkswaterstaat directie Zeeland) wordt uitgebreid onderzoek gedaan naar het gedrag van kortsluitgeulen in de Westerschelde. Hierbij wordt met name gekeken naar migratiemechanismen van kortsluitgeulen en het gedrag van drempels van dergelijke geulen. Het onderzoek spitst zich toe op het drempelgebied van de Everingen, in het middengebied van de Westerschelde.

Het onderzoek wordt aangepakt met behulp van specialistische veldwaarnemingen (onder andere ADCP metingen) en modelberekeningen (met behulp van Delft2D-MOR). Hierbij wordt gekeken naar het verband tussen de omwerking van sediment en de migratie van

kortsluitgeulen. Voorlopige conclusies uit het onderzoek zijn dat extreme condities (events) voor de dynamiek van kortsluitgeulen geen grote rol spelen. Daarnaast kan worden vastgesteld dat de dynamiek van drempelgebieden (en daaraan gekoppeld de kortsluitgeulen) erg groot is. Ook werd inmiddels vastgesteld dat de secundaire stroming die in werkelijkheid wordt gemeten veel sterker is dan de stroming die met behulp van het model wordt voorspeld. Het onderzoek richt zich voornamelijk op de meso-schaal (kortsluitgeulen, met tijdschalen van maanden tot jaren).

Het verband met de huidige definitiestudie wordt wederom gelegd via de analyse van de morfologische dynamiek op een bepaald schaalniveau. Anders dan bij de twee hiervoor beschreven studies richt dit onderzoek zich echter op een lager schaalniveau (de meso-schaal) en worden innovatieve methoden gebruikt bij de uitvoering: de toepassing van Delft2D-MOR is een van de eerste toepassingen van een dergelijk modelsysteem in de Westerschelde. Gesteld kan worden dat het onderzoek van Jeuken vooruit loopt op de in deze definitiestudie gedane voorstellen, door morfologische dynamiek op een lager schaalniveau te analyseren met behulp van procesgeoriënteerde modellen. Geadviseerd wordt bij de uitvoer van de hier gedane onderzoeksvoorstellen dan ook goed aan te sluiten op en gebruik te maken van het onderzoek van Jeuken, waarvan de resultaten waarschijnlijk in het eerste kwartaal van 1999 beschikbaar komen.

6.6 Prioriteiten

De prioriteiten die bij de uitvoer van de onderzoeken kunnen worden gesteld worden hier bepaald door de resultaten van de verschillende onderzoeken te toetsen tegen de belang voor de beheerder, samen met de moeilijkheid en haalbaarheid van de verschillende onderzoeken. Daarnaast is rekening gehouden met de relaties en afhankelijkheden tussen de verschillende onderwerpen.

Bij de toetsing is uitgegaan van het volgende:

- Voor het belang voor de beheerder zijn de ernst van het probleem en de mate waarin de beheerder op het probleem invloed kan uitoefenen van belang. Uit de analyse is geconcludeerd dat de problemen rondom de macro-schaal erg belangrijk zijn en dat op de macroschaal door de beheerder de meeste invloed kan worden uitgeoefend via bijvoorbeeld het stortbeleid.
- Uit de analyse van de onderzoeksbenaderingen is geconcludeerd dat het grootste knelpunt bij analyse van morfodynamische ontwikkelingen in de Westerschelde de kwantitatieve voorspelling is, vooral met betrekking tot effecten van ingrepen. Het meest effectieve middel om de benodigde kennis voor die kwantitatieve voorspellingen te verkrijgen is modelonderzoek.

De relaties tussen de gedefinieerde onderzoeksplannen zijn samengevat in de volgende tabel:

Nr	Onderzoeksplan	Resultaten nodig van	Levert toe aan
1	relatie dynamiek en beheer		2
2	beschrijving morfologische dynamiek	1	
3	literatuuronderzoek andere estuaria		15
4	monitoren / meten		alle andere
5	beddingvormen en ruwheid		10, 6
6	zand-slib segregatie		
7	kortsluitgeulen		8
8	uitwisseling platen en geulen		7
9	drempelvorming		
10	stabiliteit parallelle geulen		15
11	operationaliseren semi-empirische modellen		
12	uitbreiden 2D-3D systeem		6, 7, 8
13	combinatie verschillende type modellen		
14	data gedreven model		
15	toelaatbare grens ingrepen		

De toetsing is uitgevoerd met behulp van een multi-criteria analyse en is samengevat in de volgende tabel:

Nr.	Onderzoeksplan	innovatie ve karakter	belang beheerde r	haalbaar heid	score / prioriteit
1	relatie dynamiek en beheer	0	++	+	+++
2	beschrijving morfologische dynamiek	0	+	++	+++
3	literatuuronderzoek andere estuaria	-	+	++	++
4	monitoren / meten	-	++	++	+++
5	beddingvormen en ruwheid	++	0	0	++
6	zand-slib segregatie	++	++	0	++++
7	kortsluitgeulen	++	++	0	++++
8	uitwisseling platen en geulen	++	++	0	++++
9	drempelvorming	++	++	0	++++
10	stabiliteit parallelle geulen	++	++	0	++++
11	operationaliseren semi-empirische modellen	0	+	++	+++
12	uitbreiden 2D-3D systeem	+	+	+	+++

Nr.	Onderzoeksplan	innovatie ve karakter	belang beheerde r	haalbaar heid	score / prioriteit
13	combinatie verschillende type modellen	+	+	+	+++
14	data gedreven model	+	0	+	++
15	toelaatbare grens ingrepen	++	++	0	++++

6.7 Conclusies

Uit de hiervoor gepresenteerde tabel met prioriteiten blijkt dat in de komende tijd de belangrijkste aandacht moet worden gericht op het verbeteren van het kwantitatieve inzicht in een aantal morfodynamische processen, met name het gedrag van kortsluitgeulen, plaatgeul uitwisseling, drempelvorming, stabiliteit van parallelle geulen, zand-slib segregatie en beschrijving van de bodemruwheid. De kennistekorten op deze terreinen vormen een belemmering bij de vooruitgang van de ontwikkeling van betrouwbare voorspellingsmethoden en daarmee bij de kwantificering van het effect van menselijke ingrepen of natuurlijke ontwikkelingen op het morfodynamische systeem. Voor de aanpak van deze problemen is een combinatie van theoretische analyse, principemodellering en procesmodellering noodzakelijk. Gezien de complexiteit van de onderwerpen ligt nauwe samenwerking met universiteiten en onderzoeksinstituten voor de hand. Een deel van de onderwerpen leent zich voor promotie-onderzoek. Geadviseerd wordt om gelijktijdig te werken aan de operationalisering van de belangrijkste nu reeds beschikbare modelsystemen (semi-empirische modellen en 2D/3D procesmodellen), deels zelfs noodzakelijk voor de aanpak van de eerder genoemde problemen.

Een ander onderwerp dat hoge prioriteit verdient bij de uitvoer van het onderzoeksplan is het onderzoek naar de toelaatbare grens van ingrepen. Dit voor de beheerder zeer relevante onderwerp is echter niet eenvoudig te benaderen. Aanpak met behulp van theoretische stabiliteitsanalyse, geïdealiseerde modellen en procesmodellen is noodzakelijk. Ook voor dit onderwerp ligt samenwerking met gespecialiseerde onderzoeksgroepen bij universiteiten en onderzoeksinstituten voor de hand.

Gedeeltelijk parallel hieraan kan worden gewerkt aan het beter onderbouwen van de relatie tussen morfologische dynamiek en relevante beheersaspecten en het vervolgens met behulp van indicatoren zinvol beschrijven van morfologische dynamiek. Dit onderzoek bestaat voor een groot deel uit data-analyse (al dan niet ondersteund door data-georiënteerde analysemethoden) en literatuuronderzoek.

7 Gebruikte literatuur

- Avoine, J., G.P. Allen, M. Nichols, J.C. Salomon & C. Larssonneur, 1981. Suspended sediment transport in the Seine estuary, France. *Effects of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology* Marine Geology, 40: 119-137.
- Allersma, E., 1992. Studie inrichting Oostelijk deel Westerschelde Analyse van het fysische systeem, nota voor de werkgroep OOSTWEST
WL | DELFT HYDRAULICS, rapport Z368
- Boogaard, H.F.P. van den, D.K. Gautam & A.E. Mynett, 1998. Auto-Regressive Neural Networks for the Modelling of Time Series.
Accepted for Hydro-Informatics
- Dongeren, A.R. & H.J. de Vriend, 1994. A model of the morfological behaviour of tidal basins
Coastal Engineering, Vol 22 (3/4)
- Dunsbergen, D.W. & A. de Gelder, 1998. Lange termijn gedrag Westerscheldemonnd. Verslag van workshops. Rijksinstituut voor Kust en Zee, Werkdocument RIKZ/OS-98.107X
- Fokkink, R., 1997. Morphodynamic network simulations of the Western Scheldt
WL | DELFT HYDRAULICS, report Z919
- Groenewoud, 1997. Modellerling morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 1: Modelbouw en simulatie huidige situatie
TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek
- Hofstede, J., 1991. Hydro- und Morphodynamik im Tidebereich der Deutschen Bucht.
Berliner geographische Studien, Band 31, Institut für Geographie der Technischen Universität Berlin
- HR Wallingford, 1997 a. Estuary Morphology and Processes. a review of recent research and user needs.
HR Wallingford, Report SR 446
- HR Wallingford, 1997 b. Estuaries, the case for research into morphology and processes.
HR Wallingford, Report SR 478
- Huijs, S.W.E., 1996. De ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen
Universiteit Utrecht, IMAU rapport R96-17
- ICBS, 1997. Rapport: de kwaliteit van de Schelde 1994.
Internationale Commissie voor de Bescherming van de Schelde
- Jong, de & A.W. Heemink, 1995. A long-term morphodynamic model for estuaries and tidal rivers
In: 'Management of Sediment, Philosophy, Aims, and Techniques', Central board of irrigation and power, New Delhi, India, p. 687-698
- Kleef, A.W. van, 1994. Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond het Middelgat
Rijkswaterstaat, directie Zeeland rapport NWL 95.02A
- Latteux, B., 1995. Techniques for long-term morphological simulation under tidal action
Marine Geology, Vol. 126, No. 1 / 4
- Mol, G., A.M. van Berchum & G.M. Krijger, 1997. De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48' / 43'. Beschrijving van trends in de fysische, biologische en chemische toestand
Rijksinstituut voor Kust en Zee, rapport RIKZ 97.049
- Mulder, H.P.J. & B. Mijwaard, 1997. Een methode om een twee-dimensionale sedimentbalans te maken, gebaseerd op meetgegevens, met gebruikmaking van ee GIS en toegepast op Eems-Dollard voor de periode 1985-1990
Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-97.609X
- Pielou, E.C., 1984: The Interpretation of Ecological Data. A primer on Classification and Ordination.
New York: Wiley & Sons
- RIKZ, 1995. Schelde Atlas, een beeld van een estuarium (concept).
Rijksinstituut voor Kust en Zee
- RIKZ, 1997. Milieuaspectenstudie baggerspeciéstort Westerschelde. Studie naar de effecten van het storten van specie vrijkomend bij de 43/48 voet verruiming van de vaarweg in de Westerschelde
Rijksinstituut voor Kust en Zee
- Sisternans, P., 1996. Verandering van de morfodynamiek van de Westerschelde. Een kwantitatieve analyse.
Rijkswaterstaat Directie Zeeland Notitie NWL 96.51

- Svašek, 1998. Lange termijn gedrag Westerschelde, definitiestudie zeespiegelrijzing
Concept rapport, in opdracht van RIKZ
- Veen, J. van, 1950. Eb- en vloed-schaar systemen in de Nederlandse getijwateren.
Tijdschrift KNAG, 2^e reeks, deel 67, pp. 303-325
- Verbeek, H., F.T.G Tank, M.D. Groenewoud, 1998. Drempels in de Westerschelde, natuur en mens samen aan
het werk
Rijkswaterstaat, rapport RIKZ-98.011
- Vriend, H.J. de & J.S. Ribberink, 1996. Mathematical modelling of meso-tidal barrier islands coasts. part I and
part II
In: P.L.F. Liu (ed.), Advances in coastal and ocean engineering, World scientific
- Vroon, J., C. Storm & J. Coosen, 1997: Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het Project Oostwest,
een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium
Rijkswaterstaat, rapport RIKZ-97.023
- WL | DELFT HYDRAULICS, 1988. Zuurstof model Schelde estuarium
WL | DELFT HYDRAULICS, rapport T237
- WL | DELFT HYDRAULICS, 1996. Kwaliteitstoets OOSTWEST; Westerschelde
WL | DELFT HYDRAULICS, rapport Z1021
- WL | DELFT HYDRAULICS, 1997. Studie naar morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde,
ten behoeve van de MER storten gebaggerd materiaal
WL | DELFT HYDRAULICS, rapport Z2310

A Overzicht beschikbare literatuur

- Allen, J.R.L., M.J. Duffy, 1998. Temporal and spatial depositional patterns in the Severn Estuary, southwestern Britain: intertidal studies at spring-neap and seasonal scales, 1991-1993. *Marine Geology* 146, 147-171.
- Aubrey, D.G. & P.E. Speer, 1985. A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part 1: observations. *Estuarine & Coastal Shelf Science* 21, 185-205.
- Avoine, J. 1981. L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse Caen, 236 p.
- Avoine, J. 1984. L'aménagement de l'estuaire de la Seine: conséquences sédimentologiques. XVIIIèmes Journées de l'Hydraulique, Marseille 1984. Société Hydrotechnique de France, V.1.1-V.1.8.
- Avoine, J. 1985. Evolution hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Seine. In: L'estuaire de la Seine, enjeux écologiques et économiques. Colloque Gemel-Drac-Ciqv, Le Havre, 53 - 67.
- Avoine, J. 1986. Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine. In: La Baie de Seine, Actes de Colloques nr 4, Ifremer ed., 117 - 124.
- Avoine, J. & L. Crevel, 1986. Influence des apports fluviaux en Baie de Seine. In: La Baie de Seine, Actes de Colloques nr 4, Ifremer ed., 125 - 134.
- Avoine, J., A. Caillot, R. Hoslin, C. Larssonneur, J. Massias & M. Quesney, 1986. Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en Baie de Seine. In: La Baie de Seine, Actes de Colloques nr 4, Ifremer ed., 211 - 218.
- Avoine, J., L. Crevel, L. Dubrulle, D. Boust & P. Guegueniat, 1984. Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. XVIIIèmes Journées de l'Hydraulique, Marseille 1984. Société Hydrotechnique de France, I.3.1-I.3.8.
- Avoine, J., L. Dubrulle & C. Larssonneur, 1986. La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la Baie de Seine - Conséquences sur l'environnement. In: La Baie de Seine, Actes de Colloques nr 4, Ifremer ed., 183 - 192.
- Avoine, J., 1987. Sediment exchanges between the Seine estuary and its adjacent shelf. *Journal of the Geological Society of London*, 144: 135-148.
- Avoine, J., G.P. Allen, M. Nichols, J.C. Salomon & C. Larssonneur, 1981. Suspended sediment transport in the Seine estuary, France. Effects of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology*, 40: 119-137.
- Berg, J.H. van den, C.J.L. Jeuken & A.J.F. van der Spek, 1996. Hydraulic processes affecting the morphology and evolution of the Westerschelde estuary. In: K.F. Nordstrom & C.T. Roman, *Estuarine shores: evolution, environments and human alterations*. John Wiley & Sons Ltd.
- Berné, S., P. Castaing & E. le Dezen, 1993. Morphology, internal structure and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance to Gironde Estuary (France). *Journal of Sedimentary Petrology*, 63, 780-793.
- Biegel, E.J., 1991. Equilibrium relations in the ebb tidal delta, inlet and backbarrier area of the Frisian Inlet system. Geopro 1991.028/GWAO-91.016, Department of Physical Geography, Utrecht University.
- Binliang Lin & R.A. Falconer, 1996. Numerical modelling of three-dimensional suspended sediment for estuarine and coastal waters. *Journal of Hydraulic Research*, Volume 34 no 4, 435-456.
- Bruun, P., 1978. Stability of tidal inlets, theory and engineering. Elsevier, New York, 506 pp.
- Burt, N., R. Parker & J. Watts (eds.), 1997. Cohesive sediments. proceedings IntercoH '94, John Wiley & Sons, England, 458 pp.
- Collins, M.B., X.K. Ke & S. Gao, 1995. Tidally induced flow structure over intertidal flats. Submitted to *Journal of Geophysical research*.
- Colombini, M., G. Seminara and M. Tubino, 1987. Finite-amplitude alternate bars. *Journal of Fluid Mechanics* 181, 213-232.
- Crevel, L., 1983. Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine nord-orientale. Thèse Caen, 185 p.
- Delo, E.A. & M.C. Ockenden, 1992. Estuarine muds manual. HR Wallingford Report SR 309, 23 pp.

- Desprez, M., 1986. Impact biosédimentologique d'aménagements portuaires en estuaire de Seine
In: La Baie de Seine, Actes de Colloques nr 4, Ifremer ed., 449 - 458.
- Di Silvio, G., 1991. Averaging operations in sediment transport modelling: short-step versus long-step morphological simulations
In: Proceedings 'The transport of suspended sediments and its mathematical modelling', Florence 1991, pp. 723-738.
- Dongeren, A.R. van & H.J. de Vriend, 1994. A model of morphological behaviour of tidal basins.
Coastal Engineering, Volume 22, 287-310.
- Dronkers, J., 1986. Tidal asymmetry and estuarine morphology
Netherlands Journal of Sea Research 20, 117-131.
- Dronkers, J. & M. Scheffers (eds), 1998. Physics of Estuaries and Coastal Seas.
Proceedings PECS'96 Conference, Balkema, Rotterdam.
- Dyer, K.R., 1995. Sediment transport processes in estuaries.
In: G.M.E. Perillo (ed), Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Elsevier, Amsterdam, 423-449.
- Ehlers, J., 1988. The morphodynamics of the Wadden Sea
Balkema, Rotterdam.
- Eitner, V., 1996. Morphological and sedimentological development of a tidal inlet and its catchment area (Otzumer Balje, southern North Sea)
Journal of Coastal Research 12, 271-293.
- Falconer, R.A. & P.H. Owens, 1990. Numerical modelling of suspended sediment fluxes in estuarine waters.
Estuarine, Coastal and Shelf Science, volume 31, 745-762.
- Friedrichs, C.T., 1995. Stability shear stress and equilibrium cross-sectional geometry of sheltered tidal channels
Journal of Coastal Research 11, 1062-1074.
- Friedrichs, C.T. and Madsen, O.S., 1992. Nonlinear diffusion of the tidal signal in frictionally dominated embayments
Journal of Geophysical Research 97, 5637-5650.
- Friedrichs, C.T. and Aubrey, D.G., 1994. Tidal propagation in strongly convergent channels
Journal of Geophysical Research 99C2, 3321-3336.
- Guymet, I. & J.R. West, 1991. Field studies of the flow structure in a straight reach of the Conwy Estuary.
Estuarine, Coastal and Shelf Sciences 32, 581-596.
- Hofstede, J. & A. Schüller, 1988. Dynamisch-morphologische Analysen im Wattengebiet der Deutschen Bucht -
Ergebnisse des KFKI-projectes Moran 1 und Ausblicke für Moran 2
Hamburger Geographische Studien, Heft 44 s. 121-130.
- Hofstede, J., 1989. Parameter zur Beschreibung der Morphodynamik eines Wattgebietes
In: Die Küste, Heft 50/1989, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co.
- Hofstede, J., 1991. Hydro- und Morphodynamik im Tidebereich der Deutschen Bucht
Dissertation Technische Universität Berlin.
- Hofstede, J.L.A., 1993. Morphologische Entwicklung der Nordfriesischen Aussensände
Bericht Landesamt für Wasseraushalt und Küsten Schleswig-Holstein
- Hofstede, J.L.A., 1997. Morphologie des St. Peter-Ording-Sandes
In: Die Küste, Heft 59/97, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co.
- Hofstede, J.L.A., 1997. Process-response analysis for the North Frisian supratidal sands (Germany)
Journal of Coastal Research, 13(1), 1-7.
- Hofstede, J.L.A., in publication. Regional differences in the morphologic behaviour of German Wadden Sea barriers
Accepted for publication in Quaternary International.
- Hofstede, J.L.A. & V. Spitta, in publication. Process-response analysis for Hörnum tidal inlet in the German Wadden Sea
Submitted for publication in Zeitschrift für Geomorphologie.
- Jay, D.A., 1991. Green's law revisited: tidal long-wave propagation in channels with strong topography
Journal of Geophysical Research 96C11, 20585-20598.
- Jong, K. de & A.W. Heemink, 1995. A long-term morphodynamic model for estuaries and tidal rivers
In: 'Management of Sediment, Philosophy, Aims, and Techniques', Central board of irrigation and power, New Delhi, India, p. 687-698.

- Jong, K. de & A.W. Heemink, 1996. A model for long-term morphodynamic behaviour of tidal basins, long estuaries and tidal rivers.
Delft University of Technology, Tech. report 96-153.
- Kreeke, J. van de, 1990. Can multiple tidal inlets be stable?
Estuarine & Coastal Shelf Science 30, 261-273.
- Kuo, A.Y. & K. Park, 1995. A framework for coupling shoals and shallow embayments with main channels in numerical modelling of coastal plain estuaries.
Estuaries Vol. 18 No. 2, 341-350.
- Lafite, R., 1990. Caractérisation et dynamique des particules en suspension dans un domaine marin macrotidal influencé par un estuaire: l'exemple de la Baie de Seine orientale (France)
Thèse Rouen, 294 p.
- Larsonneur, C., 1971. Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles
Thèse Caen, 394 p.
- Le Hir, P., 1980. Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la Baie de Seine
Thèse Brest.
- Le Hir, P. & L'Hyavanc, 1986. Observations de courant en Baie de Seine
In: La Baie de Seine, Actes de Colloques nr 4, Ifremer (ed.), 25 - 34.
- Le Hir, P., J.C. Salomon, C. Le Provost, G. Chabert d'Hieres & J.L. Mauvais, 1986. Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine
In: La Baie de Seine, Actes de Colloques nr 4, Ifremer ed., 63 - 72.
- Lejeune, H., 1993. Etude hydrodynamique de l'estuaire de la Seine entre 1955 et 1991 et pollution par les métaux-traces
Rapport Maîtrise de géologie, Caen, 64 p.
- Martin, Y. & M. Church, 1995. Bed-material transport estimated from channel surveys: Vedder River, British Colombia.
Earth Surface Processes and Landforms, 20, 347-361.
- Mehta, A.J. (ed.), 1993. Nearshore and estuarine cohesive sediment transport
Coastal and Estuarine studies 42, American Geophysical Union
- McBride, R.A., M.R. Byrnes & M.W. Hiland, 1995. Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective
Marine Geology 126, 143-159.
- Morice, C., 1994. Evolution de la sédimentation superficielle en Baie de Seine orientale: étude cartographique
Rapport Maîtrise de géologie, Caen, 96 p.
- Oost, A., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet
Thesis, Geologica Ultraiectina, Department of Earth Science, Utrecht University, contr. 126.
- Oost, A. & P.L. de Boer, 1994. Sedimentology and development of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and backbarrier areas of the Dutch Wadden Sea
Senckenbergiana Marit 24, 65-111.
- Perillo, G.M.E. & M.C. Piccolo, 1998. Importance of grid-cell area in the estimation of estuarine residual fluxes.
Estuaries Vol 21 No 1, 14-28.
- Pethick, J.S., 1991. Tidal dynamics and estuarine management in the Humber estuary, England.
In: O. Maggon (ed.), Coastal Zone 91, California (ASCE), 1456-1468.
- Prandle, D.G., 1991. Tides in estuaries and embayments
In: Parker, B.B. (ed.), Tidal hydrodynamics, John Wiley and Sons, New York, pp. 125-152.
- Schüller, A. & J. Hofstede, 1992. Untersuchungen über die Morphodynamik im Wattgebiet der inneren Deutschen Bucht (Abschlußbericht des KFKI-Projektes Moran, Teil II)
In: Die Küste, Heft 53/1992, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co.
- Schuttelaars, H.M. & H.E. de Swart, 1996. An idealized long-term model of a tidal inlet
European Journal Mech B/Fluids 15, 55-80.
- Schuttelaars, H.M. & H.E. de Swart, 1997. Initial formation of channels and shoals in a short tidal embayment submitted for publication to Journal of Fluid Mechanics.
- Schuttelaars, H.M., 1997. Evolution and stability analysis of bottom patterns in tidal embayments
Thesis, Utrecht University.
- Seminara, G., 1998. Stability and morphodynamics
Meccanica 33: 59-99.

- Seminara, G. & M. Tubino, 1995. Bed formation in tidal channels: analogy with fluvial bars
In: Di Silvio (ed.), Proceedings seminar 'Morphology of rivers, estuaries and coasts', IAHR Congress, London, contr. 11.
- Sha, L.P., 1990. Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West-Frisian Islands, The Netherlands
Thesis, Geologica Ultraieetina, Faculty of Earth Science, Utrecht University, contr. 64.
- Siefert, W. & H. Lassen, 1987. Zum säkularen Verhalten der mittleren Wattthöhen an ausgewählten Beispielen
In: Die Küste, Heft 45/1987, Westholsteinische Verlagsanalt Boyens & Co.
- Smallman, J.V., M.P. Dearnaley & J.V. Baugh, 1995. Investigation of the historical response of the Stour-Orwell estuaries to engineering works.
Proceedings of the 30th MAFF Conference of River and Coastal Engineers.
- Spearman, J.R., 1995. Estuary regimes and methods for prediction of long-term changes.
PhD Thesis, Oxford Brookes University.
- Speer, P.E. & D.G. Aubrey, 1985. A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part 2: theory
Estuarine & Coastal Shelf Science 21, 207-224.
- Spek, A.J.F. van der, 1994. Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands.
Thesis, Utrecht University, 191 p.
- Stive, M.J.F., M. Capobianco, Z.B. Wang & P. Ruol, 1997. Morphodynamics of a tidal lagoon and the adjacent coast.
- Syllaios, G. & S.R. Boxall, 1998. Residual currents and flux estimates in a partially mixed estuary.
Estuarine, Coastal and Shelf Science 46, 671-682.
- Verlaan, P.A.J., M. Donze & P. Kuik, 1998. Marine vs Fluvial suspended matter in the Scheldt Estuary.
Estuarine, Coastal and Shelf Science 46, 873-883.
- Vigarie, A., 1964. Etude critique de la documentation sur l'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine
Thèse Paris, 239 p.
- Vigarie, A., 1965. Les modalités du remblaiement alluvial dans l'estuaire de la Seine
Cah. Océanogr. XIV (5), 39 p.
- Vriend, H.J. de, M. Copabianco, T. Chester, H.E. de Swart, B. Latteux & M.J.F. Stive, 1993. Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review.
Coastal Engineering, volume 21, 225-269.
- Vriend, H.J. de, 1996. Mathematical modelling of meso-tidal barrier island coasts. Part I: empirical and semi-empirical models
In: Liu, P.L.-F. (ed.), Advances in coastal and ocean engineering, World Scientific, pp. 115-149.
- Vriend, H.J. de & J.S. Ribberink, 1996. Ibid, part II: process-based simulation models
In: Liu, P.L.-F. (ed.), Advances in coastal and ocean engineering, World Scientific, pp. 151-197.
- Wang, Z.B., T. Louters & H.J. de Vriend, 1991. A morphodynamic model for a tidal inlet
In: Arcilla, A.S. et al. (eds), Computer modelling in ocean engineering 1991, Balkema, Rotterdam, 235-245.
- Wang, Z.B., T. Louters & H.J. de Vriend, 1995. Morphodynamic modelling for a tidal inlet in the Wadden
Sea & Marine Geology 126, 289-300.

B Verslag van de workshop

Inleiding en doelen

De hier gerapporteerde workshop heeft plaatsgevonden op woensdag 22 april 1998. Met vierentwintig deskundigen en betrokkenen (zie aan het einde toegevoegde deelnemerslijst) is gesproken over de functie van morfologische dynamiek voor de Westerschelde en de kennistekorten die oplossing van beheersvragen op dat terrein in de weg staan. De bijeenkomst bestond uit een vijftal inleidingen met aansluitend plenaire discussies, onder leiding van dagvoorzitter Huib de Vriend.

De discussies tijdens de workshop werden bewust beperkt, in een poging zo concreet mogelijk aan de oplossing van de vraag van Rijkswaterstaat te werken. Het doel was vast te stellen wat de huidige stand van de kennis op het gebied van estuariene morfologische dynamiek is en welke betekenis deze dynamiek heeft voor het beheer van de Westerschelde. Onder morfologische dynamiek wordt in dit geval verstaan: de mate van veranderlijkheid van morfologische eenheden als geulen, platen en schorren. De discussie werd gevoerd aan de hand van een door WL in overleg met Rijkswaterstaat opgestelde notitie waarin een aantal hypothesen over, en indicatoren voor morfologische dynamiek werden gegeven, samen met een aantal vragen aan de hand waarvan op de workshop is gediscussieerd. Voorafgaand aan het verslag van de workshop is deze notitie hieronder opgenomen.

Notitie: Morfologische Dynamiek Westerschelde

Voorwoord

Deze notitie bevat achtergrond informatie, hypothesen en vragen als voorbereiding op de expert-workshop "Morfologische dynamiek Westerschelde" te houden op 22 april 1998. Deze workshop vormt een essentieel onderdeel van de definitie-studie, uit te voeren door WL | Delft Hydraulics met ondersteuning van externe experts. Het resultaat van de definitie-studie zal een onderzoeksvoorstel zijn dat aangeeft hoe meer kennis kan worden verkregen over de morfologische dynamiek.

Aanleiding en doel van de definitiestudie

De beheerder van het Westerschelde estuarium heeft gekonstateerd dat over de laatste decennia de morfologische dynamiek van het estuarium steeds minder is geworden. Verondersteld wordt dat dit ook een vermindering van het natuurlijkheid van het systeem tot gevolg heeft gehad. Dat hier een verband ligt met de toename van menselijke ingrepen, gerelateerd aan gewenste functies als veiligheid en scheepvaart, lijkt duidelijk. De beheerder streeft ernaar het proces van afnemende natuurlijkheid te beperken en indien mogelijk natuurlijkheid te bevorderen. Verondersteld wordt dat een bepaalde mate van natuurlijkheid belangrijk is voor de kwaliteit van water en bodem en voor de kwaliteit en diversiteit van de ecologie.

Deze gedachten sluiten nauw aan bij het relatief nieuwe begrip 'veerkracht' dat gebruikt wordt in het waterbeheer. Herstel van veerkracht wordt een belangrijke leidraad. Konkreet lijkt dit te kunnen worden bereikt door meer ruimte te laten of te geven aan het natuurlijkheid, zodat een morfologisch dynamischer gedrag mogelijk is zonder dat gewenste functies worden geschaad. Als we dan in staat zijn morfologische dynamiek te kwantificeren, zou hiermede tevens een indicator zijn benoemd die de mate van veerkracht kan aangeven.

Deze definitiestudie heeft tot doel de beheerder bij het bovengenoemde streven te ondersteunen door aan te geven welke kennistekorten uitvoer van bovengenoemd streven belemmeren en aan te geven op welke manier deze kennistekorten kunnen worden aangepakt. In de eerste plaats zullen daartoe de geldende inzichten in het begrip morfologische dynamiek kwalitatief en kwantitatief in kaart worden gebracht en zal worden aangegeven hoe deze inzichten vergroot kunnen worden. Daarnaast zullen de geldende inzichten in de kwalitatieve en kwantitatieve relaties tussen morfologische dynamiek, natuurlijkheid, menselijke ingrepen, kwaliteit van water en bodem en ecologie worden beschreven en zal worden aangegeven hoe deze inzichten kunnen worden vergroot.

Vragen:

- *Hoe denkt u over de relatie tussen morfologische dynamiek en natuurlijkheid?*
- *Denkt u dat morfologische dynamiek belangrijk is voor de kwaliteit van water, bodem en ecologie?*
- *Denkt u dat het doel van de definitie-studie reëel gesteld is?*

Inkadering en randvoorwaarden

Belangrijke beheersmaatregelen die hun invloed hebben (gehad) op de morfologische dynamiek van het Westerschelde estuarium betreffen maatregelen ten behoeve van de functies veiligheid en bevaarbaarheid. De beheerder wil de morfologische dynamiek behouden of zo mogelijk versterken zonder dat de veiligheid en de vaarwegfunctie in gevaar komen. De geometrische grenscontouren van het estuarium in het horizontale vlak hangen sterk samen met de veiligheidsfunctie. In eerste instantie denkt de beheerder niet aan opties deze contouren te wijzigen. Anders ligt dit met de locatie van de grensdiepten langs de vaargeul. Dit impliceert dat de mogelijkheden voor behoud of versterking van dynamiek gezocht dienen te worden in plaat en geul dynamiek binnen de huidige ruimtelijke contouren. Met andere woorden, formeel gesteld wordt de ruimte voor morfologische dynamiek niet "in de breedte of lengte", maar "in de diepte" gezocht.

Er wordt impliciet verondersteld dat meer morfologische dynamiek synoniem is aan een meer natuurlijk estuarium. Hierbij wordt gedacht aan de relaties tussen de morfologische dynamiek van het estuarium en de waterkwaliteit, de bodemkwaliteit, de ecologie en de veiligheid. De vraag of dynamiek inderdaad zo belangrijk is staat niet ter discussie; dat kan als uitgangspunt voor de huidige studie worden beschouwd. Het is wel belangrijk bij de formulering van bijvoorbeeld de studievoorstellen referenties te maken naar de relaties tussen de morfologische dynamiek, natuurlijkheid en de genoemde vier aspecten.

Onder morfologische dynamiek wordt verstaan de intensiteit en de frequentie van morfologische veranderingen en het daaraan gerelateerde sediment-transport. Op verschillende ruimte- en tijdschalen kan onderscheid worden gemaakt tussen mega-, macro-, meso- en micro-schaal dynamiek.

- **Mega-schaal dynamiek:** Veranderingen op de ruimtelijke schaal van het hele estuarium of van de grote compartimenten van het estuarium, inclusief de uitwisseling met het mondingsgebied en aanliggende kust. De bijbehorende tijdschalen zijn eeuwen. De relevante externe forceringen (natuurlijke en menselijke) zijn zeespiegelrijzing en zandwinning.
- **Macro-schaal dynamiek:** Veranderingen op het niveau van hoofd- en nevengeulen, zoals functiewisseling van de geulen. De bijbehorende tijdschalen zijn decennia. De relevante externe forcering zijn verdiepingen, onderhoudsbaggeren, storten, 18,6 jarig cyclus van getij, extreme condities en dergelijke.
- **Meso-schaal dynamiek:** Veranderingen zoals ontstaan, migreren en verdwijnen van kortsluitgeulen, sediment transport over de platen, plaat-geul uitwisseling. Bijbehorende tijdschalen zijn jaren. Relevante externe forcering zijn extreme condities, baggeren en storten.
- **Micro-schaal dynamiek:** Veranderingen op niveau van bedding vormen zoals mega-ribbels. Bijbehorende tijdschalen zijn dagen. Relevante externe forcering (direct forcing) is alleen natuurlijk.

De huidige studie concentreert zich volgens de opdracht op de macro- en meso-schaal dynamiek. Verondersteld wordt dat juist op deze schaalniveaus door de mens de meeste invloed kan worden uitgeoefend. Morfologische dynamiek op mega- en micro-schalen mogen wel meegenomen worden wanneer het nodig blijkt te zijn.

Vragen:

- *Hoe denkt u over de inkadering van de studie?*
- *Hoe denkt u over het onderscheid in schalen en de definities daarvan?*
- *Bent u het eens met de concentratie op macro- en meso-schalen?*

Wijze van aanpak

De studie wordt gebaseerd op drie informatiebronnen. In de eerste plaats betreft dat rapportages en studies die specifiek zijn verricht voor de Westerschelde, met een bijzondere rol voor de zogenaamde OOSTWEST studie. Daarnaast zullen rapportages en studies die zijn verricht voor vergelijkbare estuaria worden gebruikt. Tenslotte zullen recente inzichten in estuarien gedrag in het algemeen en van de Westerschelde in het bijzonder, zoals bestaand bij Nederlandse experts, worden toegepast. Het projectteam van WL heeft als taak de rapportages en studies te analyseren en de inzichten die bij de experts aanwezig zijn in kaart te brengen. De aanzet tot de analyse vormt de voorbereiding van een workshop, waar de experts worden uitgenodigd hun visie in het algemeen en op de analyse in het bijzonder te geven. De resultaten van de workshop worden gebruikt om tot een definitieve analyse van de bestaande kennis te komen en om aan te geven hoe kennis en inzichten vergroot kunnen worden.

Vraag:

- *Wat vindt u van de wijze van aanpak?*

Aanzet tot analyse: hypothesen en indicatoren

De analyse van verrichte rapportages en studies voor estuaria in het algemeen en voor de Westerschelde in het bijzonder leidt tot een aantal hypothesen over het natuurlijke en het door menselijke ingrepen beïnvloede morfodynamische gedrag van het Westerschelde estuarium. Een van de doelen van de workshop is het toetsen van deze hypothesen. Een opsomming van bestaande en nieuwe hypothesen volgt hierna.

Hypothesen geformuleerd en getoetst in de OOSTWEST studie:

1. Het estuarium verlandt snel doordat de komberging vermindert, dat is de totale hoeveelheid water, die in de Westerschelde tussen laag- en hoogwater kan worden geborgen.
2. Natuurlijke veranderingen in de loop van de hoofdrijver en de cyclische functiewisseling tussen hoofd- en nevengeul komen steeds minder voor; de morfologische dynamiek op grote schaal, de macro-dynamiek, neemt af. Tegelijkertijd vertoont de bodem steeds meer beweging; de dynamiek op kleine schaal, de micro-dynamiek, neemt toe.
3. De zand huishouding van de Westerschelde en de uitwisseling van sediment met het mondingsgebied worden gestuurd door de lange termijn effecten van de inpolderingen in het verleden en het baggeren, storten en winnen van zand in het heden.
4. De veranderingen leiden tot een minder compleet en natuurlijk estuarium, dat versneld aan het verlanden is.
5. Het estuariene karakter van de Westerschelde wordt bedreigd. Het totale oppervlak is drastisch verminderd en daarmee ook het leefgebied van voor dit gebied kenmerkende vogels en vissen.
6. Minimalisering van de baggerinspanning kan worden bereikt door baggerspecie meer naar het westen te storten, de zandwinning in het oostelijk deel van de Westerschelde te concentreren en de komberging te vergroten.
7. Gecontroleerde uitbreiding van overstromingsgebied draagt bij tot vergroting van de komberging, verlaging van de hoogwaterstanden bij stormvloeden (veiligheid) en herstel natuurwaarden.

Vragen:

- *Welke van deze hypothesen mogen als geverifieerd beschouwd worden en welke hebben nog onderbouwing nodig?*
- *Bevinden deze hypothesen zich vooral op de schaal van macro- en meso-dynamiek?*

Nieuwe hypothesen:

1. Het voorgestelde nieuwe stortbeleid (het verder weg brengen van de baggerspecie van het oostelijke deel naar het westelijke deel van het estuarium) zal tot gevolg hebben dat de macro-schaal forcering vermindert en de mega-schaal forcering versterkt. Daarom wordt verwacht dat de macro-schaal dynamiek minder zal worden beïnvloed terwijl de mega-schaal dynamiek juist meer zal worden beïnvloed.
2. Ingrepen hebben vooral effect op ontwikkelingen van dezelfde ruimte- en tijdschalen als die van de ingrepen zelf. Voorbeeld: het baggeren in de hoofdrijver en storten in de bijbehorende nevengeul is een ingreep op macro-schaal en zal vooral invloed hebben op de macro-schaal dynamiek.

3. Voor dynamiek op verschillende schalen zijn verschillende indicatoren nodig. Het is daarom niet mogelijk om één indicator voor morfodynamiek te definiëren.
4. Om de macro- en meso-dynamiek te begrijpen is ook kennis van micro- en megadynamiek nodig. Dit betekent dat om de beheervragen die vooral betrekking hebben met macro- en meso-dynamiek afdoende te kunnen beantwoorden ook onderzoek naar micro- en mega-dynamiek nodig is.
5. Er is een sterk samenhang tussen de macro- en meso-dynamiek. Ontstaan, ontwikkeling en uitsterven van kortsluitgeulen kan niet los worden gezien van de ontwikkeling van het eb- en vloedgeulen systeem. In vergelijking hiermee zijn de samenhangen tussen mega- en macro-dynamiek en tussen meso- en micro-dynamiek minder.
6. Op de mega- en macro-schalen is de invloed van incidentele gebeurtenissen, zoals stormen, niet belangrijk.
7. Het kortsluitgeulen ontstaan vooral tijdens stormen. Toch is het niet noodzakelijk om de invloed van de stormen mee te nemen om het gedrag van de kortsluitgeulen te bestuderen, omdat de tendens tot ontstaan en het gedrag van kortsluitgeulen vooral worden bepaald door de getijstroming.
8. Een morfologisch model hoeft niet persé in staat te zijn om de natuurlijke lange termijn ontwikkeling van het estuarium weer te geven om effecten van bepaalde ingrepen te kunnen voorspellen.
9. Het is niet mogelijk om een alles omvattend morfodynamisch model te bouwen. Ook in de toekomst zullen wij een serie modellen van verschillende typen en op verschillende detailniveaus nodig hebben om verschillende vragen van de beheerder te kunnen beantwoorden.
10. Drempelvorming en de daarmee samenhangende benodigde hoeveelheid baggerwerk hangt sterk samen met plaat-geul uitwisseling. Het is daarom de vraag of het verder wegbrengen van de baggerspecie de benodigde baggerinspanning zal verminderen.
11. De totale ingreep in de Westerschelde is in dezelfde orde van grootte als het sedimenttransport.
12. Het is beter de morfologische eenheden (zoals volgens Huijs) te hanteren dan de compartimenten afgeleid van de lodingskaarten.
13. Er bestaat een directe relatie tussen de morfodynamiek en de veerkracht van het estuarium. Hoe dynamischer het systeem hoe groter de veerkracht.
14. Relatie morfodynamiek-verlanding: Er is geen eenduidig verband tussen het niveau van morfologische dynamiek en de snelheid van verlanding in een estuarium.
15. Relatie morfodynamiek-scheepvaart: Morfologische dynamiek is niet gunstig voor scheepvaart omdat een dynamischer systeem voor meer sedimentatie in baggergebieden zorgt.
16. De morfologische veranderingen in de Westerschelde worden vooral bepaald door zandtransporten. Toch is het ook belangrijk slibtransporten mee te nemen in de studie naar morfologische dynamiek.

Indicatoren voor morfologische dynamiek

Indien het mogelijk is gebleken morfologische dynamiek van een estuarium op de verschillende schalen te beschrijven, moet het begrip concreet gemaakt worden met behulp van indicatoren. De te definiëren indicatoren voor de morfologische dynamiek op een

bepaald moment moeten voldoen aan een tweetal eisen. In de eerste plaats dienen de indicatoren kwantitatief te bepalen te zijn. Dat wil zeggen dat het mogelijk moet zijn er een absoluut of relatief getal aan toe te kennen. In de tweede plaats moeten de waarden van de indicatoren objectief en eenduidig zijn vast te stellen uit velddata en/of uit modelresultaten. Verder is het wenselijk dat de diverse indicatoren de effecten van ingrepen duidelijk weergeven en dat de waarden van de indicatoren een duidelijk verband hebben met de vier aspecten waterkwaliteit, bodemkwaliteit, ecologie en veiligheid.

Mogelijke indicatoren:

1. De gemiddelde bodemniveau veranderingen zoals gedefinieerd door Sistermans (1997).

$$\text{Dynamiekgetal} = (\text{erosievolume} + \text{sedimentatievolume}) / (\text{gebiedoppervlakte} * \text{tijdverschil})$$
 Dit getal heeft de dimensie $[LT^{-1}]$ en fysisch betekent het de gemiddelde bodemniveau-veranderingssnelheid. Sistermans heeft het getal bepaald voor de zes lodingsvakken en voor verschillende tijdsintervallen. Hij constateert dat het dynamiekgetal afneemt naarmate het gehanteerde tijdsverschil groter wordt. Hij constateert ook dat het dynamiek getal in het oostelijke deel van Westerschelde is afgenomen.
2. Frequentie van functie-wisseling van de geulen. Functie-wisseling tussen hoofdgeul en nevengeul wordt als een belangrijk kenmerk van morfologische dynamiek op macroschaal beschouwd. Daarom wordt als indicator voorgesteld het aantal keren per tijdseenheid dat een dergelijke functiewisseling plaatsvindt. Dit kan voor zowel het hele estuarium als voor een bepaald geul-plaat systeem worden gedefinieerd. Beperking: het tijdsinterval dat voor deze indicator wordt gebruikt moet relatief groot zijn ten opzichte van de morfologische tijdschaal behorend bij macroschaal ontwikkeling.
3. Het aantal kortsluitgeulen per hoofdgeul-nevengeul-plaat systeem. Als één van de indicaties dat de ingrepen van de afgelopen decenia negatieve invloed hebben op de morfologische dynamiek wordt genoemd dat steeds minder kortsluitgeulen voorkomen. Dit is het achtergrond van de definitie van deze indicator.
4. Het aantal kortsluitgeulen per eenheid lengte van het estuarium. Deze indicator is afgeleid van de vorige. In plaats van kijken per geul-plaat systeem wordt nu gekeken naar het hele estuarium. Om een vergelijking met andere estuaria mogelijk te maken wordt het aantal door de lengte van het estuarium gedeeld.
5. Totaal (eb-/vloed-) transport door de geul. Morfologische veranderingen hangen nauw samen met het sedimenttransport. Het totale sedimenttransport tijdens vloed / eb door een geul is een maat voor de snelheid waarmee een geul op ingrepen binnen de geul kan reageren. Opgemerkt wordt dat deze indicator veel makkelijk uit model resultaten is af te leiden dan direct uit metingen.
6. Het netto-transport door de geul. Morfologische veranderingen worden bepaald door het netto-transport, oftewel het verschil tussen eb- en vloed-transport. De grootte van het netto-transport is wellicht een indicator voor de morfologische dynamiek. Hier geldt nog sterker dat deze indicator moeilijk is te bepalen uit metingen. Model resultaten met betrekking tot deze indicator zijn ook meestal onnauwkeurig.
7. Het netto circulatie-transport rondom een plaat. Het netto-transport kan ontbonden worden in een doorgaande component en een component die circuleert rondom een plaat. De circulerende component is meer een indicator voor ontwikkelingen op macroschaal terwijl de doorgaande component meer voor ontwikkeling op megaschaal is.
8. Verhouding transport in nevengeul ten opzichte van de hoofdgeul. Uit de OOSTWEST studie is gebleken dat één van de kenmerken van de veranderingen tot nu toe is, dat de

nevengeulen een steeds minder belangrijke rol spelen. Daarom wordt als indicator de relatieve verhouding tussen de transporten voorgesteld.

9. Verhouding ingreep ten opzichte van de transportcapaciteit in de beschouwde morfologische eenheid. Deze indicator wordt voorgesteld om de effecten van ingrepen te benadrukken. Uit een eerdere studie is gebleken dat wanneer de hoeveelheid baggeren/storten boven een bepaald percentage van het totale transport door de geulen komt, een hoofdgeul nevengeul systeem instabiel wordt.
10. Indicatoren af te leiden uit spectraal analyse van een bodemniveau data serie. Een wild idee dat nog nadere uitwerking behoeft.

Vragen:

- *Wat is volgens u het belang van morfologische dynamiek?*
- *Hoe zou u morfologische dynamiek klassificeren?*
- *Welke indicator(en) zou u willen hanteren voor de morfologische dynamiek?*
- *Welke soorten onderzoek zijn nodig voor het begrijpen van de morfologische dynamiek in de Westerschelde? Waarop zou u de nadruk willen leggen?*
- *Heeft u concrete studievoorstellen?*
- *Wat is volgens u een goede definitie van veerkracht en natuurlijkheid van een estuarium?*

Verslag van de workshop

Vraag RIKZ en eerder onderzoek

Voorgeschiedenis

Aan het einde van de jaren '80 werd door Rijkswaterstaat de pilot-studie OOSTWEST uitgevoerd. De achtergrond hiervan was de waarneming dat het Westerschelde estuarium zeer intensief door de mens wordt gebruikt, zonder dat een goed inzicht bestaat in de gevolgen van dat gebruik. Geconstateerd werd dat het estuarium versneld aan het verlanden is, waardoor de leefomstandigheden van planten en dieren verslechtert. Aan deze situatie zou wat kunnen worden verbeterd door de baggerinspanning in de Schelde te minimaliseren en de estuarine gradiënten te herstellen en zo mogelijk versterken. De uitkomsten van de pilot-studie leidden ertoe dat de morfologische structuur van de Westerschelde onder grote belangstelling kwam te staan. Anders dan voorheen, toen uitsluitend aandacht werd geschonken aan waterkwaliteit en ecologie, begon het beheer zich ook op de morfologie te richten. Tevens bleek uit de pilot-studie dat de kennis van het fysische en ecologische systeem van de Westerschelde op belangrijke punten tekort schoot. Om dit probleem aan te pakken werd de OOSTWEST studie uitgevoerd. In deze studie werd onderzoek uitgevoerd naar de getijdoordringing in de Schelde, de morfologie van het Scheldebekken en naar de biologie en ecologie van de Schelde. De studie leidde tot de volgende conclusies. De veronderstelde afname van de komberging bleek te worden gecompenseerd door de toename van het tijverschil in de Westerschelde. De morfologie van vooral het oostelijk deel van de Westerschelde wordt sterk beïnvloed, wat leidt tot verstarring (afname van de

dynamiek). De gevolgen van het intensieve gebruik voor de biologie bleken minder eenvoudig aantoonbaar. Gebleken is dat het ecosysteem een grote tolerantie heeft voor dynamiek, inclusief door de mens opgelegde stress. Ter versterking van het beheer van het estuarium wil Rijkswaterstaat in de toekomst verder onderzoek uitvoeren naar onder andere de compensatie van de komberging, de verstarring van de morfologie (gebrek aan dynamiek) en het adaptatievermogen van de biologie.

Aandachtspunten bij studie naar Morfologische Dynamiek

Rijkswaterstaat beschouwt de morfologische dynamiek van de Westerschelde als waardevol en nuttig. Onderkend wordt dat het belang van morfologische dynamiek nog steeds een subjectieve veronderstelling is. Dat is echter geen reden het onderzoek naar die dynamiek te vertragen. De functie van de dynamiek kan worden geïllustreerd met behulp van een vergelijking tussen de Westerschelde en de andere (voormalige) estuaria in de Delta. Morfologische dynamiek heeft een positieve invloed op de kwaliteit van de waterbodem, vergelijk met het Haringvliet en het Hollands Diep. Morfologische dynamiek heeft ook een positieve invloed op de robuustheid van het ecosysteem, vergelijk met het fragiele systeem van de Grevelingen. Tenslotte heeft morfologische dynamiek een positieve invloed op de morfologie, vergelijk de Westerschelde met de Oosterschelde, waar na de aanleg van de Stormvloedkering de morfologie niet meer in staat blijkt te zijn zich te herstellen van schade die ontstaat onder extreme omstandigheden.

Duidelijk herkende problemen met betrekking tot morfologische dynamiek zijn de fixatie van de hoofdgeul (door oeverbescherming en baggerwerk), het opvullen van de nevengeulen, de afname van laaggelegen laagdynamische gebieden, de concentratie van de getijgolf in de geulen en de toename van het tijverschil. Overigens spelen deze problemen veel sterker in het oostelijke deel van de Westerschelde dan in het westelijke deel, waar de morfologische processen nog min of meer natuurlijk verlopen. Belangrijke openstaande vragen met betrekking tot morfologische dynamiek betreffen de relatie tussen deze dynamiek en de ecologie (mate van beïnvloeding), en de kennis van morfologische processen (algemene concepten, de rol van ruimte en het rondpompen van baggerspecie).

Discussie

Naar aanleiding van deze inleiding ontstond er een discussie over de omschrijving, de rol en de noodzaak van morfologische dynamiek. Hieruit werd (overigens niet voor de eerste keer) duidelijk dat de terminologie van de beheerder niet direct aansluit bij de (meer concrete) belevingswereld van de deskundige. Waar de beheerder gemakkelijk en graag een waardeoordeel uitspreekt over de rol en het nut van morfologische dynamiek, is dat voor de deskundige niet altijd even voor de hand liggend. Zo is een oordeel over de kwaliteit of de compleetheid van een ecosysteem niet eenvoudig te geven, zonder eerst gedetailleerde streefbeelden vast te stellen. Daarnaast ontstond een uitgebreide discussie over morfologische dynamiek, waarbij de definitie van deze dynamiek aan de orde kwam, naast de verschillende soorten dynamiek (cyclisch of niet cyclisch, schaalniveaus) en de wenselijkheid ervan. Door de beheerder werd nogmaals uitgelegd dat in de loop van de tijd in de Westerschelde een afname van de dynamiek op het schaalniveau van geulen en platen wordt geconstateerd. Hierdoor kunnen bepaalde typische functies van het estuarium in het gedrang komen, of zelfs naar buiten het estuarium worden verplaatst of verdwijnen. Deze ontwikkeling wordt als ongewenst ervaren.

Relatie tussen morfologische dynamiek en de natuur van de Westerschelde

Het belang dat wordt gehecht aan morfologische dynamiek wordt onder andere gemotiveerd door erop te wijzen dat een toename van de dynamiek de natuurlijkheid van het estuarium versterkt. Om de rol van morfologische dynamiek voor de natuurlijkheid vast te stellen worden eerst enige definities gegeven. Onder natuurlijkheid kan worden verstaan (één van de mogelijke definities): de mate waarin ruimte en tijd wordt gegeven aan fysische, chemische en biologische processen. Opgemerkt wordt dat natuurlijkheid volgens deze definitie niet overeenkomt met authenticiteit, vergelijk de Oostvaardersplassen die wel natuurlijk worden gevonden, maar zeker niet authentiek zijn. Over het algemeen geldt echter wel dat de natuurlijkheid toeneemt naarmate de menselijke bemoeienis afneemt. Daarnaast is het begrip compleetheid / kenmerkendheid van belang. Hieronder wordt verstaan de mate waarin voor het ecologisch functioneren belangrijke en karakteristieke ecotopen, inclusief hun levensgemeenschappen en biologische productiviteit aanwezig zijn, met de daarbij van nature optredende fluctuaties. Ook de onderlinge verhoudingen en volgorde waarin ecotopen aanwezig zijn is van belang. Het begrip dynamiek betreft de mate van veranderlijkheid van natuurlijke processen. In een estuarium als de Westerschelde is van nature sprake van een grote dynamiek. Deze grote dynamiek leidt tot een grote verscheidenheid aan ecotopen en overgangen (nat naar droog, zoet naar zout, diep naar ondiep, zandig naar slibrijk, kalm naar onrustig). Onder morfologische dynamiek kan worden verstaan: de intensiteit en de frequentie van morfologische veranderingen en het daaraan gerelateerde sediment transport.

Na het vastleggen van bovenstaande definities kan worden gekeken naar de relatie tussen morfologische dynamiek en natuurlijkheid. Zoals reeds vastgesteld is natuurlijkheid gelijk aan ongestoordheid. Hieruit volgt dat zolang de morfologische dynamiek ongestoord zijn gang kan gaan, een systeem (morfologisch gezien) natuurlijk is. De relatie tussen morfologische dynamiek en compleetheid is zeer verschillend voor specifieke natuurlijke (deel)systemen. Zo bestaat een schor bij de gratie van een lage morfologische dynamiek (immers: intensiteit en frequentie van de morfologische veranderingen is klein). Een zandplaat echter bestaat uitsluitend bij een hoge morfologische dynamiek.

Wanneer het hoogste doel van de beheerder is het herstellen van de natuurlijkheid, zal hij iedere vorm van beheer en beïnvloeding moeten staken of tenminste moeten minimaliseren. De consequentie daarvan is dat allerlei functies in dat geval in gevaar komen, onder andere de scheepvaartfunctie en de veiligheid die de beheerder juist als harde randvoorwaarden voor het beleid ziet. De compleetheid van een estuarium wordt vergroot, wanneer er sprake is van een grotere verscheidenheid aan morfologisch dynamische omstandigheden. Er moet daarbij ruimte worden geboden aan een natuurlijke schakering van lage tot hoge morfologische dynamiek. De vraag is natuurlijk wanneer de Westerschelde als compleet kan worden beschouwd. Om deze vraag te kunnen beantwoorden is een streefbeeld voor een complete Westerschelde noodzakelijk en moet de compleetheid kunnen worden gemeten en voorspeld. Op dit moment kunnen oppervlaktes aan ecotopen (platen en slikken die hoog- of laag dynamisch zijn, slibarm of slibrijk en schorren, die jong of volwassen zijn) worden gemeten, maar de vraag kan worden gesteld in hoeverre de morfodynamische kennis

aansluit bij deze indeling. Het is bijvoorbeeld nog niet mogelijk het slibgehalte te voorspellen.

Discussie

Aan de hand van deze inleiding werd gediscussieerd over de relatie tussen morfologische kennis en ecologische kennis. Zo is het bijvoorbeeld zeer de vraag of indeling in klassen die door beide groepen deskundigen worden gehanteerd wel met elkaar vergelijkbaar zijn. Ook is het voor morfologen nog zeer lastig om voorspellingen te doen over de mate van dynamiek of het slibgehalte van een bepaalde lokatie. Op dit moment worden deze parameters nog het meest nauwkeurig bepaald aan de hand van karteringen. De uitdaging van de ecologen aan de morfologen is duidelijk: nauwkeuriger voorspellen van de micro-dynamiek en het slibgehalte zou een grote stap voorwaarts betekenen. Vergelijk bijvoorbeeld met de redelijke mogelijkheden om dieptezonering (ook van groot belang voor de ecologie) te voorspellen. Geconstateerd werd dat kale cijfers over de biomassa niet maatgevend zijn voor de status van het ecosysteem. Zo is bijvoorbeeld soortensamenstelling en variatie in de ruimte en de tijd ook van groot belang bij het beoordelen van de conditie van het ecosysteem.

Daarnaast werd ook gesproken over de rol van morfologische dynamiek voor de ecologie in de Westerschelde. Geconstateerd werd dat de laaggelegen slibrijke gebieden onder druk staan in de Westerschelde. De microdynamiek op deze gebieden (schuifspanning aan de bodem, dynamiek van de bodem) is bepalend voor de mogelijkheden van soorten om zich te kunnen vestigen of handhaven. Voor deze micro-dynamiek is ook meso-dynamiek (verplaatsen van kortsluitgeulen) van belang, omdat daardoor de configuratie van de platen en dus de beschikbaarheid van laaggelegen gebieden wordt bepaald. Tenslotte kunnen door morfologische dynamiek in de bodem opgelagen voedingsstoffen vrijkomen. Het gaat hierbij weliswaar niet om hoge concentraties of hoogwaardige voedingsstoffen, maar als door een hoge dynamiek veel sediment wordt omgewoeld kan dit toch een significante bijdrage leveren aan de beschikbaarheid van voedingsstoffen in de Westerschelde.

Minder duidelijk werden de gevolgen van morfologische dynamiek voor de kwaliteit van water en bodem. Toch is het zaak ook voor deze aspecten te achterhalen welke invloed morfologische dynamiek heeft.

Morfologische dynamiek: verschillende schaalniveau's

In een estuarium als de Westerschelde kan een grote verscheidenheid aan verschillende ruimteschalen gevonden worden, variërend van de afmetingen van het gehele estuarium tot aan de afmetingen van een watermolecuul. Het is duidelijk dat dit spectrum van 15 orden van grootte niet in één model valt te beschrijven. In de beschouwingen over de morfologie van een estuarium kunnen, gezien de karakteristieke situaties en processen, de volgende schalen worden onderscheiden.

- | | | | |
|---|--------------|--|---------------|
| 1 | Mega-schaal | het hele estuarium, van zee tot aan Gent | 170 kilometer |
| 2 | Macro-schaal | secties met grotere geuldelen en platen | 25 kilometer |

3	Meso-schaal	kleinere geulen in banken, slikken en schorren	enkele kilometers
4	Micro-schaal	bodemvormen, ribbels tot aan duinen	0,1 tot 100 meter
5	Nano-schaal	sedimentkorrels	1 millimeter

Discussie

Ook na deze presentatie is er aanleiding om te discussiëren over de exacte definiering van het begrip morfologische dynamiek. Gesteld werd dat deze dynamiek op ieder verschillend schaalniveau anders zal moeten worden gedefinieerd. Zo is de tijdschaal voor ieder ruimtelijk schaalniveau anders en bestaat er ook niet zoiets als een constante lengte-breedte verhouding. Dit zal ook de monitoring van de morfologische dynamiek op de verschillende niveau's bemoeilijken. Toch wordt ook gecontateerd dat voor de Westerschelde reeds zeer veel metingen beschikbaar zijn, zodat uitgebreide analyse op diverse schaalniveau's ook nu al mogelijk is. In dit verband wordt ook het Duitse Moran-onderzoek genoemd, waarin geprobeerd is om morfodynamiek kwantitatief te beschrijven.

Verder wordt nog opgemerkt dat bij het analyseren van de mega-schaal het kustgebied als eenheid dient te worden meegenomen. Daarnaast is het duidelijk dat bij de analyse van morfologische dynamiek sedimenttransporten los moeten worden gezien van vormen.

Numeriek modelleren: stand van zaken

Getijdebekkens worden gekenmerkt door sterke stroomsnelheden, grote sedimenttransporten (van zowel cohesief als niet cohesief materiaal), een complexe geomorfologie en een hoge morfodynamiek (gedefinieerd als variabiliteit in ruimte en tijd van de morfologie). Gevraagd wordt of de wisselwerking tussen water en bodem beschreven, gemodelleerd, begrepen en zelfs voorspeld kan worden.

Bij de opzet van een model wordt doorgaans gekozen voor een fysisch georiënteerde aanpak. Hiervoor zijn de basiswetten van de waterbeweging en de sedimentbalans bekend en zijn parameterisaties van het sedimenttransport voorhanden. In principe kan hiermee een model worden gebouwd. Echter, een op deze manier gebouwd model kan geen foutloze reproductie van de werkelijkheid geven, als gevolg van onder andere onzekerheden in de modelformulering, fouten in de randvoorwaarden en interne foutengroei. Om deze redenen wordt het uiteindelijke ontwerp van een model afgestemd op de vraagstelling (onder andere de toepasselijke tijd- en ruimteschalen), de gewenste uitvoer (patronen of parameters) en de randvoorwaarden die voor het betreffende probleem van belang zijn. Hieruit volgens tevens de problemen waarmee de modelbouwer wordt geconfronteerd. In de eerste plaats is er in de te modelleren werkelijkheid sprake van een breed spectrum aan verschillende tijd- en ruimteschalen, van niet-lineaire wisselwerkingen, van onzekerheden in de input en van beperkingen in de proceskennis. Het bouwen van een geschikt model komt daarom neer op het maken van een aantal keuzen:

In de eerste plaats dient te worden gekozen voor een geschikt modeltype (procesfiltering), waarbij keuzen worden gemaakt voor de schalen van beweging en de manier van parameterisatie van kleinschalige processen.

Daarnaast moet de keuze gemaakt worden voor de manier van inputfiltering. Wordt voor het betreffende probleem gekozen voor invoer van een representatief getij (zoals een "morfologisch getij") of worden juist extremen meegenomen (stormklimaat).

Nadat deze keuzen zijn gemaakt kan worden gestart met de bouw van het eigenlijke model. Hierbij moeten nog keuzen als de benodigde ruimte- en tijdstappen worden gemaakt en afwegingen tussen rekenkundige instabiliteit, nauwkeurigheid, benodigde rekentijd en geheugengebruik worden gemaakt.

Uiteindelijk worden voor verschillende doelen verschillende typen modellen ingezet. Op dit moment kunnen vier modeltypen worden onderscheiden:

1. Procesgeoriënteerde modellen. Deze vorm van modelleren is vooral bedoeld voor nauwkeurige simulatie van waarnemingen en operationele voorspellingen (niet al te lange termijn). Voordelen van procesgeoriënteerde modellen zijn de fysische achtergrond en de relatief eenvoudige interpretatie van de uitkomsten. Nadelen zijn de rekentijd (en daarmee kostprijs) en de numerieke en inherente foutenaccumulatie. Dit type modellen leent zich hierdoor minder goed voor gevoeligheidsstudies. Voorbeeld: Delft2D-MOR.
2. Geïdealiseerde modellen. Deze modellen zijn vooral bedoeld voor het verkrijgen of vergroten van inzicht in bepaalde processen. Hiervoor zijn de modellen schematisch van opzet, waardoor de relatie met de werkelijkheid minder eenvoudig is. Voordelen van dit soort modellen zijn de snelheid en de voorspelbaarheid ervan, waardoor ze goed kunnen worden ingezet voor gevoeligheidsstudies. Nadeel is de beperkte relatie met de werkelijkheid, waardoor ze alleen voor zeer specifieke problemen kunnen worden ingezet. Voorbeelden: 1D model Westerschelde van De Jong & Heemink, 2D model van Schuttelaars & De Swart en het bankenmodel van Seminara & Tubino.
3. (Semi-) empirische modellen. Deze modellen zijn deels gebaseerd op fysica en deels op empirische relaties (zoals de bekende Q-A relatie). Semi-empirische modellen worden vooral ontwikkeld met het oog op lange-termijn voorspellingen. Voordelen van deze modellen zijn de rekensnelheid en de geschiktheid voor langere termijn voorspellingen. Er is reeds een aantal succesvolle toepassingen ontwikkeld, onder andere voor de Westerschelde. Nadelen zijn de empirische achtergrond, de sterke afregeling waardoor deze modellen moeilijk generiek toepasbaar zijn en het feit dat deze modellen over het algemeen weinig inzicht verschaffen. Voorbeelden: Estmorf, Asmita, Van Dongeren & De Vriend.
4. Datagedreven modellen. Deze modellen zijn gebaseerd op (stochastische) analyse van veldmetingen. Voorbeeld van deze aanpak is het zoeken naar de relatieve bijdrage van ieder proces aan de totale variantie van het systeem. Voordelen van deze aanpak zijn de sterke band met veldgegevens en de voorspellende potentie. Nadeel is de problematische relatie met de onderliggende dynamica. Voorbeelden: Heemink, Jansen.

Toepassing op de Westerschelde

Onderzoek naar de morfodynamiek van de Westerschelde zou zich kunnen richten op een aantal onderwerpen. Het dynamische gedrag van de hoofd- en nevengeulen op een tijdschaal van maanden tot jaren en een ruimteschaal van honderden meters tot een paar kilometer. Hiervoor ligt modellering van een koppeling tussen waterbeweging en bodem voor de hand. Voor correcte modellering van de effecten van ingrepen moeten menselijke ingrepen en veranderingen in de randvoorwaarden worden meegenomen. Ook mogelijk is een meer geïntegreerde aanpak van de modellering, waarbij de ontwikkeling van de kennis

gelijk loopt met het gebruik ervan. Daarnaast is het mogelijk het modelwerk meer te richten op beschrijving van het gedrag van het morfodynamische systeem, waarbij modellering van patroondynamica (niet alleen parameters als geulactiviteit) noodzakelijk is. Voor goede representatie van de getij-asymmetrie is het nodig restcirculaties en transportbanen van het sediment mee te nemen. Hiervoor zal een sterke koppeling met veldmetingen noodzakelijk zijn. Tenslotte is voor de verklaring van het gedrag van geulen en drempels modellering van fysische processen het meest voor de hand liggend.

Discussie

De inleiding van Huib de Swart is gericht op de mogelijkheden van de modelbouwer, dus eigenlijk op de aanbodzijde van de markt. In de inleiding van Martin Baptist is de vraag aan de orde geweest: wat we nodig hebben om de relatie tussen morfodynamiek en kwaliteit van water en bodem en de ecologie te leggen. Hiervoor is bijvoorbeeld informatie over de sedimentsamenstelling van het bodemmateriaal nodig, en die kunnen we nog niet modelleren, laat staan voorspellen. Ook het gecombineerd berekenen van zand- en slibtransport is een probleem. Zoals eerder geconstateerd is dit probleem één van de grootste beperkende factoren bij de voortgang van de integratie van morfologie en hydraulica met ecologie en kwaliteit van water en bodem!

Morfologische indicatoren

Voor deze studie wordt onder morfologische dynamiek verstaan de intensiteit en de frequentie van morfologische veranderingen en het daaraan gerelateerde sedimenttransport. Hierbij wordt vooral gekeken naar de macro- en mesoschaal. Een belangrijk doel van deze studie is het definiëren van kwantitatieve indicatoren die deze dynamiek kunnen beschrijven. Deze indicatoren dienen aan een aantal eisen te voldoen. In de eerste plaats is het van belang dat de indicatoren op objectieve en eenduidige manier kwantitatief te bepalen zijn uit velddata en/of modelresultaten. Daarnaast is het van belang dat met een minimaal aantal indicatoren het systeemgedrag zo compleet mogelijk wordt beschreven. Hiervoor moeten de effecten op waterkwaliteit, bodemkwaliteit, ecologie en veiligheid van ingrepen worden weergegeven. Waarschijnlijk is het niet mogelijk hiervoor één indicator te definiëren en zijn verschillende indicatoren nodig voor verschillende schalen en verschillende beheersaspecten. In eerste instantie wordt de discussie beperkt tot een viertal beheersaspecten: waterkwaliteit, bodemkwaliteit, ecologie en veiligheid. Indicatoren die hiervoor in aanmerking komen zijn:

- gemiddelde bodemniveauperandering volgens Sistermans, eventueel ook te gebruiken als representant van enorme hoeveelheden data
- frequentie van functie-wisseling van geulen
- aantal kortsluitgeulen (eventueel per lengte-eenheid)
- verhouding verschillende morfologische eenheden
- totaal transport door een geul
- netto transport door een geul
- circulatie-transport
- verhouding transport nevengeul-hoofdgeul
- verhouding ingreep-transport

- wild idee: spectraal analyse morfologische veranderingen?

Discussie

Naar aanleiding van deze inleiding wordt opgemerkt dat het verband met de waterkwaliteit, bodemkwaliteit en de ecologie zeker nog niet is gelegd in de voorgestelde indicatoren. Hiernaar zal nog verder moeten worden gekeken. Verder is het misschien mogelijk nog een indicator te verzinnen om bepaalde patrooneigenschappen vast te leggen, in plaats van de voorgestelde enkelvoudige parameters.

Mogelijke andere indicatoren:

- functiewisseling gekoppeld aan transporten
- dominantie van een geul(deel) (in 2DH model zelfs per cel te bepalen)
- kronkelfactor voor estuarium

Conclusies

Samenvattend kan worden vastgesteld dat de definitie van morfologische dynamiek nog steeds problemen oplevert, vooral bij discussies tussen de beheerder en specialistische deskundigen. Wellicht geen doel van het hier beschreven onderzoek, toch lijkt het verstandig aan deze spraakverwarring wat te doen. Hiervoor is vooral enige flexibiliteit van de kant van de specialisten noodzakelijk.

De presentaties en discussies hebben duidelijk gemaakt waar kennistekorten van het fysisch systeem en beperkingen in de mogelijkheden om ontwikkelingen in het fysisch systeem te modelleren aanwezig zijn. Verder is duidelijk geworden waar problemen zitten bij het integreren van fysische kennis met ecologie en water- en bodemkwaliteit. Aan de hand hiervan kan vervolgonderzoek worden gedefinieerd.

Deelnemers aan de workshop

Egge Allersma (WL)
Martin Baptist (WL)
Janrik van den Berg (UU)
Bram Blik (Svasek)
Henk van den Boogaard (WL)
Wim Eysink (WL)
Hein Jansen ()
Claire Jeuken (UU)
Onno van Kleef (RWS dir. Zeeland)
Bart Kornman (RIKZ)
Ad Langerak (RIKZ)
Jan Mulder (gedeeltelijk) (RIKZ)

Albert Oost (UU)
Leo van Rijn (WL)
Henk Schuttelaars (UU)
Ad van der Spek (TNO/NITG)
Marcel Stive (WL)
Huib de Swart (UU)
Harmen Verbeek (RIKZ)
Huib de Vriend (UT)
Jacques Vroon (RIKZ)
Wang Zheng Bing (WL)
Arjan van der Weck (WL)
Ben de Winder (RIKZ)

C De rol van morfologische dynamiek voor de beheersaspecten water- & bodemkwaliteit en ecologie

Rol van morfodynamiek voor de kwaliteit van water en bodem van het estuarium

Status kwaliteit van water en bodem in de Westerschelde

De kwaliteit van water en bodem van de Westerschelde is de afgelopen jaren verbeterd, maar laat nog veel te wensen over. Er is vooruitgang geboekt bij het terugdringen van de lozingen van vervuilende stoffen in de Schelde. Vooral in de slibrijke delen (Zeeschelde) is echter nog een zeer grote hoeveelheid zware metalen en andere vervuilende stoffen in de bodem opgeslagen. De in de bodem aanwezige hoeveelheid vervuiling is vele malen groter dan de jaarlijkse aanvoer. De verblijftijd van deze stoffen in het estuarium wordt geschat op 20 jaar. De kwaliteit van de bodem van de Westerschelde bestaat voor het overgrote deel uit klasse 2 of lager, voornamelijk dankzij de relatief geringe hoeveelheid slib in het bodemmateriaal. De Zeeschelde, met haar aanzienlijk fijnere bodemsamenstelling, is wel voor een groot deel sterk vervuild (klasse 3 - 4). De waterkwaliteit is ook over het algemeen beter in het westelijke deel van de Westerschelde dan in het oostelijk deel en de Zeeschelde. Dit is een gevolg van de afstand tot de lozingen en verdunning. Voor de meeste kenmerkende vervuilende stoffen (fosfor, stikstof, cadmium, fluorantheen en PCB 153) wordt de streefwaarde voor de waterkwaliteit permanent overschreden. Voor een aantal van deze stoffen wordt ook de grenswaarde niet gehaald. Overige relevante kwaliteitsaspecten zijn de zoutgradiënt (vrijwel normaal), de pH (grotere variatie dan natuurlijk, waarbij de pH in het Belgische deel van de Schelde relatief laag is als gevolg van de hoge ammonium en BOD belasting) en de zuurstofgradiënt (variërend van normaal bij Vlissingen tot van tijd tot tijd zuurstofloos in de Zeeschelde). De zoutgradiënt wordt niet beïnvloed door de kwaliteit van het water en is mede om die reden ongeveer normaal. Wanneer hierin in de toekomst veranderingen optreden, bijvoorbeeld als gevolg van morfologische veranderingen, kan dit een verschuiving van het turbiditeitsmaximum tot gevolg hebben, maar dat heeft waarschijnlijk geen invloed op de kwaliteit van water en bodem. Overigens is de in het Scheldebekken aanwezige hoeveelheid slib geen beperkende factor bij de opslag van vervuilende stoffen in de bodem: de totale adsorptiecapaciteit van het slib wordt op dit moment maar voor een klein deel gebruikt.

Organische vervuiling van het estuarium wordt niet direct beïnvloed door parameters als zuurstofgehalte, pH en zoutgradiënt. Over het algemeen is de belasting van organische stoffen rechtstreeks afhankelijk van de lozingen. Gebleken is dat er geen organisch materiaal of BOD via de Westerschelde in de Noordzee terechtkomt. Op dit punt vervult de Schelde haar functie als (filterend en reinigend) estuarium dus nog naar behoren. Ook van organische stoffen is een grote voorraad opgeslagen in de bodem.

Invloed van morfologische ontwikkelingen op de kwaliteit van water en bodem

Op verschillende manieren is er sprake van interactie tussen morfologische processen in de Westerschelde en de kwaliteit van het water en de bodem in het estuarium. Gezien deze

interactie kan ook worden verwacht dat veranderingen in morfologische processen invloed zullen hebben op de water- en bodemkwaliteit. Dit betreft zowel veranderingen in de tijd als veranderingen in de ruimte. Het kan dus voorkomen dat bepaalde processen op een andere plaats in het estuarium van belang worden (bijvoorbeeld als gevolg van veranderingen in de slibverdeling over het estuarium), of dat bepaalde processen die voorheen niet werkzaam waren dat in de toekomst wel worden (bijvoorbeeld ten gevolge van een toename van de hoeveelheid zuurstof in het water). De volgende kenmerken van de morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde zijn van groot belang voor de kwaliteit van water en bodem.

In de eerste plaats is de uitwisseling van vervuilende stoffen tussen water en bodem als gevolg van onder andere sedimentatie en resuspensie processen van belang. Bij de beschrijving van water- en bodemkwaliteit wordt tot nu toe een zeer eenvoudig model voor deze processen gehanteerd. Dit model komt er op neer dat de bovenste laag van de bodem zeer snel uitwisselt met de waterkolom (het slib in de bovenste paar millimeter van de bodem heeft een verblijftijd van ongeveer een dag) en de laag daaronder wat minder snel (laag van een halve meter heeft een verblijftijd van een jaar). Er wordt hierbij geen rekening gehouden met ruimtelijke en temporele variatie in de beschreven processen. Gezien de op deze manier veronderstelde snelle uitwisseling tussen water en bodem, is er geen verschil in kwaliteit tussen water en bodem. Dit model is uiteraard een zeer grove schematisatie van de werkelijkheid, en verdient gezien het belang ervan nadere uitwerking. Een zeer belangrijk aandachtspunt hierbij is dat voor de bepaling van water- en bodemkwaliteit kwantificering van de *bruto* transporten noodzakelijk zijn. Dit in tegenstelling tot morfologische berekeningen, waarbij doorgaans alleen netto termen worden gebruikt.

In de tweede plaats is de verspreiding van slib over het estuarium en de variatie hierin van groot belang voor de beoordeling van de kwaliteit van water en bodem. Deze verspreiding is op dit moment redelijk beschreven aan de hand van veldwaarnemingen, maar er bestaat slechts weinig kwantitatief inzicht in de dynamiek van de slibverspreiding. Dit is een belemmering voor de exacte modellering van water- en bodemkwaliteit. Hiermee samenhangend is de bepaling van de slibbalans van het estuarium van belang. Ook deze balans is op dit moment slechts globaal bekend. Nauwkeuriger inzicht in de slibtransporten over de Belgisch - Nederlandse grens en over de zeewaartse rand van het estuarium (waarbij ook hier weer de bruto termen van belang zijn) is wenselijk.

In de derde plaats (overigens sterk samenhangend met het vorige) is de verhouding tussen zand en slib op een bepaalde plaats en op een bepaald tijdstip van groot belang voor het bepalen van de bodemkwaliteit op die plaats en dat tijdstip. Deze verhouding is op dit moment slechts bekend uit veldwaarnemingen (met name de McLaren bemonstering), maar kan nog niet afdoende worden beschreven of voorspeld met numerieke modellen. Gezien de sterk verschillende eigenschappen van zand en slib is dit een probleem bij het doen van kwantitatief onderbouwde uitspraken over de kwaliteit van water en bodem.

De rol van morfologische dynamiek voor de kwaliteit van water en bodem wordt duidelijk bij nadere beschouwing van de bovengenoemde interactie tussen morfologische ontwikkelingen en de kwaliteit van water en bodem. Als gevolg van erosie van sliblagen kunnen er bijvoorbeeld relatief grote hoeveelheden vervuilende stoffen in het water van de Schelde terechtkomen. Wanneer dit gebeurt in combinatie met een verhoging van de hoeveelheid zuurstof in het water kan een nogmaals versterkte hoeveelheid zware metalen als Cadmium in het water terechtkomen. Wanneer daarentegen de interactie tussen water en

bodem afneemt, of wanneer slechts sedimentatie optreedt, zal het in de bodem opgeslagen materiaal niet meer worden gemobiliseerd, en daarmee geen invloed meer uitoefenen op de waterkwaliteit. Dit is bijvoorbeeld het geval in het Haringvliet en het Hollands Diep, waar bodemmateriaal van zeer slechte kwaliteit langzaam wordt bedekt met een laag materiaal van betere kwaliteit. De terugkoppeling van een sterk vervuilde bodem naar de waterkwaliteit is hier onderbroken door een gebrek aan morfologische dynamiek. Mobilisatie van vervuilende stoffen kan daarentegen in samenhang met veranderingen in de morfologische dynamiek veranderingen in de ruimtelijke spreiding van die stoffen tot gevolg hebben. Dit kan leiden tot een verplaatsing van de vervuiling van de Zeeschelde naar rustiger plaatsen in het Schelde-estuarium, zoals schorren en slikken.

Terugkoppeling tussen bodemkwaliteit en morfologische dynamiek

Naast de hiervoor beschreven verbanden tussen morfologische dynamiek en de kwaliteit van water en bodem kan er ook worden gedacht aan een terugkoppeling van de bodemkwaliteit naar de morfologie. Dit verband ontstaat doordat chemische processen de fysische eigenschappen van de bodem kunnen beïnvloeden. Concreet kan dit bijvoorbeeld het geval zijn wanneer de Zeeschelde weer meer zuurstof zou gaan bevatten, waardoor de nu deels gereduceerde bodems weer geoxydeerd kunnen raken. Door verkitting van geoxydeerde ijzerdeeltjes zal de bodem dan minder gevoelig worden voor erosie. Op deze manier kan verbetering van de waterkwaliteit dus een afname van de morfologische dynamiek tot gevolg hebben! Overigens kan ook worden verwacht dat er meer bodemleven aanwezig is in geoxydeerde bodems, waardoor een deel van dit effect door bioturbatie wellicht weer teniet wordt gedaan.

Belangrijke parameters (indicatoren) voor de relatie tussen morfologische dynamiek en water- en bodemkwaliteit

- Snelheid van sedimentatie en resuspensie, inclusief de temporele en ruimtelijke variatie hierin. Van groot belang is hierbij dat, in tegenstelling tot wat bij morfologische berekeningen gebruikelijk is, vooral de *bruto* termen van belang zijn.
- Menging van sediment in de bodem, diepte en snelheid van omwerking. Hieraan gekoppeld: de voortplantingssnelheid van bodemvormen.
- De porositeit en de dichtheid van het bodemmateriaal.
- De samenstelling (slibinhoud en percentage organisch materiaal) van het bodemmateriaal.
- Nauwkeurige kwantificering van de slibbalans!

Hypothese

Bij een toename van de morfologische dynamiek in de slibrijke delen kan de waterkwaliteit afnemen als gevolg van het vrijkomen van significante hoeveelheden vervuilende stoffen. Door verdere verspreiding van deze stoffen kan de kwaliteit van het bodemmateriaal in slikken en schorren van de Westerschelde ook verslechteren.

Belangrijke onderwerpen die nog nader dienen te worden uitgezocht:

- Interactie waterkolom met bodem (sedimentatie - resuspensie)
- Verspreiding van slib over het estuarium
- Percentage slib in de bodem op een bepaalde plaats en op een bepaald tijdstip

Rol van morfodynamiek voor de ecologie van het estuarium

Hiërarchisch model

De ecologische ontwikkeling van een estuarium wordt gestuurd door een groot aantal processen die in tijd en ruimte in onderling verband staan. Deze processen zijn in meer of mindere mate hiërarchisch geordend. De dominante sturingsrichting gaat van boven naar beneden, maar er zijn ook terugkoppelingsmechanismen, voornamelijk op de lagere niveaus. In volgorde worden hier onderscheiden:

Klimaat ⇒ Meteorologie ⇒ Hydrodynamica ⇒ Geomorfologie ⇒ Bodemontwikkeling ⇒ Vegetatie ⇒ Dierenleven

De flora en fauna bepalen samen de biologische kwaliteit van het estuarium. Deze worden gestuurd door de bodemontwikkeling en de geomorfologie die op hun beurt weer worden gestuurd door de hydrodynamica.

Het leven in de Westerschelde wordt op de schaal van het gehele estuarium beïnvloed door de saliniteitsgradiënt (*hydrodynamica*) van oost naar west, die de Westerschelde opdeelt in een mariene zone, een mariene overgangszone en een brakke en zoete zone. Op de schaal van schorren, platen, slikken en geulen is vooral de hoogteligging (*geomorfologie*) van belang, gevolgd door de hydro- en morfodynamiek die onder andere de sedimentkarakteristieken (*bodemontwikkeling*) stuurt.

In de volgende paragrafen wordt per groep van organismen de afhankelijkheid van fysische factoren en de situatie in de Westerschelde besproken.

Benthos en algen

De ruimtelijke verspreiding van benthische leefgemeenschappen wordt voornamelijk bepaald door de saliniteit en de hoogteligging. De levensgemeenschappen van droogvallende platen wordt gedomineerd door schelpdieren en wormen, maar verschuift van bijvoorbeeld Kokkels en zandzagers in het mariene deel naar Zeeduizendpoot, Slijkgarnaaltje en Nonnetje in het brakke deel. De levensgemeenschap van sublittorale delen wordt in het mariene deel gedomineerd door min of meer mobiele wormen (zandzagers) en schelpdieren en verschuift naar vooral mobiele kreeftachtigen (aasgarnalen, Zandvlokreeft) in het brakke en zoete deel. Gaande van west naar oost neemt de totale biomassa aan benthische soorten af en vindt er tevens een verschuiving plaats in de wijze van voedselvergarig. De morfologische dynamiek kan invloed uitoefenen op de saliniteitsgradiënten en hoogteligging op mega- en macro-schaal. Een toenemende kanalisering van de hoofdgeul kan resulteren in het verleggen van de zout/zoet overgang, vergelijk met de Nieuwe Waterweg. Ook is de geomorfologie op deze schaal zeer belangrijk voor de hoogteligging van de slikken en platen.

De hydro- en morfodynamiek op meso- en micro-schaal in een gebied beïnvloeden de sedimentkarakteristieken als stabiliteit, organisch stofgehalte en het slibgehalte. Sedimentatie en erosie kunnen rechtstreeks verstoring werken door begraving van bodemdieren of door omwoeling van het sediment. De mobiliteit van het sediment kan bepalend zijn voor de vestigingsmogelijkheden van bepaalde soorten. Voorts heeft de dynamiek invloed op de mediane korrelgrootte, het slibgehalte en de hoeveelheid particulier organisch koolstof (POC). Immers, de stroomsnelheid en golfwerking bepalen de bezinking en uitspoeling van deze fijne deeltjes. Afhankelijk van het type bodemorganismen bestaan er voorkeuren voor bepaalde typen sedimenten. Zo zullen mobiele soorten domineren op grofzandige, geëxponeerde sedimenten, filtreerders op zand/slib mengsels en depositfeeders op zeer slibbige delen. Wanneer de bodem bestaat uit een fluid mud laag zullen weinig organismen in staat zijn te overleven, behalve oligochaeten.

De troebelheid van het water wordt bepaald door de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal. De troebelheid kan worden beïnvloed door de morfologische dynamiek op meso- en micro-schaal, maar wordt ook beïnvloed door de saliniteit. Nabij de Nederlands-Belgische grens mengt het zoete water met het zoute water, wat resulteert in een troebelheidsmaximum. De troebelheid van het water is naast de nutriëntenhoeveelheid, de temperatuur en de saliniteit bepalend voor de primaire productie in de Westerschelde. Deze kent een sterke seizoensdynamiek met pieken in het voorjaar. Er is een duidelijke ruimtelijke verdeling in primaire productie waarneembaar in het Schelde-estuarium, nabij de monding is primaire productie hoger. De troebelheid is de beperkende factor voor algengroei in de Westerschelde. De troebelheid in de Westerschelde is zo hoog dat deze slechts lokaal wordt beïnvloed door de bagger- en stortactiviteiten.

Vogels

De verspreiding van vogels wordt gestuurd door de aanwezigheid van fourageer-, rust- en/of broedhabitat. Over het algemeen is de dichtheid aan steltlopers hoger in het westelijke deel waar de biomassa macrozoöbenthos hoger is, dan in het oostelijke deel. In het oostelijke deel daarentegen zijn de aantallen eenden en ganzen hoger, doordat hier een groot oppervlak aan schorren is. Ook is dit deel van groot belang als broedgebied. Verder speelt de troebelheid een rol voor visetende vogels, zoals de Fuut, Aalscholver en Middelste zaagbek. Deze zichtjagers komen voornamelijk in het westelijke deel voor. De morfologische dynamiek kan op alle schalen invloed uitoefenen op de aanwezigheid van geschikte habitats, maar is niet direct van invloed op het voorkomen en de verspreiding van vogels.

Vissen

Estuaria zijn normaal gesproken zeer visrijke gebieden. De ondiepe, voedselrijke gebieden vervullen een belangrijke functie als paai- en kinderkamergebied. De functie als kinderkamer is met name belangrijk voor de Gewone garnaal, Schol en Tong. Voornamelijk het oostelijk gedeelte van de Westerschelde vervult hierin een belangrijke rol, hoewel deze beperkt is op nationale schaal. De omvang van de garnalen-populatie in de Westerschelde hangt af van het bestand in de kustzone, maar ook van lokale factoren als voedselaanbod, areaal ondiepe gebieden en baggeren en storten. De verminderde beschikbaarheid van geschikt voortplantingsareaal voor de garnaal, namelijk ondiepe, slikkige gebieden heeft

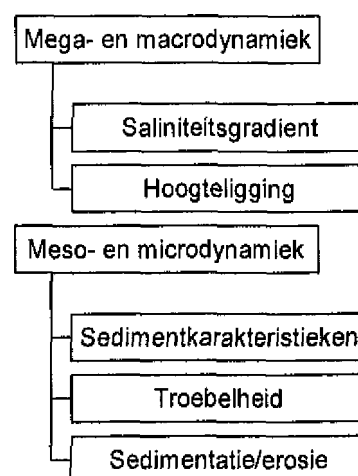
mede gezorgd voor een sterke teruggang van deze soort. Baggeractiviteiten kunnen zowel nadelig als voordelig werken voor de garnaal. Ter plaatse van het baggeren en storten kan een versterkte microdynamiek optreden door vergrote zandtransporten, de garnaal is hiertegen niet bestand. De verhoogde troebelheid echter geeft de garnaal beschutting tegen zijn predatoren.

Van essentieel belang is de paaifunctie voor anadrome vissoorten. Deze trekvisen zoeken periodiek zoet water op om zich voort te planten. De Westerschelde vervulde vroeger een belangrijke rol in de instandhouding van de Steur, Elft, Zalm, Zeepril en Houting, maar door de zuurstofloosheid en de infrastructurele werken in de Zeeschelde tegenwoordig niet meer.

Schorren

De estuariene gradiënt vertaalt zich duidelijk naar de variatie aan schorvegetaties langs het estuarium. De Westerschelde, inclusief de rivier Schelde, kent zoutwater-, brakwater- en zoetwaterschorren. Naast deze gradiënt in de lengte-as van het estuarium is er een tweede gradiënt in zoutgehalte en overspoelingsfrequentie in de dwarsrichting. Naast een belangrijke ecologische functie, vervullen schorren ook een functie als bergingsgebied bij hoogwaterafvoeren en als sedimentatiegebied. Het schorareaal in de Westerschelde is voornamelijk als gevolg van inpolderingen sterk achteruit gelopen. Bovendien is de morfologische structuur van de Westerschelde inmiddels dusdanig veranderd dat het proces van natuurlijke verlanding aan het versnellen is. Het Verdrongen Land van Saeftinge dreigt binnen 20 jaar zo hoog opgeslibd te zijn dat het niet meer door het Scheldewater wordt overstroomd. Vergroting van de komberging in het estuarium en daarbij horende vergroting van de stroomsnelheden en verdieping van de geulen zou meer dynamische omstandigheden kunnen creëren, zodat verlanding wordt tegengegaan.

Elders in de Westerschelde (Zuidgors) wordt geëxperimenteerd met rijshouten dammen om te proberen meer sedimentatie te bewerkstelligen om schorontwikkeling te stimuleren. Nergens langs de Westerschelde ontstaan op een natuurlijke wijze jonge schorren.



Tabel: De voor de ecologie belangrijkste, door morfodynamiek beïnvloedbare parameters, uitgesplitst naar schaalniveau

Ecologische dynamiek

Over het algemeen worden de levensgemeenschappen van de Westerschelde gekenmerkt door het vermogen zich snel aan te passen aan de veranderende omstandigheden in hun leefmilieu. Dit geldt met name voor de benthische organismen die leven in de zandbodem. Veel soorten zijn in staat mee te migreren met de natuurlijke sedimentatie of erosie. Uitzonderingen zijn echter de grote volwassen exemplaren van de Strandgaper, die zijn te groot om te bewegen. Op andere locaties in het zoute milieu, bijvoorbeeld op de Noordzee, zijn plekken aan te wijzen waar het habitat minder veranderlijk is, zodat daar een verregaande successie kan optreden en soorten kunnen worden aangetroffen die zeer oud zijn, zoals de Noordkromp *Arctica Islandica* (100 jaar) en de Zeedahlia (200 tot 300 jaar).

De effecten van het optreden van kortsluitgeulen of andere snelle morfologische veranderingen in de Westerschelde zullen gering zijn. Wanneer een deel van de Westerschelde wordt omgewoeld, zal deze plek weer snel gekoloniseerd worden. Eerst zullen allerlei mobiele predatoren (zoals Krabben en garnalen) de dode organismen opruimen en vervolgens zal deze plek snel in gebruik worden genomen door mobiele worm- en kreeftachtigen. De voortplanting van de meeste benthische soorten gaat via vrij zwevende larven, zodat, mits de vestigingscondities goed zijn, de plek weer snel bewoond kan worden door schelpdieren. Het is bekend van sommige ecosystemen dat deze af en toe teruggeworpen moeten worden van het climaxstadium naar het pionierstadium, maar dit is niet van primair belang voor de ecosystemen in de Westerschelde. Het is echter wel van belang voor de kenmerkendheid van de Westerschelde dat de hoge dynamiek van onder andere de platen wordt behouden, zodat een plaatgroei periodiek wordt afgetopt en er geen kans is dat er een schor ontstaat.

Kennistekorten

De relevante kennistekorten liggen voornamelijk op het gebied van de meso- en microdynamiek. De processen op de grotere schalen worden voornamelijk gestuurd door zandtransporten, terwijl de ecologische vragen meer samenhangen met de dynamiek op kleinere en kortere schaal en slibtransporten:

- De voorspelling van het bodemslibgehalte onder invloed van de morfodynamische omstandigheden.
- De invloed van morfodynamiek op de troebelheid
- De voorspelling van netto en bruto sedimentatie en erosiesnelheden op kleine schaal, zoals op platen en langs de randen van schorren.

Referenties

- Marchand, M., M.J. Baptist, K. Hulsbergen, H. van Pagee, M. Stive & A.W. van der Weck, 1998. Vormen van de kust; Mogelijkheden voor kustuitbreiding vanuit morfologisch en ecologisch perspectief. WL | delft hydraulics, rapport Z2330.
- Pieters, T., C. Storm, T. Walhout & T. Ysebaert, 1991. Het Schelde-estuarium, méér dan een vaarweg. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren en Directie Zeeland, Nota GWWS-91.081.
- DGW, 1992. Perspectief voor het Schelde-estuarium. Middelburg, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren en Brussel, Instituut voor Natuurbehoud, Dienst Natuurontwikkeling. Rapport DGW-92.034.

D Datagedreven analyse en modellering

In deze bijlage wordt een aantal data georiënteerde technieken beschreven die perspectieven kunnen bieden voor het vaststellen en kwantificeren van relaties die worden ontleend aan datasets. In deze (multi-variate) data analyse worden in grote lijn twee uitgangspunten onderscheiden. Enerzijds is dat *data analyse* in meer strikte zin, waarin bij het afleiden van relaties en afhankelijkheden de beschikbare data niet vooraf wordt onderscheiden in oorzaken (input) en gevolgen (output). Anderzijds is dat *data modellering* waarbij black-box modellen worden gekonstrueerd om de afhankelijkheid van de ene set van grootheden van een ander set vast te stellen, ofwel input-output relaties. Dit onderscheid komt in de hieronder gegeven beschrijvingen van de diverse technieken in nader detail aan de orde.

Opgemerkt wordt dat de hieronder gepresenteerde lijst van technieken zeker niet volledig is. Op het moment dat de analyse technieken daadwerkelijk moeten worden toegepast kan het noodzakelijk zijn om alternatieve technieken in te zetten, technieken te combineren, of zelfs speciale technieken te ontwikkelen, gegeven de te hanteren doelstelling en de daarvoor beschikbare data. Daarnaast, en wellicht ten overvloede, zij vermeld dat de resultaten van data-georiënteerde analyse en modelleertechnieken in strikte zin alleen een diagnostische waarde hebben. Dat betekent dat zij relaties identificeren en kwantificeren, maar niet als zodanig fysisch verklaren. Dat laatste is de taak van de gebruiker bij de interpretatie van de resultaten.

Data analyse technieken

1. Algemene/statistische data-analyse

Hierbij wordt gedacht aan standaard visualisatie en statistische analyse van de beschikbare gegevens. Dit omvat onder andere:

- Scatter-plots voor het visualiseren van afhankelijkheden
- Het karakteriseren van de data aan de hand van hun statistische verdeling, bijvoorbeeld in de vorm van belangrijke kentallen (beschrijvende statistiek, zoals gemiddelde, spreiding, extremen, kwartiel punten, enzovoorts)
- Het korreleren van statistische kentallen (zoals in voorgaande aandachtspunt aangegeven) van twee of meer grootheden waarvoor die afgeleid zijn
- Trendanalyse (ruimtelijk en/of temporeel) en/of analyse van periodiek gedrag
- Enzovoorts

Een groot aantal van deze methoden is overigens reeds toegepast op de data die voor de Westerschelde voorhanden is. Voorbeelden hiervan zijn terug te vinden in Mol *et al.* (1997).

2. Auto- of kruiskorrelaties en spektrale analyse

Gegeven tijdreeksen van één of meerdere grootheden (waarbij de reeks in tijd en/of in plaats moet worden opgevat) kunnen met korrelatiefuncties afhankelijkheden in de temporele en ruimtelijke evolutie van die reeksen worden gedetekteerd en gekwantificeerd (zie bijvoorbeeld Yaglom, 1987). Uit de shifts in de korrelatiefuncties waarbij maximale overeenkomst tussen de reeksen wordt gevonden kunnen tijds- en/of ruimte schalen (al dan niet gekoppeld) worden vastgesteld. Additioneel kunnen uit spektraal analyses de tijd en/of ruimte schalen en hun absolute en relatieve intensiteit waarmee die in de reeksen vertegenwoordigd zijn worden herkend. Bij de interpretatie

van de resultaten dienen deze te worden gerelateerd aan de fysische processen zoals die op basis van systeemkennis verwacht worden een rol te spelen.

3. Multi-variate data analyse op basis van PCA

PCA (Principal Components Analysis, zie bijvoorbeeld, Haan, 1979 of Pielou, 1984) is een multivariate analyse techniek die uitgaat van een ensemble van K samples van een N-dimensionale grootheid. Deze samples kunnen bijvoorbeeld de meting van N-grootheden op K plaatsen voorstellen (of op K-tijdstippen). Het idee van PCA is om in zo'n data set (lineaire) combinaties van de N gemeten parameters te vinden die het meest de spreiding in de data set verklaren. Hiertoe worden hoofdrichtingen (principal directions) gekonstrueerd waarbij de eerste richting (respektievelijk laatste) aangeeft in welke richting de data de meeste (respektievelijk minste) variantie bevat. In de praktijk blijkt vaak dat met een beperkt aantal van die hoofdrichtingen het merendeel (bijvoorbeeld 95%) van de totale spreiding kan worden verklaard. Dat betekent dat dan niet alleen de dominante afhankelijkheden van de samples kwantitatief kunnen worden beschreven, maar tevens dat data reductie kan worden toegepast (doordat de data set in een lager dimensionale ruimte kan worden gerepresenteerd).

Indien PCA wordt toegepast op een ensemble van tijdreeksen (of ruimtelijke patronen) dan heet zo'n PCA vaak EOF: Empirische Orthogonale Funkties. Met die aanpak kunnen dan (tijd)reeksen worden gevonden die de 'principale componenten' van een ensemble van tijdreeksen (of ruimtelijke patronen) weergegeven. Elke EOF 'verklaart' dan een deel van de structuur van het ensemble.

Een stap verder, en wel in de richting van (tijds of ruimtelijke) dynamika wordt voorzien met zogenaamde POPs (Principal Oscillation Patterns, zie bijvoorbeeld Hasselmann, 1988). Naast een eerste stap waarin EOF wordt toegepast om de hoofdkomponenten te vinden, wordt nu in een tweede stap informatie bepaald over de (tijds)evolutie van die componenten. Beide stappen zijn gebaseerd op de beschikbare data set.

PCA, EOF en POP hebben dus als voordeel dat het meest significante deel aan een data set kan worden onttrokken, die daarna nader geëvalueerd en geïnterpreteerd moet worden, bijvoorbeeld door deze te relateren aan fysische systeemkennis. Om dit te kunnen doen dient in zowel kwantitatieve als kwalitatieve zin voldoende data (niet te veel gaps, meetfouten en dergelijke) beschikbaar te zijn.

4. Clustering/klassifikatie technieken

Clustertechnieken zijn belangrijke hulpmiddelen voor klassifikatie binnen een gegeven data set, dat wil zeggen het detekteren van deelensembles die binnen het totaal ten opzichte van elkaar gescheiden liggen. Zo'n scheiding kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een andere ruimtelijke of temporele herkomst van de betreffende samples, grote veranderingen in de externe forcering (bijvoorbeeld events) of intrinsieke eigenschappen/stabiliteit van het systeem waaraan de data ontleend is.

Cluster technieken kunnen variëren van meer 'klassieke' procedures (zoals nearest neighbour of centroïd clustering, zie bijvoorbeeld Pielou, 1984), mogelijk op basis van de hoofdkomponenten van een PCA, tot fuzzy clustering (zoals de Gustafson-Kessel fuzzy clustering techniek) of zelfs Neurale Netwerken van het type Self Organizing Feature Maps, ofwel Kohonen Netwerken (Haykin, 1994, Van den Boogaard *et al.*, 1998). De laatste mogelijkheid zou een interessante optie kunnen zijn omdat deze in

essentie bestaat uit het konstrueren van een afbeelding van een hoog dimensionale ruimte naar een laag dimensionaal (1D of 2D) rooster die zoveel mogelijk de topologische structuur van de data bewaart. Hierdoor kunnen de resultaten (clusters, extreme gebeurtenissen) makkelijker geïdentificeerd en geïnterpreteerd worden. Bovendien kan het cluster proces gestuurd worden door een door de gebruiker op te geven similarity measure.

Data-georiënteerde modelleertechnieken

1. Standaard regressie-technieken/model fitting

Meest bekend zijn hierbij lineaire regressie technieken waarbij op basis van gemeten samples de parameters van een lineair input-output model worden geschat, bijvoorbeeld met behulp van een kleinste kwadraten methode. De input en output kunnen multi-dimensionaal zijn. Deze aanpak is statisch/instantaan in de zin dat tijds- of plaatsafhankelijkheid niet expliciet een rol speelt (en de volgorde van de input-output combinaties er niet toe doet).

De lineaire aanpak kan zonder wezenlijke komplikatie naar een niet-lineaire regressie worden uitgebreid door hogere orde combinaties van de input grootheden mee te nemen (bijvoorbeeld orde 2: kwadratische termen, orde 3: derde machtstermen, enzovoorts). Het probleem is dan een goede bovengrens van die orde te vinden (waarbij zo mogelijk systeemkennis moet worden ingebracht). Bovendien neemt met het meenemen van hogere ordes het aantal te identificeren modelparameters onevenredig snel toe hetgeen de balans tussen het aantal vrije parameters enerzijds, en beschikbare meetinformatie anderzijds, sterk negatief beïnvloedt. Bovendien heeft een niet-lineaire regressie het nadeel dat het minder makkelijk is om betrouwbaarheidsbanden af te leiden voor de predicties gegenereerd met het geïdentificeerde model.

Overigens zijn in plaats van polynomen diverse andere vormen denkbaar voor de parameterisatie van de output van het model. Voor zover mogelijk dient hier dan gebruik te worden gemaakt van a priori systeemkennis. Men zou hierbij bijvoorbeeld eventuele kennis van het asymptotische of gemiddelde gedrag in de parameterisatie kunnen inbrengen.

2. Neurale Netwerken

In strikte zin zijn Neurale Netwerken (van het type Multi-Layer Perceptron, zie bijvoorbeeld Haykin, 1994) universele functie-approximators. Dat betekent dat zij black-box modellen zijn waarmee niet-lineaire functies willekeurig dicht kunnen worden benaderd. Ook Neurale Netwerken zijn in volledig geparameteriseerde vorm en de parameters (de gewichten in het netwerk) moeten aan de hand van een data set van input-output combinaties worden geïdentificeerd. In deze zin is een Neuraal Netwerk een directe, niet-lineaire generalisatie van lineaire regressie. Dankzij diens structuur (en de daarin gebruikte niet-lineaire basisfuncties) kan een Neuraal Netwerk echter met aanzienlijk minder parameters veel beter niet-lineaire relaties modelleren dan 'standaard' niet-lineaire regressie technieken. Desalniettemin zijn in het algemeen nog steeds relatief omvangrijke data sets nodig om een Neuraal Netwerk toe te kunnen passen.

3. Overdrachtsfuncties in dynamische systemen

In de voorafgaande twee aandachtspunten is uitgegaan van 'statische data sets', dat wil zeggen dat de diverse input-output combinaties niet expliciet in de tijd (of plaats) zijn gekoppeld. Dat is wel het geval als men de overdrachtsfunctie van één of meer input tijdreeksen (of ruimtelijk patroon) naar een output reeks wil bepalen om op deze manier een dynamisch systeem te beschrijven. In dat geval zijn de opvolgende inputs overlappend.

Voor het identificeren van de overdrachtsfuncties van zo'n dynamisch systeem zijn vanouds de bekende lineaire black-box modellen bekend van het type ARMAX (Auto Regressive, Moving Average, with eXterior input, zie bijvoorbeeld Ljung & Söderström, 1983). Kortweg bestaat dit model eruit dat de output van tijdstap t is bepaald door een lineaire weging de output van één of een aantal voorafgaande tijdstappen, en de input (forcing) van een aantal voorafgaande tijdstappen.

Ook hier is een elegante en krachtige niet-lineaire generalisatie mogelijk op basis van Neurale Netwerken. Deze bestaat uit zogenaamde Auto-Regressieve Neurale Netwerken zoals die onlangs bij WL zijn ontwikkeld, geïmplementeerd en toegepast. Voor het modelleren van niet-lineaire transferfuncties lijken deze veel perspectief te bieden (Van den Boogaard *et al.*, 1998).

Toepassing van data-gedreven modelleertechnieken

Opgemerkt wordt dat, gezien de huidige stand van zaken bij het toepassen van dit soort analyse en modelleermethoden, het niet voor de hand ligt om te starten bij de meer gecompliceerde methoden. Op dit moment worden bij de analyse van de aanzienlijke hoeveelheid data die van de Westerschelde beschikbaar is vrijwel alleen gebruik gemaakt van enkelvoudige regressie en correlatie analyse. Voorgesteld wordt om iteratief te werken en de toepassing van data-gedreven technieken te combineren met andere vormen van modellering. Uitgaande van de beperkingen van het huidige modelinstrumentarium (zowel wat betreft de fysische onderbouwing als wat betreft mogelijkheden voor voorspelling en wat betreft technische beperkingen zoals rekentijd) kunnen de hiervoor beschreven analyse methoden worden ingezet om relaties, afhankelijkheden en verbanden in de beschikbare dataset te achterhalen. Met behulp van deze kennis kunnen vervolgens de modelformuleringen worden versterkt. Bij de keuze voor een bepaalde methode wordt geadviseerd om de hier beschreven volgorde (ruwweg) te hanteren. Hiermee wordt voorkomen dat in eerste instantie een complexe analyse methode wordt gehanteerd, waarvan de uitkomsten fysisch niet of moeilijk interpreteerbaar blijken.

Een succesvol resultaat van een op een dergelijke manier aangepakt onderzoek betreft het inverse sedimenttransport model, dat door WL in opdracht van het RIKZ is opgezet voor de Eems-Dollard.

Referenties

- Boogaard, H.F.P. van den, Md S. Ali & A.E. Mynett, 1998: Self Organizing Feature Maps for the Analysis of Hydrological and Ecological Data Sets.
Accepted for Hydro-Informatics

- Boogaard, H.F.P. van den, D.K. Gautam & A.E. Mynett, 1998: Auto-Regressive Neural Networks for the Modelling of Time Series.
Accepted for Hydro-Informatics
- Haan, C.T., 1977: Statistical Methods in Hydrology.
The IOWA State University Press / Ames
- Hasselman, K., 1993: PIPs and POPs: The reduction of complex dynamical systems using Principal Interactions and Oscillation Patterns.
J. Geophys. Res. 93D: pp.11015-11021
- Haykin, S., 1994: *Neural Networks. A comprehensive Foundation*.
New York: Mac Millan Publishing Company
- Ljung, L. & T. Söderström, 1983: *Theory and Practice of recursive identification*.
New York: MIT Press
- Mol, G., A.M. van Berchum & G.M. Krijger, 1997. De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48' / 43'. Beschrijving van trends in de fysische, biologische en chemische toestand. RIKZ rapport 97.049,
- Yaglom, A.M., 1987: *Correlation Theory of Stationary and Related Random Functions*. New York: Springer Verlag