

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat / RIKZ

Morfologisch model Westerschelde

Verkennde studie naar operationalisering

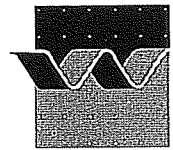
J.C. Winterwerp, C. Kuijper

Verslag

januari 2002



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat: Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ

TITEL: Morfologisch model Westerschelde.
Verkennde studie naar operationalisering.

SAMENVATTING:

Dit rapport beschrijft een voorstudie naar de ontwikkeling van een morfologisch model(instrumentarium) voor de Westerschelde. De resultaten zijn gebaseerd op een literatuurstudie, een Workshop met experts en beheerders en discussies met beheerders en experts. Het rapport beschrijft het Programma van Eisen en een Plan van Aanpak om zo'n model te realiseren. Uit een literatuurstudie, de Workshop en discussies met experts is geconcludeerd dat het niet mogelijk is alle beleidsvragen met één model te beantwoorden. Daartoe lopen de relevante tijd- en ruimteschalen te ver uiteen en zijn rekentijd en bestandsgroottes van de procesgestuurde modellen nog een te grote handicap. Uit de voorstudie blijkt dat nog veel ontwikkeling van de modellen nodig is, dat de kennis van het Westerschelde-systeem nog niet compleet is en dat veel ervaring met het momenteel wel beschikbare instrumentarium nodig is. Desalniettemin is het mogelijk om op een redelijke termijn al een bruikbaar instrumentarium te ontwikkelen.

In het bijzonder worden de volgende werkzaamheden aanbevolen:

1. Uitvoering van enige verbeteringen in ESTMORF, onderhoud van dit instrumentarium en voorspelling en analyse van het te verwachten onderhoudsbaggerwerk na de laatste verdieping van de vaargeul.
2. Ervaring opdoen met de 2Dh-versie van DELFT3D-mor, waaronder bestudering van de effecten van randvoorwaarden, golven en ruwheidsformuleringen voor een groot rekendomein (i.e. hele estuarium). Tevens ervaring opdoen met de 3D-versie van DELFT3D-mor voor kleinere domeinen.
3. Vergelijking van ESTMORF en de 2Dh-versie van DELFT3D-mor voor de calibratieperiode van ESTMORF, i.e. de periode 1968-1996.
4. Integratie van ESTMORF en het Cellenconcept om een instrument te ontwikkelen waarmee de bagger- en stortstrategie geoptimaliseerd kan worden, inclusief de effecten van zandwinning.
5. Onderbrenging van het Cellenconcept in een GIS-omgeving, zodat dit concept gebruikt kan worden om modelresultaten onderling en met waarnemingen te vergelijken.
6. Voortzetting van het werk aan en met geïdealiseerde modellen om een beter begrip op te bouwen van de lange-termijn ontwikkelingen van het estuarium en van het gedrag van de numerieke modellen.

REFERENTIES: ZEEKENNIS
RKZ-1062

VER.		AUTEUR		DATUM		OPMERK.		REVIEW		GOEDKEURING		
1.0		J.C. Winterwerp			december 2002			C. Kuijper			T. Schilperoort	
2.0		J.C. Winterwerp		thw	24 januari 2002			C. Kuijper		du	T. Schilperoort	
PROJECTNUMMER:				Z3222								
TREFWOORDEN:				morfologie, modellen, Westerschelde, verkennende studie								
INHOUD:		TEKST		59	TABELLEN		9	FIGUREN		5	APPENDICES	-
STATUS:		☐ VOORLOPIG			☐ CONCEPT			☒ DEFINITIEF				

Inhoud

Samenvatting

1	Inleiding	1-1
1.1	Achtergrond van het project.....	1-1
1.2	Samenvatting workshop 16 oktober 2001.....	1-3
2	Het Westerschelde estuarium	2-1
3	Beleidsvragen	3-1
4	Praktijkgevallen.....	4-1
5	Programma van eisen morfodynamisch model.....	5-1
6	Het huidige instrumentarium	6-1
6.1	DELFT3D-MOR / DELFT2D-MOR	6-1
6.2	DELFT3D-FLOW.....	6-3
6.3	DELFT3D-RAM	6-4
6.4	ESTMORF	6-5
6.5	ASMITA	6-7
6.6	Geïdealiseerde modellen.....	6-9
6.7	Cellenconcept.....	6-10
6.8	Probabilistisch modelleren.....	6-11
7	Onderzoeksstrategie	7-1
8	Plan van aanpak.....	8-1
9	Prioritering en fasering	9-1
10	Beschikbare en benodigde data	10-1
10.1	Globaal overzicht beschikbare metingen.....	10-1
10.2	Benodigde data.....	10-2

Samenvatting en conclusies

Dit rapport beschrijft een voorstudie naar de ontwikkeling van een morfologisch model(instrumentarium) voor de Westerschelde. De resultaten zijn gebaseerd op een literatuurstudie, een Workshop met experts en beheerders en discussies met beheerders en experts. Het rapport beschrijft het Programma van Eisen en een Plan van Aanpak om zo'n model te realiseren. Het Programma van Eisen is gebaseerd op een door RIKZ ter beschikking gesteld overzicht van de beheers- en beleidsvragen, op de resultaten van een Workshop en op twee, samen met de beheerder geformuleerde praktijkgevallen. Het Programma van Eisen is gebaseerd op de drie kernfuncties van het estuarium, welke ook ten grondslag lagen aan het LTV-project: Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid.

De genoemde praktijkgevallen betreffen I) het gedrag van drempelgebieden in het algemeen en het bevaarbaar houden van secundaire geulen door deze drempelgebieden in het bijzonder, en II) een voorspelling van het onderhoudsbaggerwerk na de laatste (i.e. 1997/98) verdieping en een analyse van het huidige baggerbezwaar in relatie tot een eerdere voorspelling en het baggerbezwaar na de voorlaatste verdieping.

Uit een literatuurstudie, genoemde Workshop en discussies met experts is geconcludeerd dat het niet mogelijk is alle beleidsvragen met één model te beantwoorden. Daartoe lopen de relevante tijd- en ruimteschalen te ver uiteen en zijn rekentijd en bestandsgroottes van de procesgestuurde modellen nog een te grote handicap. Uit de voorstudie blijkt dat nog veel ontwikkeling van de modellen nodig is, dat de kennis van het Westerschelde-systeem nog niet compleet is en dat veel ervaring met het momenteel wel beschikbare instrumentarium nodig is. Desalniettemin is het mogelijk om op een redelijke termijn al een bruikbaar instrumentarium te ontwikkelen. In het bijzonder worden de volgende werkzaamheden aanbevolen:

1. Uitvoering van enige verbeteringen in ESTMORF, onderhoud van dit instrumentarium en voorspelling en analyse van het te verwachten onderhoudsbaggerwerk na de laatste verdieping van de vaargeul.
2. Ervaring opdoen met de 2Dh-versie van DELFT3D-mor, waaronder bestudering van de effecten van randvoorwaarden, golven en ruwheidsformuleringen voor een groot rekendomein (i.e. hele estuarium). Tevens ervaring opdoen met de 3D-versie van DELFT3D-mor voor kleinere domeinen.
3. Vergelijking van ESTMORF en de 2Dh-versie van DELFT3D-mor voor de calibratieperiode van ESTMORF, i.e. de periode 1968-1996.
4. Integratie van ESTMORF en het Cellenconcept om een instrument te ontwikkelen waarmee de bagger- en stortstrategie geoptimaliseerd kan worden, inclusief de effecten van zandwinning.
5. Onderbrenging van het Cellenconcept in een GIS-omgeving, zodat dit concept gebruikt kan worden om modelresultaten onderling en met waarnemingen te vergelijken.
6. Voortzetting van het werk aan en met geïdealiseerde modellen om een beter begrip op te bouwen van de lange-termijn ontwikkelingen van het estuarium en van het gedrag van de numerieke modellen.

I Inleiding

I.1 Achtergrond van het project

Directie Zeeland heeft behoefte aan een verdere ontwikkeling van het tot haar beschikking staande instrumentarium dat gebruikt kan worden voor het beheer van de Westerschelde. Numerieke morfologische modellen maken onderdeel uit van dit instrumentarium. Indien zulke modellen betrouwbaar, nauwkeurig en goed gevalideerd zijn, en er voldoende ervaring mee is opgebouwd, zullen zulke modellen een bijdrage kunnen leveren aan de onderbouwing van beleidsontwikkeling en -beslissingen: fysische processen en ervaring met het Westerscheldesysteem zijn op een formele wijze in de numerieke modellen ondergebracht, zodat genoemde beleidsbeslissingen minder op alleen intuïtie en/of individuele ervaring gestoeld hoeven te worden. Zulke modellen kunnen ook gebruikt worden voor het doen van voorspellingen ten aanzien van de morfologische ontwikkelingen van de Westerschelde ten gevolge van ingrepen of natuurlijke processen die de ervaring te boven gaan.

Het project ZEEKENNIS is een integraal onderzoeks- en kennisproject van Rijkswaterstaat RIKZ ten behoeve van de directie Zeeland, gericht op het integraal waterbeheer van de Westerschelde. Het project vormt een brug tussen de directe advisering vanuit het RIKZ en langjarig onderzoek dat loopt bij grote kennisinstituten, zoals universiteiten en grote onderzoeksbureaus (WL | delft hydraulics, NIOO-CEMO, UU, enz.). Aan de hand van de problemen bij het beheer van de Westerschelde wordt onderzoek uitgevoerd met het doel meer inzicht te krijgen in het functioneren van het watersysteem. Het gebruik van tijd-ruimte schaalanalyses (schaalinteracties) zal hierbij een leidend principe zijn.

De afgelopen jaren is er door het RIKZ veel energie gestoken in het ontwikkelen van morfodynamische modellen. Als gevolg daarvan heeft het RIKZ de volgende modellen voor de Westerschelde tot haar beschikking:

- een detail procesmodel voor het sedimenttransport - DELFT3D,
- een hybride model - ESTMORF (operationeel),
- een hybride model - ASMITA (box-model),
- een geïdealiseerd morfologisch model (Schuttelaars, Utrecht),
- het 2D waterbewegingsmodel SCALWEST,
- het Cellenconcept - een methode om de complexe morfologische processen inzichtelijk te maken.

De bestaande modellen hanteren verschillende uitgangspunten en gelden voor verschillende tijd- en ruimteschalen. Bovendien is slechts ESTMORF operationeel. Een nadeel van ESTMORF is echter dat het een ééndimensionaal model is, waardoor het een beperkt toepassingsgebied heeft. Het is momenteel niet eenduidig aan te geven hoe de bestaande kennis geïntegreerd kan worden en welk model het meest geschikt is voor verdere ontwikkeling. Immers, naast de technische mogelijkheden van het model spelen ook de

bestaande beleidsvragen bij de Directie Zeeland een rol, welke het toepassingsgebied en de relevante tijd- en ruimteschalen bepalen.

Binnen het RIKZ is de wens uitgesproken om te komen tot een operationeel twee-dimensionaal morfodynamisch model. Om dit te realiseren is het van belang dat de bestaande kennis optimaal wordt benut en geïntegreerd. Het RIKZ heeft WL | delft hydraulics opdracht gegeven om een voorstudie uit te voeren om te komen tot zo'n model(lensysteem). Bij het onderzoek dient rekening gehouden te worden met het volgende:

- Uit de studie zou kunnen blijken dat een drie-dimensionale aanpak noodzakelijk is,
- Uit de studie zou kunnen blijken dat één model niet kan volstaan, doch dat meerdere modellen in de lucht gehouden dienen te worden.

In beide gevallen dienen de consequenties in het Plan van Aanpak verdisconteerd te worden en dient aangegeven te worden hoe de verschillende modellen, of delen daarvan, onderling afgestemd kunnen worden en blijven.

Het doel van de voorstudie is te onderzoeken op basis van welk bestaand model een operationeel morfologisch model van de Westerschelde ontwikkeld kan worden, en welke de weg daartoe is in de vorm van een Plan van Aanpak. Mocht de conclusie getrokken worden dat er meerdere modellen ontwikkeld dienen te worden, dan dient aangegeven te worden hoe deze modellen onderling op elkaar kunnen worden afgestemd.

De voorliggende voorstudie is gebaseerd op de volgende informatie:

- een literatuurstudie; de resultaten van deze studie zijn verweven in de diverse hoofdstukken van de rapportage en dus niet separaat gerapporteerd,
- een Workshop op 16 oktober 2001 waar aan de hand van voordrachten door en discussies met morfologische specialisten en de beheerder een realistisch Programma van Eisen en Fasering is besproken. De resultaten van deze Workshop zijn separaat gerapporteerd en een samenvatting is in Par. 1.2 opgenomen,
- bilaterale discussies met diverse specialisten, en
- de definitie van een tweetal praktijkgevallen (cases) voor een verdere invulling van het Programma van Eisen en de prioritering.

Hoofdstuk 2 bevat een kort overzicht van de belangrijkste *Fysische kenmerken* van het estuarium en Hoofdstuk 3 een overzicht van de *Beleidsvragen*, welke verder gespecificeerd zijn in de beschrijving van twee *Praktijkgevallen* in Hoofdstuk 4. Het *Programma van Eisen* voor een morfodynamisch model voor de Westerschelde is opgenomen in Hoofdstuk 5. In Hoofdstuk 6 wordt een overzicht gepresenteerd van *Het huidige instrumentarium*, waaronder de nu in gebruik zijnde morfologische procesmodellen. In Hoofdstuk 7 wordt de *Onderzoeksstrategie* geformuleerd en in Hoofdstuk 8 het *Plan van Aanpak* om tot het model(lensysteem) te komen. Eén en ander leidt tot de in Hoofdstuk 9 uiteengezette *Prioritering en fasering*. Hoofdstuk 10 bevat tenslotte een kort overzicht van *Beschikbare en benodigde data* om het model(lensysteem) te calibreren.

1.2 Samenvatting workshop 16 oktober 2001

Kader

De beheerder van de Westerschelde, de Directie Zeeland van Rijkswaterstaat, is verantwoordelijk voor de *Veiligheid*, *Toegankelijkheid* en *Natuurlijkheid* van het gebied. Een groot aantal specifieke beleids- en beheersvragen heeft betrekking op deze drie functies. In dit kader wordt door RIKZ van Rijkswaterstaat het project ZEEKENNIS uitgevoerd, dat de benodigde *kennis* op het gebied van hydrodynamica, morfologie en ecologie dient toe te leveren. De operationalisering van een morfologisch model voor de Westerschelde vormt onderdeel van dit project.

Programma van eisen morfodynamische modellering

Het te beschouwen gebied betreft de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde. De monding (Voordelta) is niet het primaire aandachtsgebied en moet slechts worden meegenomen indien dit van belang is voor de overige gebieden. De fasering van de operationalisering van een morfologisch model dient zo te zijn dat op (zeer) korte termijn (2002) reeds vragen kunnen worden beantwoord, die o.a. verband houden met de beroepsprocedure tegen de laatste verdieping. Op de middellange termijn (5 jaar) speelt het te nemen kabinetsbesluit m.b.t. de Lange Termijn Visie Westerschelde en de daaruit voortkomende beheers- en beleidsaspecten. Reeds nu kan worden geconstateerd, dat de beheers- en beleidsvragen betrekking hebben op zowel kleinschalige (detail)problemen (bodemveranderingen in vaargeulen en t.p.v. kabels en leidingen) als grootschalige ontwikkelingen van het gebied (veranderingen in arealen van geulen en platen, ondiep water en slikken). Hiermee samenhangende tijdschalen voor morfologische veranderingen variëren tussen respectievelijk jaren en decennia met een voorspelhorizon tot 30 à 50 jaar. Teneinde het functioneren van de Westerschelde te kunnen beoordelen dienen tevens indicatoren te worden vastgesteld. Voor het morfologisch gedrag van de Westerschelde zijn voornamelijk de zandtransporten van belang. Slibtransporten zijn hieraan ondergeschikt en kunnen vooralsnog buiten beschouwing worden gelaten. Voor vragen m.b.t. het ecologisch functioneren van de Westerschelde kan in de toekomst wel de noodzaak bestaan de slibtransporten mede in beschouwing te nemen teneinde voorspellingen te kunnen doen naar de bodemsamenstelling.

(Te modelleren) fysische processen

De hydrodynamica is de primaire, sturende factor voor de morfologie. Een correcte modellering hiervan is een eerste vereiste. In dit verband is de reproductie van getijasymmetrie van belang, aangezien hierdoor de netto sedimenttransporten (vloed- of ebdominantie) worden bepaald. Bij de calibratie van een waterbewegingsmodel t.b.v. de morfologische modellering gelden daarom andere criteria (bijv. een correcte reproductie van de M_4 -component). Bij de huidige hydrodynamische modellering voor de Westerschelde vormt het gedrag van de intergetijdegebieden nog een zwakke schakel; o.a.

betreft dit de onzekerheid in de hydraulische ruwheid. Dit verklaart waarschijnlijk de slechtere reproductie van de waterbeweging onder stormcondities ('events') van het operationele SCALWEST model (m.n. in het bovenstroomse deel).

De grootschalige morfologische karakteristieken van de Westerschelde betreffen het meergeulenstelsel, bestaande uit eb- en vloedgeulen, drempelgebieden, kortsluitgeulen en intergetijdegebieden. De onderliggende processen zijn in belangrijke mate drie-dimensionaal t.g.v. horizontale en verticale circulaties, waaronder secundaire stroming in bochten. Menselijke ingrepen hebben een significante en voortdurende invloed op de morfologie, terwijl tevens rekening moet worden gehouden met een nog merkbare historisch beïnvloeding. Dit laatste betekent dat niet gesproken kan worden van een 'vaste' referentiesituatie, waarmee het effect van een ingreep kan worden vergeleken. Daarnaast blijkt dat, afhankelijk van geometrische kenmerken en getijkarakteristieken (belang van de M_4 component), meerdere evenwichten mogelijk zijn of zelfs in het geheel geen evenwicht. Complicerende factor hierbij is dat de processen niet-lineair zijn en tot een chaotisch gedrag van het systeem en een zekere mate van onvoorspelbaarheid kunnen leiden. Een voorbeeld hiervan vormt het ontstaan van geulen. Kortsluitgeulen op de drempelgebieden vertonen een cyclisch gedrag, waarvan niet bekend is of dit autonoom is, dan wel bepaald wordt door externe factoren. Deze kortsluitgeulen spelen mogelijk een belangrijke rol bij de sedimentuitwisseling tussen bochtgroepen en kunnen als zodanig van belang zijn voor de morfologische ontwikkeling van het gehele estuarium.

De morfologische veranderingen worden bepaald door de waterbeweging en de resulterende sedimenttransporten. De (gemiddelde) korreldiameter van het sediment is hierbij een bepalende grootte. Een kleinere diameter leidt tot een snellere aanpassing van het systeem en dus tot kortere tijdschalen. Tevens kunnen erosiegebieden veranderen in sedimentatiegebieden en vice versa als de korreldiameter wordt gevarieerd. Bij de morfologische modellering zal hiermee rekening moeten worden gehouden.

De tijdschalen van de morfologische processen variëren van minder dan een jaar tot decennia en eeuwen. Deze tijdschalen zijn gerelateerd aan de ruimteschalen; kleinschalige processen, zoals lokale verdiepingen/verondiepingen, voltrekken zich snel. Kortsluitgeulen vertonen een cyclisch gedrag met een tijdschaal van jaren tot decennia, terwijl wijzigingen in het grootschalige patroon van eb- en vloedgeulen veranderingen vertonen over een periode van decennia of meer.

In het gebied kunnen door geulen moeilijk of niet-erodeerbare lagen worden aangesneden (Boomse klei), hetgeen van invloed kan zijn op de morfologische ontwikkeling.

Modeleisen: mogelijkheden en beperkingen

Voor de Westerschelde is SCALWEST als hydrodynamisch model beschikbaar in de vorm van drie versies: een grof en een fijn diepte-gemiddeld model en een drie-dimensionaal model (TRISCAL). Met het model kan ook de zoutverdeling worden berekend. Het model is v.w.b. de grootschalige waterbeweging gecalibreerd en gevalideerd voor een aantal perioden

(spring-, dood- en gemiddeld tij), incl. stormcondities. Nagegaan moet worden in hoeverre met het model stroomasymmetrie correct wordt weergegeven, i.v.m. het belang voor netto sedimenttransporten, en hoe de reproductie onder stormcondities kan worden verbeterd, m.n. voor de Boven-Zeeschelde. In dit verband is een correcte modellering van de intergetijdgebieden van belang. De calibratie van het model voor deze gebieden wordt begin 2002 afgerond.

Naarmate een morfologisch model beter in staat is de morfologische karakteristieken te beschrijven zullen in toenemende mate betrouwbaarder uitspraken kunnen worden gedaan. Dit kan worden nagestreefd op de volgende manieren: (i) door een zo volledig mogelijke beschrijving van de (bekende) onderliggende processen, (ii) door een vermindering van het aantal ruimtedimensies (integratie over de diepte), (iii) door vereenvoudigingen en parameterisaties van de processen en (iv) door aggregatie in het tijdsdomein. Momenteel zijn er verschillende modelconcepten beschikbaar, waaraan in mindere of meerdere mate aannamen ten grondslag liggen: de procesmodellen, geïdealiseerde modellen en de dynamisch-empirische modellen. Elk van deze modelconcepten heeft een eigen toepassingsgebied.

De *procesmodellen* berekenen in detail de diverse grootheden (sedimentconcentraties, bodemveranderingen). Naarmate de mate van detail groter wordt, neemt het rekenwerk toe en wordt de simulatieduur beperkt door de beschikbare computercapaciteit.

- Een fijnmazig 3D morfologisch model voor lange-termijn berekeningen (decennia) voor de gehele Westerschelde is momenteel dan ook niet haalbaar. Wel kan een 3D model worden ingezet voor detailproblemen, waarbij een afweging moet worden gemaakt tussen de ruimtelijke resolutie van het model en de simulatieduur.
- Voor de grootschalige morfologie van de Westerschelde, met hieraan verbonden grote tijdschalen, kan een 2Dh model goed voldoen. Eventueel kan dan onderscheid worden gemaakt tussen grove schematisaties, wanneer het gaat om het begrip en gedrag van het systeem, en gedetailleerde simulaties voor specifieke problemen. In het eerste geval dient men zich te realiseren dat bijvoorbeeld het gedrag van kortsluitgeulen dan niet gemodelleerd wordt.
- Gedetailleerde 2Dh simulaties voor de middellange termijn kunnen eventueel worden uitgevoerd met RAM-MOR, middels een snelle bodem-‘updating’ op basis van regelmatig maar minder vaak ververste transportberekeningen en een eenvoudige benadering van de transporten.
- Quasi-3D vormt een uitbreiding van 2Dh, omdat secundaire stroming in bochten geparameteriseerd wordt meegenomen. De meerwaarde van quasi-3D is momenteel nog niet duidelijk en een dergelijke aanpak wordt momenteel als minder adequaat beschouwd.

Uitgevoerde simulaties met het diepte-gemiddelde 2D model DELFT2D-MOR tonen dat het hiermee mogelijk is een systeem met ebgeulen en vloedscharen te genereren. Voor de hoog-dynamische drempelgebieden kunnen met een 2Dh model nog geen betrouwbare kwantitatieve uitspraken worden gedaan. Een vergelijking tussen een 3D morfologisch model en veldmetingen is nog slechts in beperkte mate uitgevoerd. Bijvoorbeeld, in

Thoolen (2000) kon de simulatieduur nog niet langer dan één maand worden gekozen i.v.m. de beschikbare computercapaciteit.

Geïdealiseerde modellen hebben vooral waarde, waar het gaat om het verschaffen van inzicht in het systeemgedrag. Hiermee kunnen gevoeligheden worden nagegaan voor (kleine) veranderingen in de parameters. Zij kunnen inzicht verschaffen in het vóórkomen en gedrag van evenwichten (stabiel of instabiel) en toeleverend zijn bij het definiëren van indicatoren. Verder is het (wellicht) mogelijk de vraag te beantwoorden of sprake zal zijn van één of meer geulen voor een gegeven situatie. Een lokaal geïdealiseerd model laat zien dat de initiële ontwikkeling van bodemvormen (met een lengteschaal van de getijweglengte) op identieke wijze met 2D en 3D formuleringen kan worden aangegeven.

ESTMORF is een voorbeeld van *dynamisch-empirisch model* en is bedoeld voor de simulatie van de grootschalige morfologische ontwikkeling van estuaria. De rekenstappen zijn gebaseerd op getij-geïntegreerde grootheden en de afmetingen van de rekencellen zijn aanmerkelijk groter dan die bij procesmodellen. Het model is derhalve minder rekenintensief dan procesmodellen en derhalve kunnen langdurige simulaties (tot eeuwen) worden uitgevoerd. ESTMORF maakt gebruik van empirische evenwichtsvergelijkingen voor de geul en de platen, waardoor de berekening altijd zal convergeren naar een evenwicht. Het model is o.a. geschikt voor het optimaliseren van een baggerstrategie. Omdat ESTMORF uitgaat van een 1D netwerk is het niet mogelijk het ontstaan van nieuwe geulen te simuleren. Het model moet worden beschouwd als complementair aan andere benaderingen.

Het *Cellenconcept* is een methodiek voor de aggregatie, interpretatie en visualisatie van de complexe processen. Het is geschikt voor de optimalisatie van de bagger- en stortstrategie en de onderlinge afstemming van diverse modellen.

Resumerend geldt:

Modelconcept	Mogelijkheden
DELFT2D-MOR grof	• grootschalige morfologie over jaren
DELFT2D-MOR fijn	• detailsimulaties over 1 tot enkele jaren;
	• evt. combinatie met RAM-MOR voor simulaties over 5 jaar
Quasi-3D	• meerwaarde t.o.v. 2Dh nog onvoldoende aangetoond
3D grof	• detailsimulaties over 1 jaar met variërende condities
3D fijn	• detailsimulaties (o.a. gedrag kortsluitgeulen) voor korte periodes t.b.v. inzicht;
	• langduriger simulaties voor de gehele Westerschelde zijn nog niet mogelijk
Geïdealiseerde modellen	• inzicht in systeemgedrag en vaststellen van indicatoren
ESTMORF	• grootschalige morfologie over decennia tot eeuwen;
	• geschikt voor optimalisatie baggerstrategie
Cellenconcept	• interpretatie 'tool'

Calibratie modellen en benodigde meetdata

Om de betrouwbaarheid van de modellen te kunnen aangeven moeten deze worden gecalibreerd aan de hand van velddata. Voor de validatie van het lange-termijn gedrag zal gebruik gemaakt moeten worden van historische data. Dit vereist het ontsluiten van databestanden en het combineren van metingen uit verschillende, in het verleden uitgevoerde, projecten. Concreet betekent dit dat 'hindcast' studies voor de Westerschelde uitgevoerd moeten worden.

Aanvullend hierop zullen nieuwe metingen nodig zijn, waaronder meer ruimtelijk verdeelde meetdata (HF radar). Hierbij geldt dat wat gemeten moet worden, bepaald wordt door de specifieke vraag die moet worden beantwoord en door de eisen die het betreffende model stelt.

Tot besluit

Voorgesteld wordt om twee cases 'als kapstok' voor de Westerschelde te definiëren, waarvoor bovengenoemde aspecten verder uitgewerkt kunnen worden. De cases moeten uitgewerkt worden door een groep bestaande uit onderzoekers, medewerkers van Dir. Zeeland en van RIKZ. De twee cases moeten tijdens de voorstudie worden gedefinieerd.

Tijdens de workshop is een aantal opmerkingen van algemene aard gemaakt:

- Bij de beantwoording van beheers- en beleidsvragen moet men realistisch zijn ('willen wat je kunt').
- Wanneer modellen worden ingezet, moeten onzekerheden worden vermeld (is het eventueel geoorloofd kleinschalige processen te negeren of te parameteriseren?). Aangegeven dient te worden, hoe hiermee zal worden omgegaan.
- Indien meerdere modellen worden ingezet dient er sprake te zijn van een goede onderlinge afstemming.
- Er is een goede communicatie nodig tussen de beheerder en de adviseur/onderzoeker.
- Men dient te leren ('inzicht') vanuit toepassingen van de huidige modelconcepten.
- Het effect van golven, m.n. op de platen, vereist nader onderzoek.
- Het morfologisch systeem is 'onvoorspelbaar' (of kan dit zijn). Aandacht dient uit te gaan naar hoe hiermee moet worden omgegaan.
- Systeemkennis moet worden ontwikkeld in samenhang met 'monitoring'.
- Aggregatie van resultaten is nodig t.b.v. het beheer.

2 Het Westerschelde estuarium

Gebiedsafbakening

Het Schelde estuarium wordt gevormd door (i) de Zeeschelde, vanaf Gent waar nog sprake is van getij-invloed, tot de Nederlands-Belgische grens en (ii) de Westerschelde, benedenstrooms van de Zeeschelde (van Eck, 1999). Het mondingsgebied (de Voordelta) vormt de overgang van de Westerschelde naar de Noordzee; de scheidingslijn tussen beide gebieden wordt hier gedefinieerd met de raai Vlissingen-Breskens. De gebiedsafbakening voor de onderhavige studie bestaat uit de Beneden Zeeschelde (Zeeschelde benedenstrooms van Rupelmonde) en de Westerschelde. De Voordelta zal slechts worden beschouwd als dit van invloed is op de morfologie van het binnengebied; het vormt echter geen expliciet aandachtsgebied voor de modellering.

Algemene karakteristieken

Het huidige Schelde estuarium heeft een trompetvormige geometrie en beslaat een oppervlak van 370 km². De afstand tussen Vlissingen en Gent bedraagt 160 km. De profiel-gemiddelde waterdiepte neemt over dit traject af van 15 m bij Vlissingen tot ongeveer 3 m bij Gent. De geulen zijn het diepst (tot 30 à 40 m) in de scherpe bochten. De breedte van het estuarium bedraagt 6 km bij Vlissingen, 2-3 km bij Bath en minder dan 100 m bij Gent (Jeuken, 2000). De gemiddelde getijslag bij Vlissingen is 3,8 m met een variatie van $\pm 15\%$ tijdens de doodtij-springtij cyclus. Door convergentie van de geometrie, verondieping van het estuarium en interferentie met de gedeeltelijk teruggekaatste getijgolf neemt de getijslag toe tot 5,2 m bij Antwerpen. Het estuarium kan aldus geclassificeerd worden als 'meso' tot 'macro tidal'. De duur van het neergaand tij is langer dan die van het opgaand tij en is een voorbeeld van getijasymmetrie.

De gemiddelde jaarafvoer van de Schelde is 120 m³/s en het afgevoerde watervolume tijdens eb of vloed is daarmee minder dan 1% van het getijvolume in de monding. De maximale stroomsnelheden variëren tussen 1 en 1,5 m/s. De zoutindringing kan reiken tot voorbij Antwerpen.

Suspensieconcentraties voor slib in de Westerschelde bedragen enkele tientallen mg/l en nemen toe tot ongeveer 150 mg/l in het troebelheidsmaximum voorbij Antwerpen (wat eveneens wordt beïnvloed door de lozing van ongezuiverd afvalwater). De korreldiameter van gesuspendeerd materiaal ten zuidoosten van Hansweert varieert tussen 130 tot 160 μm (Allersma, 1992), echter dit is gebaseerd op slechts 6 monsters. De korreldiameter van het bodemsediment in de geulen van de Westerschelde is groter en varieert tussen 185 en 250 μm (Allersma, 1992) dan wel tussen 150 en 210 μm (Jeuken, 2000). Het percentage slib in de gebaggerde geulen is over het algemeen minder dan 5%, maar kan wat meer zijn op plaatsen met sterke sedimentatie. Op de hoge platen, de slikken en de schorren komen veel hogere slibgehalten voor. (Allersma, 1992). In het gebied kunnen ribbels, megaribbels en duinen voorkomen, elk met een karakteristieke voortplantingssnelheid, zie Tabel 2.1.

Bodemvorm	Hoogte	Breedte	Voortplantingssnelheid
ribbels	1-5 cm	10-50 cm	1 tot enkele cm's/min
megaribbels	0,2-2 m	1-20 m	enkele m's/getij ?
duinen	2-5 m	50-100 m	enkele m's/getij

Tabel 2.1: Bodemvormen in de Westerschelde (Allersma, 1992)

Ribbels komen voor in ondiep water op en langs de randen van platen. Megaribbels kunnen worden aangetroffen in de kleinere geulen en langs de diepere randen van de platen en duinen op de bodems van de diepe geulen.

Ontstaan en historische ontwikkeling van de Westerschelde

Tot aan het begin van de jaartelling was er geen grote mariene invloed in het huidige mondingsgebied van de Westerschelde. Vanaf ca. 200 AD breidde de mariene invloed zich uit, waarbij geleidelijk een groot geulenstelsel ontstond (de Honte). Tussen ca. 800 AD en 1100 AD werd, juist ten noorden van Antwerpen, een verbinding gevormd tussen de Schelde en de Honte. Echter, tot het eind van de 15^e eeuw verliep de hoofdafvoer van de Schelde nog via de Oosterschelde. Pas na verdere uitbreidingen in het Westerschelde gebied, mede t.g.v. militaire inundaties tijdens de tweede helft van de 16^e eeuw, nam de Westerschelde deze functie over (Winterwerp et al, 2000). In de 16^e en 17^e eeuw ontstonden de verdronken gebieden van Saeftinge, Reimerswaal en het Markiezaat van Bergen op Zoom.

Sinds de 17^e eeuw zijn, grotendeels door natuurlijke processen, grote oppervlaktes intergetijdegebieden opgeslibd en vervolgens ingepolderd of bedijkt. In 1650 bedroeg het oppervlak aan intergetijdegebied tussen NAP-2 m en NAP+2 m nog 350 km²; in 1800 was dit afgenomen tot 180 km² en momenteel bedraagt het oppervlak aan intergetijdegebied 90 km². Tussen 1650 en 1968 is het volume van de Westerschelde afgenomen met $2 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, wat correspondeert met een gemiddelde jaarlijkse sediment import van $0,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (van der Spek, 1994). Het oppervlak van de gehele Westerschelde is de afgelopen twee eeuwen afgenomen van 450 km² tot 300 km². Volgens Allersma (1992) was hiermee een jaarlijkse sedimentafzetting ter grootte van $3 \text{ à } 4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gemoeid, hetgeen 5 tot 7 keer meer is dan volgens van der Spek.

Tussen 1800 en 1905 is het repeterende patroon van eb- en vloedgeulen ontstaan, resulterend in de huidige zes estuarine secties ofwel bochtgroepen (Jeuken, 2000). Op deze wijze heeft de Westerschelde zich ontwikkeld van een ondiep getijde bekken met een onregelmatig geulenpatroon en uitgestrekte intergetijdegebieden tot het huidige, onvertakte en diepere estuarium dat wordt gedomineerd door eb- en vloedscharen.

Door de afname van het areaal aan intergetijdegebieden en door het baggeren is de gemiddelde waterdiepte groter geworden. Dit heeft ertoe geleid dat de getijvoortplantingssnelheid is toegenomen, zodat het faseverschil tussen Vlissingen en Antwerpen met 1,5 uur is verminderd. Daarnaast is het getijverschil bij Antwerpen toegenomen van 3,8 m in 1800 tot 5,2 m voor de huidige situatie. Door de 'efficiëntere' vulling van het estuarium is de

afname van het getijvolume in de monding, welke het directe gevolg is van de vermindering van het intergetijdegebied, voor een belangrijk deel gecompenseerd (minder dan 4%, van der Spek, 1997).

Geologische opbouw

De samenstelling van de ondergrond is van belang, aangezien het van invloed kan zijn op de morfodynamiek van de Westerschelde. Het betreft met name de belemmering van: (i) de laterale verplaatsing van de geulen, (ii) het insnijden in de ondergrond en/of (iii) de erosie van buitenbochten door niet- en moeilijk erodeerbare lagen. Een tweede invloed betreft de zandige opvullingen van jonge geulen. Deze blijken vaak weinig stabiel te zijn, waardoor zettingsvloeiingen en dijkval kunnen optreden.

In de ondergrond van de Westerschelde worden Tertiaire, Pleistocene en Vroeg-Holocene lagen aangetroffen (Winterwerp et al, 2000). De afzettingen uit het Tertiair en Pleistoceen bestaan vooral uit meer of minder gecompacteerd zanden; de Vroeg Holocene afzettingen worden grotendeels gevormd door klei en veen. De Tertiaire, maar ook Pleistocene afzettingen, hebben door verkitting van de zanden en consolidatie van de kleien een matige tot (zeer) hoge erosiebestendigheid. Dit geldt in het bijzonder voor de Boomse klei uit het Tertiair (Oligoceen). Doordat deze lagen op grotere diepten voorkomen, zullen zij vooral door de diepste delen van migrerende geulen aangesneden worden en zal een verdere verdieping van de geul worden vertraagd. Een belemmering van de uitschuring zal dan tot een verbreding van de geul kunnen leiden. Klei- en veenlagen zullen in dat geval door hun grotere erosiebestendigheid meer weerstand bieden tegen laterale migratie dan zandige afzettingen.

De noordelijke oever van het estuarium bestaat uit een opeenvolging van afzettingen uit het Tertiair, Pleistoceen en Vroeg-Holocene. Dit pakket wordt op drie plaatsen doorsneden door vooral zandige opvulling van grote, relatief jonge geulen (niet ouder dan 1500 jaar): bij het Sloe, ten oosten van Ellewoutsdijk en tussen Hoedekenskerke en Hansweert. De zuidelijke oever bestaat vrijwel geheel uit kleiige afzettingen van jonge geulen, welke direct op Tertiaire afzettingen liggen.

De hoofdgeulen van het estuarium snijden in hun bochten diep in, waarbij de diepste delen de Pleistocene of Tertiaire afzettingen kunnen bereiken. Zo heeft de Pas van Terneuzen zich tussen de Braakman en de Platen van Hulst tot een maximum van 7 m ingesneden in de Boomse klei. Bij Borssele heeft de Honte zich meer dan 20 m ingesneden in de overwegend zandige afzettingen van de Formatie van Oosterhout uit het Pleistoceen. Het effect van het al dan niet vastleggen van het diepste deel van een geul op het gedrag van de gehele geul is momenteel nog onduidelijk.

Geconcludeerd wordt dat de ondergrond de morfologische ontwikkeling van het estuarium kan beïnvloeden en dat bij de uitvoering van morfologische simulaties rekening moet worden gehouden met het voorkomen van niet- of moeilijk erodeerbare lagen. De aanwezigheid van deze lagen in de Westerschelde moet dan ook nader worden geïnventariseerd. Tevens dient rekening te worden gehouden met lokaties waar dijkval en/of zettingsvloeiingen kunnen optreden.

Morfologie

Algemeen

Het algemene beeld is een meanderend estuarium, waarvan de geometrische schaal in zeewaartse richting toeneemt. De vorm wordt mede bepaald door de relatief harde Pleistocene ondergrond, de dijken, de oeververdedigingen en de menselijke ingrepen (zandwinning, baggeren en storten). Binnen deze begrenzingen vertoont het estuarium een duidelijke hoofdgeul, die heen en weer slingert tussen de buitenbochten van het estuarium. In de binnenbochten van de hoofdgeul bevinden zich relatief hoge platen. De platen zijn van de oever gescheiden door één of meer nevengeulen; sommige lage platen worden doorsneden door kortsluitgeulen (Allersma, 1992). In de samenstelling van de ondergrond van de Westerschelde en de aangrenzende gebieden kunnen geen directe redenen gevonden worden voor het huidige bochtige verloop van het estuarium. De zogenaamde 'ophangpunten' lijken dus niet geologisch te zijn bepaald. Waarschijnlijk vindt het bochtige verloop zijn oorsprong in de tracés van de oudere geulen, die onderdeel uitmaakten van het Honte getijdebekken (Winterwerp et al, 2000).

Meergeulensstelsel

Het geulensysteem in de Westerschelde wordt gevormd door een regelmatig patroon van elkaar ontwikkende eb- en vloedgeulen. De grote ebgeulen maken deel uit van een min of meer continue meanderende geul, vastgelegd door gefixeerde punten langs het estuarium. Aan de zeewaartse zijde van een ebgeul bevindt zich een drempel. De vloedgeulen zijn recht, ontstaan in de bochten van de ebgeul en hebben landwaarts eveneens een drempel. Het regelmatige patroon van dit tweegeulensysteem wordt toegeschreven aan de geometrie van het estuarium en ontstaat als de breedte van het estuarium drie tot vijf maal de breedte van de hoofdgeul bedraagt. In Jeuken (2000) wordt de volgende classificatie voor de geulen gehanteerd, gebaseerd op hun grootte en hun locatie en oriëntatie t.o.v. naburige geulen:

- *Hoofdgeulen*. Deze hebben een richting evenwijdig aan de oever en transporteren het merendeel van het water. In elke dwarsdoorsnede van de Westerschelde zijn twee hoofdgeulen te onderscheiden: een gekromde ebgeul en een rechte vloedgeul. Tevens kunnen kleinere, voormalige hoofdgeulen voorkomen die van de grote hoofdgeulen worden onderscheiden door intergetijdegebieden. De transportfunctie van deze kleinere hoofdgeulen is beperkt.
- *Kortsluitgeulen*. Dit zijn de kleinste geulen in een dwarsprofiel. Zij verbinden twee grote hoofdgeulen of een grote en een kleine hoofdgeul. De kortsluitgeulen zorgen voor een herverdeling van het water en kunnen onderverdeeld worden in:
 - ⇒ geulen op drempels: deze snijden door de drempels van de hoofdvloedgeulen en verbinden twee hoofdgeulen. Zij zijn ongeveer evenwijdig aan de hoofdvloedgeul en ontmoeten de meanderende ebgeul onder een hoek.
 - ⇒ dwarsgeulen: deze verbinden eveneens twee grote hoofdgeulen. Zij snijden door de langvormige intergetijdegebieden, die de hoofdeb- en hoofdvloedgeulen van elkaar scheiden. De dwarsgeulen maken met deze hoofdgeulen een hoek.
 - ⇒ randgeulen: zij vormen verbindingen tussen een grote en een kleine hoofdgeul langs de randen van het estuarium. Zij ontmoeten de beide hoofdgeulen onder een hoek.

Door Rijkswaterstaat wordt eveneens de aanduiding *nevengeul* gebruikt. Hiermee worden alle geulen bedoeld, die anders zijn dan de (hoofd)scheepvaartgeul.

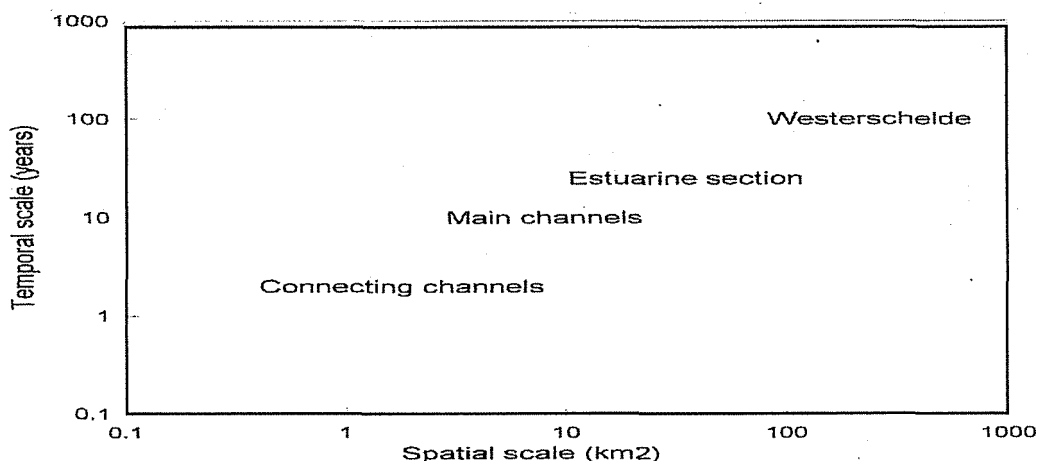
Verondersteld wordt dat het hierboven beschreven meergeulenstelsel op een tijdschaal van enkele decennia in een dynamisch evenwicht verkeert, d.w.z. dat met name op kleinere schaal geulen en intergetijdegebieden gevormd worden en weer verdwijnen. Afhankelijk van de natuurlijke processen en menselijke ingrepen kan het meergeulenstelsel verdrinken (d.w.z. dat de intergetijdegebieden niet meer droog vallen), verlanden (d.w.z. dat kombergend volume en geuldoorsneden sterk afnemen) dan wel dat een dynamisch evenwicht gehandhaaft blijft (Winterwerp et al, 2000).

Estuarine secties/bochtgroepen

De configuratie en morfologie van de hoofdgeulen, verbindingsggeulen op de drempels en de dwarsgeulen vertonen een repeterend geulenpatroon, aangeduid met estuarine sectie of bochtgroep. Elke estuarine sectie heeft een grote meandervormige hoofdgeul en een aangrenzende grote, rechte hoofdvloedgeul. De beide hoofdgeulen zijn van elkaar gescheiden door intergetijdegebieden of banken en met elkaar verbonden door één of twee typen verbindingsggeulen (drempelgeulen of dwarsgeulen). In de Westerschelde kunnen zes estuarine secties worden onderscheiden (Jeuken, 2000):

1. grenssectie (ontstaan 1860)
2. sectie Bath (ontstaan 1860)
3. sectie Valkenisse (ontstaan 1818)
4. sectie Hansweert (ontstaan 1905)
5. sectie Terneuzen (ontstaan 1818)
6. sectie Vlissingen (ontstaan 1890)

De afmetingen van de secties nemen af in stroomopwaartse richting. De sedimenten in de geulen zijn grover dan die op de intergetijdegebieden. Verder zijn de sedimenten in de bovenstroomse secties in het algemeen fijner dan die in de secties nabij de monding.



Figuur 2.1: Morfologische tijd- en ruimteschalen voor de geulen in de Westerschelde (Jeuken, 2000)

Overeenkomsten tussen de secties zijn: de sedimentatie in de hoofdebgeulen en de erosie van de rechte hoofdvloedgeulen. De secties kunnen elk een eigen karakteristiek morfologisch gedrag vertonen m.b.t sedimentbalans, aanwezigheid en gedrag van de verbinding- en dwarsgeulen, en de grootte van menselijke ingrepen. Het is daarom nuttig de estuarine secties als aparte ruimteschaal te definiëren met een hieraan gerelateerde

tijdschaal. In Figuur 2.1 is dit schematisch weergegeven, tezamen met de tijd- en ruimteschalen van andere morfodynamische systemen: de Westerschelde, de hoofdgeulen en de verbindingsgeulen.

Schorren, slikken en platen

In het gebied komen ondiepe gebieden voor, die tijdens hoogwater incidenteel (schorren) of altijd (slikken en platen) overstromen. De schorren en slikken grenzen aan de randen van het gebied en zijn van elkaar gescheiden door de waterlijn bij gemiddeld hoogwater tijdens doodtij (+2 m NAP). De (hoge) platen reiken eveneens tot een niveau van +2 m NAP en worden bij droogvallen volledig omringd door water, zie Allersma (1992).

Tijd- en ruimteschalen

Allersma (1992) komt tot de volgende tijdschalen (responstijden) voor het sedimentatiegedrag in de diverse deelgebieden van de Westerschelde (Tabel 2.2):

Estuarium	1200 jaar
Land van Saeftinge	150 jaar
Kreken Land van Saeftinge	75 jaar
Havens	12,5-25 jaar
Gebaggerde geulen	0,9 jaar

Tabel 2.2: Responstijden voor sedimentatie (Allersma, 1992)

In de LTV-studie voor het Schelde-estuarium (Winterwerp et al, 2000) worden de volgende ruimte- en bijbehorende tijdschalen onderscheiden met de forcering, die hierop van invloed kan zijn (Tabel 2.3):

Ruimte- schaal	Tijd- schaal ¹⁾	Morfologisch systeem	Forcering
Mega	eeuwen	• Schelde-estuarium • Westerschelde	• zeespiegelstijging • inpolderingen • doorgaande zandwinning
Macro	decennia	• hoofd- en nevengeulen	• verdiepingen • onderhoudsbaggerwerk • storten baggerspecie • 18,6-jarige cyclus
Meso	jaren	• ontstaan, migreren en verdwijnen kortsluitgeulen • sedimenttransport over platen • plaat-geul interactie	• extreme condities • getijbeweging • baggeren, storten en zandwinning
Micro	dagen	• beddingvormen (megaribbels)	• getijbeweging • golfwerking

Tabel 2.3: Tijd- en ruimteschalen morfologische systemen (Winterwerp et al, 2000)

¹⁾ betreft responstijden en niet de levensduur

Zandbalans

Voor een goed begrip van het gedrag van het systeem en als basis van toekomstige modelleringen is het opstellen van een grootschalige zandbalans van groot belang. Door Rijkswaterstaat/Directie Zeeland is in het verleden een dergelijke zandbalans regelmatig opgesteld op basis van uitgevoerde lodingen in het gebied. De meest recente dateert van augustus 2000 (de Jong, 2000). *Cumulatieve* resultaten voor de perioden 1955-1999 en 1990-1999 voor de Westerschelde zijn opgenomen in resp. Tabel 2.4a en Tabel 2.4b.

Inhoudsverandering water ¹⁾ [Mm ³]	Periode: 1955-1999	
	Ingrepen [Mm ³]	Export (+) / Import (-) [Mm ³]
geulen: +87	zandwinning: +92	mond: -76
platen/slikken/schorren: -38	baggeren: +335	Saeftinge: +13
	storten: -315	Zeeschelde: 0
Totaal: +49	Totaal: +112	Totaal: -63

Tabel 2.4a: Cumulatieve veranderingen van waterinhoud in geulen en op platen, ingrepen en export/import in de Westerschelde voor de periode 1955-1999;

¹⁾ geulen: bovenniveau = NAP -2 m

platen/slikken/schorren: bovenniveau = NAP +3,5 m; onderniveau = NAP -2 m

Inhoudsverandering water ¹⁾ [Mm ³]	Periode: 1990-1999	
	Ingerepen [Mm ³]	Export (+) / Import (-) [Mm ³]
geulen: +25	zandwinning: +16	mond: +3
platen/slikken/schorren: -3	baggeren: +79	Saeftinge: +3
	storten: -79	Zeeschelde: 0
Totaal: +22	Totaal: +16	Totaal: +6

Tabel 2.4b: Cumulatieve veranderingen van waterinhoud in geulen en op platen, ingerepen en export/import in de Westerschelde voor de periode 1990-1999;

¹⁾ geulen: bovenniveau = NAP -2 m

platen/slikken/schorren: bovenniveau = NAP +3,5 m; onderniveau = NAP -2 m

Voor een vergelijking tussen de totalen van beide perioden zijn de cumulatieve veranderingen teruggerekend naar *jaarlijks-gemiddelde* hoeveelheden, zie Tabel 2.5.

Periode	Inhoudsverandering [Mm ³ /jaar]	Ingerepen [Mm ³ /jaar]	Export (+) / Import (-) [Mm ³ /jaar]
1955-1999	+1,1	+2,5	-1,4
1990-1999	+2,4	+1,8	+0,6

Tabel 2.5: Jaarlijks-gemiddelde veranderingen van waterinhoud in geulen en op platen, ingerepen en export/import in de Westerschelde voor de perioden 1955-1999 en 1990-1999

Gedurende het laatste decennium lijkt sprake van een netto export van sediment uit de Westerschelde ter grootte van 0,6 Mm³/jaar, dit in tegenstelling tot de 44-jarige periode ervoor met een netto import van gemiddeld 1,4 Mm³/jaar. Mogelijk houdt dit verband met de gewijzigde bagger- en stortstrategie sinds 1997 (baggeren in het oosten en storten in het westen).

Uit de Tabellen 2.4a en 2.4b volgt voor het totaal van baggeren en zandwinning voor de perioden 1955-1999 en 1990-1999 jaar-gemiddelde hoeveelheden van resp. 9,7 Mm³ en 10,6 Mm³. Baggeren en zandwinning is beperkt tot een aantal lokaties in de Westerschelde, zoals weergegeven in Fig. 2.2 en 2.4, afkomstig uit de Scheldeatlas. Fig. 2.3 geeft een overzicht van de jaarlijkse variatie in baggervolumina.

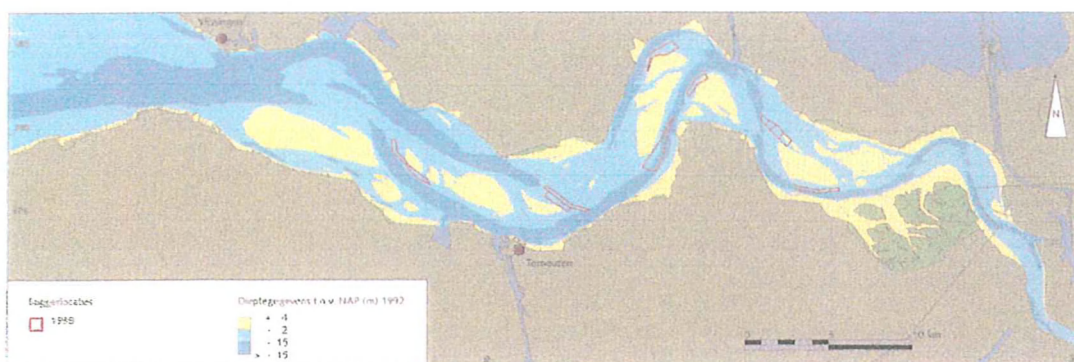


Fig. 2.2: Baggerlocaties in 1998.

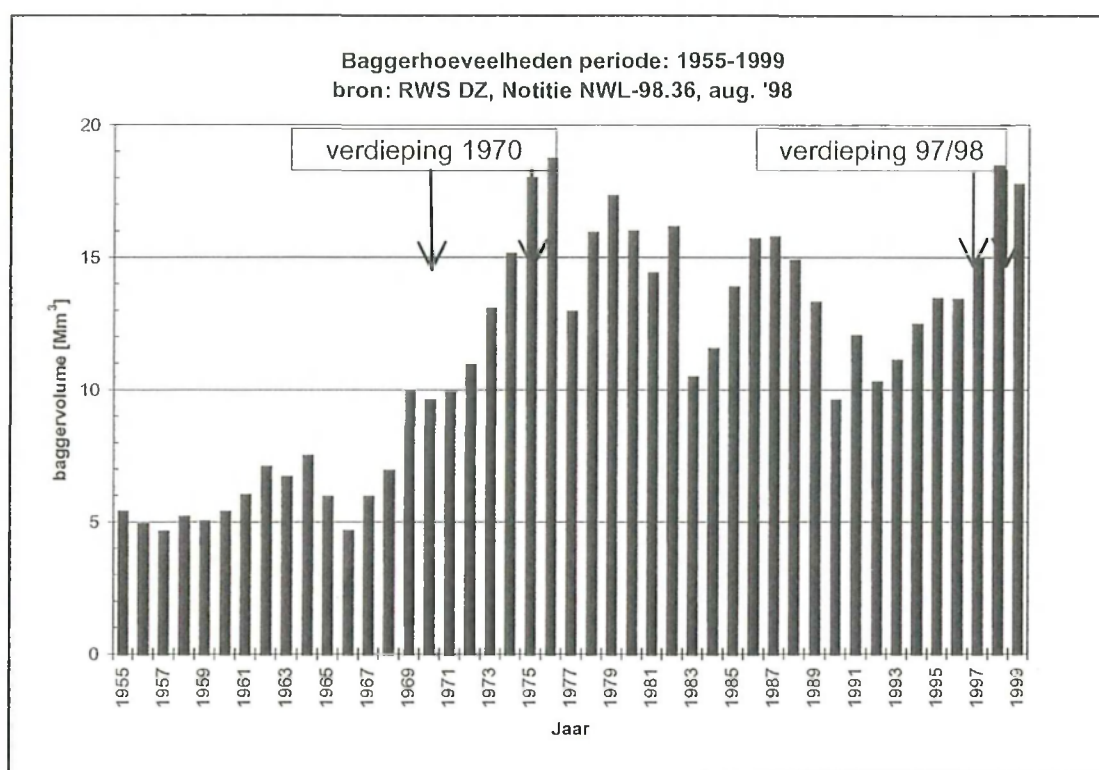


Fig. 2.3: Baggervolumina in diverse jaren.

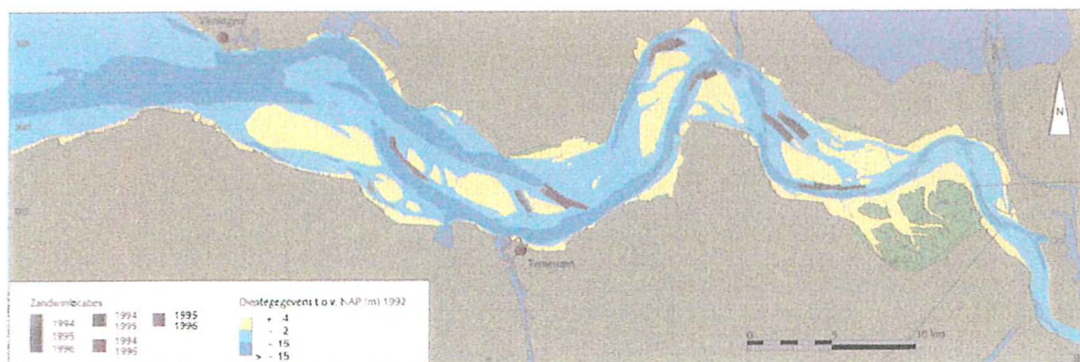


Fig. 2.4: Zandwinlocaties in diverse jaren.

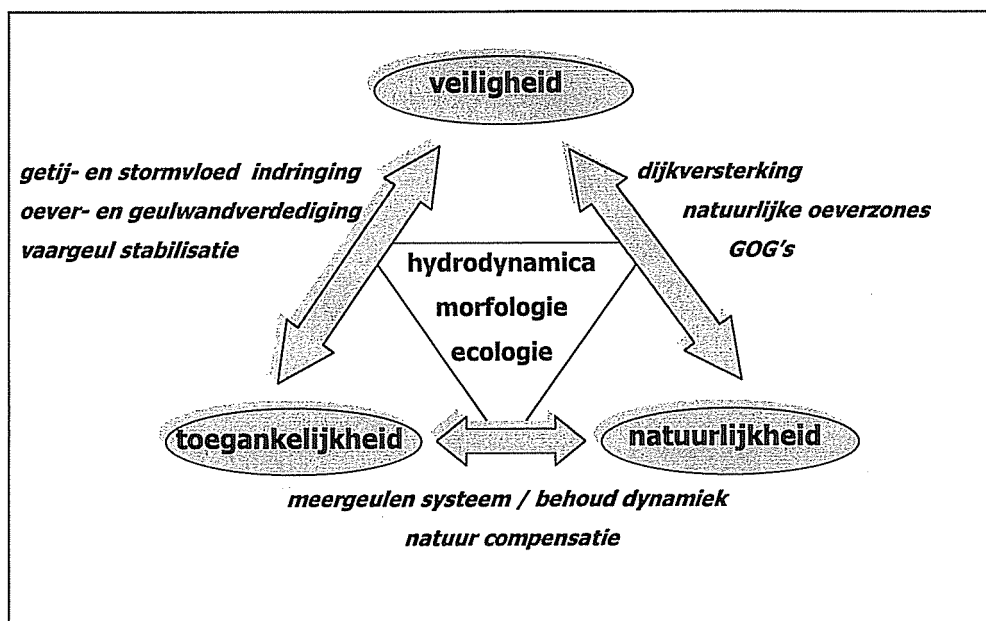
3 Beleidsvragen

De beleidsvragen zoals die uit het project Langetermijnvisie Schelde-estuarium (LTV) naar voren zijn gekomen zijn in belangrijke mate sturend geweest voor de huidige opzet van het ZEEKENNIS- project.

Binnen LTV worden drie kernfuncties onderscheiden te weten:

1. Veiligheid tegen overstromen
2. Toegankelijkheid
3. Natuurlijkheid

De samenhang tussen deze kernfuncties is schematisch weergegeven in Figuur 3.1. Bij de realisatie van deze doelen dient rekening te worden gehouden met de interactiegebieden tussen de kerndoelen die in de figuur via wederzijdse pijlen zijn aangeduid.



Figuur 3.1: Samenhang beheers- en beleidsvragen en kernfuncties Schelde Estuarium.

Belangrijke componenten van het interactie gebied tussen Toegankelijkheid en Veiligheid zijn de gevolgen van een verdere vaargeulverruiming voor de getij- en stormvloedindringing en voor de oeverstabilisatie, alsmede de eventuele gevolgen van oeververdedigingswerken voor de toegankelijkheid.

De interactie tussen Toegankelijkheid en Natuurlijkheid wordt gekenmerkt door enerzijds het risico dat verruiming van de vaargeul leidt tot aantasting van de morfologische kenmerken (o.a. meergeulensysteem) en biologische kenmerken (o.a. intergetijdegebieden en oeverzones). Anderzijds kan via natuurherstelmaatregelen actief worden gestreefd naar compensatie voor verloren of bedreigde natuurwaarden.

Het interactiegebied tussen Natuurlijkheid en Veiligheid kenmerkt zich door componenten als de aanleg van natuurlijke oeverzones, gecontroleerde overstromingsgebieden (GOG's) en dijkversterkingsmaatregelen.

In de figuur is tevens geïllustreerd dat voor een evenwichtige en duurzame ontwikkeling van de kernfuncties, expliciet rekening moet worden gehouden met de eigenschappen van het Schelde-estuarium. Dit betreft met name de hydrodynamica, de morfologie en de biologie. Als onderdeel van de interacties tussen Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid wordt hieronder een opsomming gegeven van de meest actuele beleids- en beheersvragen.

Veiligheid

1. Welke gevolgen hebben inrichtings- en beheersmaatregelen voor veiligheid?
2. Welke ingrepen, c.q. maatregelen zijn nodig om in de toekomst de risico's van extreem hoogwater te kunnen beheersen?
3. Wat zijn de gevolgen van ingrepen op waterstanden en stromingen?
4. Wat zijn op termijn de gevolgen van klimaatverandering (zware stormen, hoge rivierafvoer) en zeespiegelstijging voor de veiligheid van het Schelde estuarium?
5. Wat is de invloed van vaargeulverruiming op de stabiliteit van de oevers (en dijken) en waterstand tijdens extreem hoogwater?
6. Wat is de effectiviteit van GOG's om extreme hoogwaterstanden te beperken?

Toegankelijkheid

1. Wat is nodig om voldoende diepgang te garanderen?
2. Welke mate van geulverruiming is toelaatbaar?
3. Wat zijn aanvaardbare combinaties van vaargeulverruiming en storten van baggerspecie?
4. Wat is een optimale stortstrategie?
5. Wat is de samenstelling van het stortmateriaal?
6. Wat zijn de primaire (en lokale) effecten van storten?
7. Op welke manier kan zandwinning een rol spelen in de bagger- en stortstrategie?
8. Kan stortmateriaal van onderhouds- en verruimingsbaggeren worden gebruikt voor inrichtingswerken (NCP, oeverstabiliteit)?
9. Kan verruimen van neven- en verbindingsgeulen bijdragen aan een gewenste morfologische ontwikkeling?
10. Hoe kan systeemkennis (mede op basis van monitoring van actuele ontwikkelingen) bijdragen aan gecontroleerde (stapsgewijze) realisatie van een eventuele verdere verdieping?
11. Hoe kan rekening worden gehouden met onzekerheden, effecten van andere ingrepen en natuurlijke variabiliteit?

Natuurlijkheid

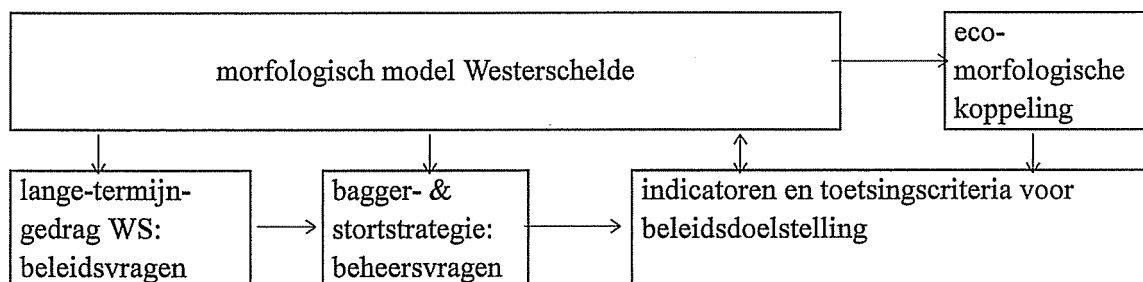
1. Welke toetsingscriteria kunnen worden gebruikt voor beoordeling van de ontwikkeling van het systeem, voor beleving van natuurwaarden en voor de waardering van belangen?
2. Welke locaties kunnen worden benut voor natuurherstel/compensatie?

3. Wat zijn de gevolgen van het eventueel herstellen van de verbinding Ooster- en Westerschelde (herstel Kreekrak) voor het Schelde estuarium?
4. Is het mogelijk om de gevolgen van ingrepen (bijv. verruimen / storten) zodanig te voorspellen en te monitoren dat bij ongewenste ontwikkelingen de beleids- en beheersstrategie kan worden aangepast?
5. Welke kennis moet verder worden ontwikkeld en welke mogelijkheden zijn er om met gebruik van modellen de morfologische en ecologische ontwikkeling van het Schelde-estuarium te voorspellen?

Samenvattend zijn dus de volgende beleidsvragen door Rijkswaterstaat geprioriteerd; zij dienen als randvoorwaarden bij de ontwikkeling van het morfologisch model:

1. Wat zijn op termijn (beleidsniveau: decennia) de gevolgen van klimaatverandering (stormklimaat en rivierafvoer) en zeespiegelstijging voor de veiligheid rondom het Schelde-estuarium?
2. Wat is een optimale strategie (beleidsniveau: jaren) voor baggeren, storten en zandwinning in het Schelde-estuarium, waarbij het meergeulenstelsel blijft gehandhaafd, en bevaarbaarheid en veiligheid tegen overstromen blijft gewaarborgd?
3. Welke toetsingscriteria kunnen worden gebruikt voor de beoordeling van de ontwikkeling van het (eco)systeem, voor de beleving van natuurwaarden en voor de waardering van belangen?

De positie van het morfologisch model in het beheer is in onderstaand diagram geschetst:



4 Praktijkgevallen

Tijdens een overleg met RWS, Directie Zeeland en RWS, RIKZ zijn twee praktijkgevallen besproken aan de hand waarvan de ontwikkeling van het morfologisch modellensysteem (of -systemen) uitgewerkt kan worden. De achtergrond van deze praktijkgevallen is driedelig:

- Het Schelde-estuarium is een complex systeem. De invloed, c.q. effecten van diverse maatregelen op het morfologisch systeem zijn daarom niet, of niet eenvoudig te beredeneren. In zulke gevallen dient modelvorming uitkomst te brengen. De praktijkgevallen dienen dan ook de meerwaarde van een modelmatige benadering aan te tonen,
- Echter ook (numerieke) modellen kennen vele onnauwkeurigheden en onzekerheidsmarges. Het gebruik van morfologische modellen dient dus wel tot verbeteringen te leiden in de kwaliteit van de afschatting van bovengenoemde invloed en effecten. In het bijzonder wordt van een modelmatige benadering gevraagd dat de onzekerheidsmarges verkleind worden,
- Tenslotte is het van belang de in het verleden gegeven adviezen voor een bepaalde beheersstrategie te evalueren, en om, door middel van de hieronder beschreven hindcaststudies, na te gaan of de destijds gegeven adviezen voor die beheersstrategie anders zouden zijn als een ander gereedschap (lees morfologische modellen) zou zijn toegepast.

Praktijkgeval I: Gedrag drempelgebieden

Beheersvraag

Enige tijd geleden speelde de vraag of het mogelijk is om het Straatje van Willem in het Drempelgebied van de Everingen bevaarbaar te houden met behulp van zandwinning? De beheerder heeft behoefte aan gereedschap om de effecten en efficiëntie van ingrepen in dergelijke vaargeulen, die als nevenvaarwater worden gebruikt, te kunnen voorspellen op een termijn van twee tot vier jaar.

Achtergrond van de beheersvraag

Vanuit veiligheids- en efficiëntie-overwegingen wil men de vaarwegen voor de zee- en binnenvaart (zowel beroeps- als pleziervaart) zoveel mogelijk scheiden. De binnenvaart tussen het Kanaal door Zuid-Beveland en Vlissingen vindt bij voorkeur plaats door de kortsluitgeulen in het Drempelgebied van de Everingen. De vaarwegbeheerder (i.e. Directie Zeeland) wordt regelmatig gevraagd of het mogelijk is daartoe dergelijke kortsluitgeulen bevaarbaar te houden door middel van baggerwerkzaamheden, c.q. zandwinning.

Uit de praktijk blijkt echter dat het bevaarbaar houden van deze kortsluitgeulen grote inspanningen vraagt omdat het gebied zeer dynamisch is. In het verleden heeft men bijvoorbeeld gepoogd om het Straatje van Willem bevaarbaar te houden. Het is echter niet gelukt om het natuurlijke degeneratieproces van die geul tot staan te brengen.

Omdat de vraag naar het bevaarbaar maken/houden van kortsluitgeulen steeds terugkomt, is de vraag gerezen of de (bekende) ontwikkeling van het Straatje van Willem niet gebruikt

kan worden om het morfologisch modelinstrumentarium te toetsen door middel van een hindcast-studie. Hierbij dient rekening gehouden te worden met:

- De kortsluitgeulen ontwikkelen zich op een tijdschaal van ca. een decennium, waarbij grote hoeveelheden zand worden verplaatst. Het bevaarbaar houden van een degenerende kortsluitgeul vraagt dus om een enorme baggerinspanning,
- Door de grote migratiesnelheden van de kortsluitgeulen (tot 100 m/jr) is ook het actueel houden van de betonning van de vaargeul kostbaar.

Potentiële beheersmaatregelen

De beheerder heeft in principe een aantal maatregelen tot haar beschikking om kortsluitgeulen, zoals het Straatje van Willem bevaarbaar te houden:

- Baggeren, c.q. zandwinning om de vaarweg op een diepte van 4.5 m onder GLWS bij een breedte van ca. 150 m te handhaven,
- Vaarwegbakening door flexibele betonning,
- Instandhouden van een andere geul door het Drempelgebied van de Everingen, en
- Het aanleggen van geleidedammen - deze maatregel is echter in strijd met de beheersfilosofie om harde constructies in het estuarium zoveel mogelijk te vermijden.

Generieke aspecten van de beheersvraag

Deze beheersvraag, dat wil zeggen de hindcast-oefening, is generiek omdat aanpak en oplossing van de vragen ook toepasbaar zijn op vragen naar de bevaarbaarheid andere kortsluitgeulen, zoals het Geultje van Baarland en de ontwikkeling van de Zuid-Everingen. Op een wat hoger abstractieniveau heeft de beheersvraag betrekking op de ontwikkeling van dynamische drempelgebieden in het algemeen, en van het Drempelgebied van de Everingen in het bijzonder. Relevante aspecten die hierbij een rol spelen zijn:

- De cycliciteit van de dynamiek van het drempelgebied en de daarbij behorende tijdschalen,
- Het ontstaan, migreren en weer verdwijnen van geulen,
- De ontwikkeling van geulpatronen.

Functionaliteit van het morfologisch model

Bovenstaande beheersvragen impliceren dat het te ontwikkelen morfologisch model ten minste de volgende functionaliteit dient te hebben:

- Het model dient de sedimentbalans van een drempelgebied en haar eventuele veranderingen in de tijd (functie-veranderingen) adequaat te kunnen weergeven, zodat een schatting van eventuele baggerinspanningen verkregen kan worden,
- Het model dient de cycliciteit, inclusief haar periode (morfologische tijdschaal) van de patronen in een drempelgebied te kunnen voorspellen (dus niet de exacte ligging van die geulen), zodat de potentie van zo'n drempelgebied als nevenvaarwater geëvalueerd kan worden,
- Het model dient de autonome ontwikkeling van een drempelgebied, uitgaande van een bepaalde, bestaande beginsituatie over een periode van 2 tot 4 jaar te kunnen voorspellen (dus de sedimentatie- en erosiepatronen), zodat bepaald kan worden of, en zo ja tegen welke baggerinspanning, de kortsluitgeul bevaarbaar gehouden kan worden, en
- Het model dient de effecten van ingrepen in een drempelgebied, uitgaande van een bepaalde, bestaande beginsituatie over een periode van 2 tot 4 jaar te kunnen voorspellen (dus de sedimentatie- en erosiepatronen), om te bepalen of dergelijke ingrepen de

ontwikkeling van het gebied beïnvloeden, en zo ja of die beïnvloeding leidt tot veranderingen in de noodzakelijke baggervolumina om de kortsluitgeul bevaarbaar te houden.

Beschikbare gegevens

Er zijn veel gegevens beschikbaar:

- Regelmatige lodingen en bodemkaarten van het gebied,
- Gegevens over volumina zandwinning en baggeren en storten, en
- Incidenteel debietmetingen over diverse raaien.

Praktijkgeval 2: Onderhoudsbaggerwerk

Beheersvraag

Hoeveel onderhoudsbaggerwerk is er de komende vijf jaar te verwachten na de laatste (1997/98) verdieping van de vaargeul in het gehele estuarium, en waar kan de baggerspecie zo optimaal mogelijk gestort worden?

Achtergrond van de beheersvraag

Voorafgaand aan de uitvoering van de laatste verdieping van de vaargeul in 1997/98 en de vaarwegverruiming van 1998/2000 is een voorspelling gemaakt van de te verwachten hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk. Hierbij is uitgegaan van de nieuwe stortstrategie, dat wil zeggen baggeren en zandwinning in het oostelijk en storten in het westelijk del van het estuarium. Het voorspelde volume t.g.v. 14 Mm^3 per jaar blijkt ca. 40 % groter dan de huidige realiteit t.g.v. ca. 10 Mm^3 per jaar.

Een goede schatting van het onderhoudsbaggerwerk is van belang voor het afgeven van vergunningen en voor de planning van stort-, zandwin- en baggerwerkzaamheden. Bovendien is het huidige baggeronderhoud vrijwel gelijk aan het baggeronderhoud na de verdieping van 1970-75, hetgeen bevreesd oproept:

- Vlak voor de verdieping van 1997/98 is ook een andere stortstrategie in gang gezet: er wordt veel meer zand, gebaggerd in het oosten van het estuarium, gestort in het westen van het estuarium; het retourtransport, dus het baggervolume is uiteraard een functie van de afstand van de stortlocaties tot de baggerlocaties.
- Is er sprake van een inschakelverschijnsel, met andere woorden, moet het retourtransport van sediment van de stortlocaties naar de baggerlocaties nog op gang komen?
- Is het estuarium zand-exporterend geworden - m.a.w. verliezen we zand?
- Hoe nauwkeurig is de 14 Mm^3 -schatting; fouten t.g.v. ca. 40 % in aanzandingshoeveelheden zijn wat aan de grote kant, doch niet niet extreem en liggen in de buurt van de nauwkeurigheids grenzen van de huidige sedimenttransportmodellen.

Potentiële beheersmaatregelen

De beheerder heeft twee beheersmaatregelen om het baggeronderhoud te beïnvloeden bij de gegeven, c.q. gewenste vaarwegdiepte:

- De stortstrategie heeft directe invloed op het baggeronderhoud, immers het retourtransport van sediment van stortlocatie naar baggerlocatie is een functie van de afstand tussen die twee locaties. De stortstrategie kan geoptimaliseerd worden met behulp van ESTMORF en het Cellenconcept,

- De bagger- en stortstrategie kan geïntegreerd worden met het zandwinbeleid.

Generieke aspecten van de beheersvraag

Deze beheersvraag is generiek omdat:

- Aanpak en oplossing van de vragen ook toepasbaar zijn op vragen naar de effecten van een verdere verdieping,
- Beantwoording van deze vraag leidt tot de ontwikkeling van een instrumentarium waarmee ook de grootschalige autonome ontwikkeling van het estuarium bestudeerd kan worden.

Functionaliteit van het morfologisch model

Bovenstaande beheersvragen impliceren, dat het te ontwikkelen morfologisch model ten minste de volgende functionaliteit dient te hebben:

- Het model dient het gehele estuarium te omvatten, dus inclusief (een deel van) de Beneden Zeeschelde en de voordelta, omdat de overall zandbalans en de sedimentuitwisseling tussen de voordelta en het estuarium cruciale parameters zijn bij het opstellen van een duurzaam beheersplan van het estuarium,
- Het model dient de morfologische veranderingen en de daarbij behorende sedimenttransporten over een periode van ca. 5 tot 10 jaar goed te voorspellen, zowel voor wat betreft de autonome ontwikkelingen als de effecten van menselijke ingrepen (baggeren, storten en zandwinning); deze eis impliceert in feite mede dat het baggeronderhoud goed voorspeld dient te kunnen worden,
- Het modelinstrumentarium dient in staat te zijn diverse bagger- en stortscenario's te evalueren en te optimaliseren tot op het detailniveau van bagger- en stortvakken, dat wil zeggen op een schaal van enkele honderden meters, zodat het onderhoudswerk geminimaliseerd kan worden.

Beschikbare gegevens

Er zijn veel gegevens beschikbaar:

- Regelmatige lodingen en bodemkaarten van het gebied,
- Gegevens over volumina zandwinning en baggeren en storten,
- Incidenteel debietmetingen over diverse raaien, en
- Rapportage van het Drempelonderzoek.

5 Programma van eisen morfodynamisch model

Uit de hoofdstukken 3 en 4 kan een programma van eisen worden geformuleerd voor het te ontwikkelen morfologisch modelinstrumentarium. Bij deze formulering wordt nog geen keuze gemaakt of dit instrumentarium uit één of meerdere numerieke modellen bestaat. De ordening van de eisen is gebaseerd op de relevante schaalgroottes, i.e. van groot naar klein, en doet geen uitspraken over een eventuele prioritering.

- a) Het modelinstrumentarium dient het gehele estuarium en de rivieren te omvatten, dus inclusief (een deel van) de Beneden Zeeschelde en de Voordelta, omdat de overal zandbalans en de sedimentuitwisseling tussen de voordelta en het estuarium cruciale parameters zijn bij het opstellen van plannen voor het duurzaam beheer van het estuarium,
- b) Het modelinstrumentarium dient de primaire lokale en globale morfologische veranderingen en de daarbij behorende sedimenttransporten over een periode van ca. 5 tot 10 jaar goed te voorspellen, zowel voor wat betreft de autonome ontwikkelingen als de effecten van menselijke ingrepen (baggeren, storten en zandwinning); deze eis impliceert in feite mede dat het baggeronderhoud goed voorspeld dient te kunnen worden,
- c) Het modelinstrumentarium dient in staat te zijn diverse bagger- en stortscenario's te evalueren en te optimaliseren op het niveau van het gehele estuarium tot op het detailniveau van bagger- en stortvakken, dat wil zeggen op een schaal van enkele honderden meters, zodat het onderhoudswerk geminimaliseerd kan worden.
- d) Het modelinstrumentarium dient de effecten van zandwinning te kunnen voorspellen, alsmede de wisselwerking tussen zandwinning en baggerwerkzaamheden (baggeren en storten),
- e) Het modelinstrumentarium dient de effecten van het eventueel herstellen van de verbinding Ooster- en Westerschelde (herstel Kreekrak) voor het Schelde estuarium te kunnen voorspellen,
- f) Het modelinstrumentarium dient de sedimentbalans van een drempelgebied en haar eventuele veranderingen in de tijd (functie-veranderingen) adequaat te kunnen weergeven, zodat een schatting van eventuele baggerinspanningen verkregen kan worden,
- g) Het modelinstrumentarium dient de cycliciteit, inclusief haar periode (morfologische tijdschaal) van de patronen in een drempelgebied te kunnen voorspellen (dus niet de exacte ligging van die geulen), zodat de potentie van zo'n drempelgebied als nevenvaarwater geëvalueerd kan worden,
- h) Het modelinstrumentarium dient de autonome ontwikkeling van een drempelgebied, uitgaande van een bepaalde, bestaande beginsituatie over een periode van 2 tot 4 jaar te kunnen voorspellen (dus de sedimentatie- en erosiepatronen), zodat bepaald kan worden of, en zo ja tegen welke baggerinspanning, de kortsluitgeul bevaarbaar gehouden kan worden, en

- i) Het modelinstrumentarium dient de effecten van ingrepen in een drempelgebied, uitgaande van een bepaalde, bestaande beginsituatie over een periode van 2 tot 4 jaar te kunnen voorspellen (dus de sedimentatie- en erosiepatronen), om te bepalen of dergelijke ingrepen de ontwikkeling van het gebied beïnvloeden, en zo ja of die beïnvloeding leidt tot veranderingen in de noodzakelijke baggervolumina om de kortsluitgeul bevaarbaar te houden.

Het bovenstaande overzicht heeft betrekking op het beheer van het systeem op korte en middellange termijn. Voor het beheer en beleid van het estuarium is het echter ook nodig om inzicht te hebben in de effecten van de autonome processen en menselijk ingrijpen op de ontwikkeling op lange termijn. In het bijzonder spelen twee grootschalige ontwikkelingen een rol die invloed hebben op de eisen voor modelontwikkeling, c.q. kennisontwikkeling:

- j) Momenteel wordt verondersteld dat het estuarium zich min of meer in een dynamisch evenwicht bevindt. Het is echter zeer wel mogelijk dat ten gevolge van natuurlijke verlandingsprocessen en/of onfortuinlijk beheer (stortstrategie) het systeem zich ontwikkelt tot een ééngenueinstelsel, dan wel dat het systeem door natuurlijke ontwikkelingen (zeespiegelrijzing) en/of onfortuinlijk beheer (bagger- en stortstrategie, c.q. zandwinning) verdrinkt, dat wil zeggen dat de intergetijdegebieden permanent onder water komen. Het modelinstrumentarium zou dergelijke ontwikkelingen moeten kunnen voorspellen,
- k) Direct hiermee samenhangend, doch op kleinere schaal, is de dynamiek van het geulensysteem, het ontstaan en weer verdwijnen van geulen en het aantal geulen van belang. Ook deze ontwikkelingen dienen met het modelinstrumentarium voorspeld moeten kunnen worden.

Een belangrijke taak die indirect met de modelontwikkeling te maken heeft is het vaststellen van toetsingscriteria of indicatoren. Zulke criteria dienen enerzijds om t.z.t. de modelresultaten te kunnen vergelijken met de waargenomen ontwikkelingen, anderzijds om de waargenomen ontwikkelingen zelf te interpreteren in het licht van gewenste, c.q. ongewenste ontwikkelingen.

De volgende parameters komen in aanmerking als criteria of indicatoren:

- 1) De amplitude, en in belangrijker mate de fase van het M_4 -getij. De fase van het M_4 -getij bepaalt de richting van het residuele zandtransport. Deze component maakt gedeeltelijk onderdeel uit van het getij op open zee (dus op de rand van het modelinstrumentarium) en wordt voor een belangrijk deel in het estuarium zelf opgewekt door niet-lineaire processen (advectie, bodemwrijving). De M_4 -component is daarom gevoelig voor de bathymetrie van het estuarium (zie o.a. Wang et al., 1999)
- 2) Kenmerkend voor het Schelde-estuarium is de dynamiek van het systeem, met name die van de kortsluitgeulen in de drempelgebieden. Kwantificering van deze dynamiek is niet eenvoudig (Stive et al., 1998, Jeuken, 2000 en WL, 2000), doch de aanpak van Jeuken biedt mogelijk aanknopingspunten. Een dimensieloze dynamiek parameter Ψ_D zou als volgt gedefinieerd kunnen worden:

$$\Psi_D = dV/Q_i T$$

waarin dV de netto absolute volume veranderingen in een gebied zijn (dus bijvoorbeeld de migratie van geulen) en Q_i en T het bruto sedimenttransport over een karakteristieke

tijdschaal T (bijvoorbeeld de springtij-doortijcyclus). Een grote waarde van Ψ_D impliceert dus een sterk dynamisch systeem.

- 3) Het areaal aan intergetijdegebieden is een parameter met name van belang voor de ecologie en biologie. De voorspelbaarheid van de fijnste details van dit areaal is mede een functie van het gebruikte instrumentarium en de nauwkeurigheid waarmee het model is gecalibreerd.

6 Het huidige instrumentarium

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de beschikbare *morfologische* modellen. Typische kustlijnmodellen, zoals UNIBEST en PONTOS, worden buiten beschouwing gelaten. De waterbeweging in deze modellen wordt voornamelijk bepaald door golfgedreven stroming, hetgeen voor de Westerschelde van ondergeschikte betekenis is.

Bestaande morfologische modellen, die mogelijk wel voor de Westerschelde ingezet kunnen worden, behoren tot één van de volgende hoofdgroepen:

- *Procesmodellen*, waarin de (complexe) waterbeweging voornamelijk door (getij)stroming wordt bepaald (DELFT3D-MOR);
- *Extrapolatie van procesgestuurde modellen* (RAM-module in DELFT3D-MOR);
- *Dynamisch-empirische modellen* (ook wel hybride of gedrags-georiënteerde modellen genoemd), gebaseerd op empirische evenwichtsrelaties (ASMITA, ESTMORF);
- *Geïdealiseerde modellen*, waarmee (na vereenvoudigingen van de basisvergelijkingen) analytische oplossingen gevonden kunnen worden.

Achtereenvolgens zal een beknopte beschrijving worden gegeven van de basisprincipes, calibraties cq. toepassingen van de modellen. In dit hoofdstuk is daarvoor met name gebruik gemaakt van de notitie:

- *Long-term morphodynamic modelling. An intercomparison of different approaches* (Aarninkhof en Roelvink, 1999),
en het verslag:
- *Vergelijking van bestaande Lange-Termijn Morfologische modellen. Mogelijkheden en beperkingen in gebruik en visie op ontwikkeling lange-termijn modellering* (Eysink, Walstra en Stive, 2001).

6.1 DELFT3D-MOR / DELFT2D-MOR

Beschrijving

DELFT3D-MOR vormt onderdeel van het DELFT3D model systeem, dat is opgezet voor de simulatie van golfvoortplanting, waterstanden en stroomsnelheden, sedimenttransport, morfologische veranderingen en waterkwaliteitsaspecten in kust-, rivier- en estuarine gebieden. Een stuurmodule verzorgt de onderlinge communicatie tussen de processen. Met DELFT3D-MOR kan de morfologische ontwikkeling van estuaria, getijdebekkens en rivier delta's worden gesimuleerd, mogelijk gekarakteriseerd door de aanwezigheid van intergetijde gebieden en geulen en de invloed van menselijke ingrepen (constructies, landaanwinning, storten en baggeren).

Het golfmodel was voorheen gebaseerd op HISWA, maar recent is dit vervangen door het meer geavanceerde SWAN. Hiermee kunnen effecten als 'shoaling', refractie, dissipatie door bodemwrijving en golfbreking worden gesimuleerd. Het stromingsmodel TRISULA geeft een

oplossing van de ondiepwatervergelijkingen op een kromlijng rekenrooster, waarbij het mogelijk is lokaal de ruimtelijke resolutie te verfijnen. Het sedimenttransportmodel staat toe en keuze te maken uit een aantal formuleringen voor de evenwichtstransporten (van Rijn, Bijker, Soulsby-van Rijn).

Tijdens morfologische simulaties wordt de bodem iedere morfologische tijdstap aangepast. Dit gebeurt op basis van het berekende, residuele transportenveld voor de op dat moment aanwezige bodem. Binnen de morfologische tijdstap wordt een continuïteitscorrectie uitgevoerd, d.w.z. voor (kleine) bodemveranderingen worden lokaal snelheden aangepast onder de aanname dat het lokale debiet niet verandert.

In het verleden uitgevoerde morfologische studies betroffen simulaties van diepte-gemiddelde grootheden (snelheden transporten) en resulterende bodemveranderingen met DELFT2D-MOR. Momenteel is de programma-code voor de hydrodynamica 3D gereed en worden morfologische simulaties uitgevoerd onder de naam DELFT3D-MOR. Binnen dit systeem kan worden gekozen voor een twee-dimensionale (diepte-gemiddelde) benadering dan wel een quasi-3D aanpak. Deze laatste vormt een uitbreiding om drie-dimensionale effecten geparameteriseerd mee te nemen:

- de verticale variatie van de snelheden en sedimentconcentraties worden middels vooraf te bepalen coëfficiënten in de advectie-diffusie vergelijking meegenomen (methode volgens Galappatti);
- het effect van secundaire stroming t.g.v. Coriolis en in bochten op de snelheid in dwars- en in langsrichting wordt meegenomen. De invloed van de secundaire stroming in de langsrichting is nog niet geïmplementeerd in de operationele versie van DELFT3D-MOR.

Toepassingen

De eerste grootschalige morfologische toepassing van DELFT3D-MOR, met terugkoppeling van bodemveranderingen op de hydrodynamica, is uitgevoerd door Steijn (1996). Het betrof 2D simulaties voor verschillende Maasvlakte-2 varianten over een periode van 5 jaar. Geconcludeerd werd dat resultaten in relatieve zin geïnterpreteerd dienen, d.w.z. t.o.v. een referentiesituatie, en niet in absolute zin. Dit werd bevestigd in een andere studie (Steijn, 1997b), waar werd geconstateerd dat transport patronen in kwalitatieve zin correct waren maar dat tijdschalen sterk onderschat werden. In de eerstgenoemde studie werd eveneens waargenomen, dat na 5 jaar het systeem nog ver verwijderd was van een evenwichtssituatie. Gegeven de grote rekeninspanning is het twijfelachtig of op deze wijze lange simulatieperioden kunnen worden gesimuleerd.

Van Holland (1997) beschrijft een uitgebreide studie met DELFT3D-MOR (2D) voor de monding van het Haringvliet, met inbegrip van gedetailleerde gevoeligheidsberekeningen voor verschillende modelparameters. De modelresultaten blijken erg gevoelig voor de korreldiameter; de aanname van een uniforme korrelgrootte leidt tot lokale afwijkingen, met name in getijdegeulen en rondom platen.

Een meer kwantitatieve analyse werd uitgevoerd door Groenewoud (1997), die met DELFT3D-MOR (2D) diverse baggerscenario's in het Schelde-estuarium onderzocht over een

tijdsperiode van 1 jaar. Verschillen tussen gemeten en berekende bodemveranderingen bedroegen slechts 10-50%.

Jeuken (2000) heeft met de quasi-3D aanpak van DELFT3D-MOR het morfologisch gedrag van kortsluitgeulen in de bochtgroep van Terneuzen gesimuleerd. Geconcludeerd werd dat het model redelijk in staat is het erosie- en sedimentatiepatroon te reproduceren. Echter, de berekende geulmigratie is te klein, terwijl de berekende bodemveranderingen van de drempels te groot bleken (factor 2-6). Verondersteld wordt dat de verschillen worden veroorzaakt door het onterecht aannemen van een logaritmisch snelheidsprofiel.

6.2 DELFT3D-FLOW

Beschrijving

Een uitbreiding naar 3D-modellering van sedimenttransport is uitgevoerd binnen DELFT3D-FLOW (Lesser, 2000). In dit geval worden voor iedere rekentijdstap (d.w.z. on-line) de sedimenttransporten en de resulterende bodemveranderingen berekend. Een terugkoppeling vindt plaats van de concentratie (via de dichtheid) op de turbulentie. Stroming t.g.v. dichtheidsverschillen worden aldus impliciet meegenomen. Het model kan onderscheid maken tussen meerdere zandfracties. Een verdere uitbreiding is uitgevoerd door van Ledden (2001). Naast de zandfracties wordt ook een slibfractie onderscheiden en middels een bodemmodule kan de samenstelling van het bed worden berekend. Omdat voor iedere rekentijdstap zowel de waterbeweging als de sedimenttransporten en de bodemveranderingen worden uitgerekend is het model rekenintensief en zijn langdurige simulaties nog niet haalbaar.

Toepassing

De tot dusverre enige toepassing met DELFT3D-FLOW (3D) is uitgevoerd door Thoolen (2000) voor de drempel van Hansweert. De simulaties werden uitgevoerd voor een periode van 1 maand en berekeningsresultaten werden vergeleken met de uitkomsten van een quasi-3D benadering en met metingen. De quasi-3D en 3D resultaten tonen grote overeenkomsten; desondanks kunnen lokaal verschillen in de berekende bodemveranderingen van ± 1 m optreden (vermoedelijk door het ontbreken van een formulering voor de secundaire stroming in langsrichting in de quasi-3D versie). Verder bleek dat het al dan niet meenemen van zout in de berekeningen na 1 maand eveneens tot verschillen in de bodemveranderingen leidt van ± 1 m. Berekeningen met 5 of 10 lagen in het 3D model resulteert in verschillen van $\pm 0,5$ m. De quasi-3D en 3D resultaten verschillen onderling minder dan de metingen en de berekeningen. Geconcludeerd wordt dat het quasi-3 model geschikt en praktisch is om morfologische berekeningen voor de Westerschelde mee uit te voeren. Wel dient de quasi-3D parameterisatie van de secundaire stroming te worden verbeterd.

6.3 DELFT3D-RAM

Beschrijving

DELFT3D-RAM (RAM: Rapid Assessment of Morphology) is een geparameteriseerde uitbreiding van DELFT3D-MOR. Het is ontwikkeld om de proces-gebaseerde modellering uit te breiden tot tijdschalen van decaden. Vooralsnog betreft het hier alleen de dieptegemiddelde (2D) modellering. Het principe achter RAM is, dat wordt aangenomen dat de lokale debieten en de golfhogten in elke getijfase gedurende het hele morfologische aanpassingsproces niet veranderen. (stroombanen blijven gelijk en alleen de stroomsnelheid en de orbitaalsnelheid bij de bodem verandert met veranderende waterdiepte). Er is op elke plaats dan een directe relatie tussen waterdiepte, stroomsnelheid en orbitaalsnelheid bij de bodem. Hierdoor kan in elk rekenpunt het sedimenttransport volgens de uitgebreide rekenmethode via datafitting wordt benaderd door een eenvoudige relatie met de waterdiepte. Deze methode vergt weinig rekentijd, waardoor morfologische veranderingen over een lange periode met redelijke nauwkeurigheid kunnen worden bepaald. Pas als de bodemveranderingen groot zijn geworden, is het noodzakelijk een nieuwe hydrodynamische simulatie uit te voeren. De beschikbaarheid van een betrouwbaar, initieel transportveld is cruciaal voor een succesvolle toepassing van DELFT3D-RAM.

↓ input

Toepassingen

Een eerste toepassing van DELFT3D-RAM betrof de simulatie van de morfologische veranderingen t.g.v. de verlenging van de havenhoofden van IJmuiden in de periode 1962-1968. Voor de kop van het langste havenhoofd ontstond een diepe ontgrondingskuil en tegelijkertijd groeide aan beide zijden van de havenhoofden de kust sterk aan. Met het model zijn de belangrijkste ontwikkelingen in de eerste 8 jaar na de bouw nagerekend met zowel DELFT3D-MOR als DELFT3D-RAM (Roelvink et al., 1998). Uit de resultaten van het onderzoek bleek dat DELFT3D-RAM een goede benadering gaf van de resultaten met DELFT3D-MOR over een periode van 5 jaar en zeer geschikt is om de ontwikkelingen over een langere periode te benaderen. In het algemeen kan met de operationele versies van beide modellen een redelijk beeld van de morfologische ontwikkelingen worden verkregen, met name wat betreft de ontwikkeling van de erosiekuil, dat met enige interpretatie in veel gevallen voldoende is. Beide modellen geven echter een te geringe diepte in de erosiekuil en een te brede uitgroei van de kust door beperkingen in modellering (geen turbulentie-effect in de waterbeweging en geen afzetting van zand op het strand boven de waterlijn). De berekeningen inclusief het effect van de golfgedreven stroom langs de kust met DELFT3D-MOR gaven de beste resultaten van de ontwikkelingen langs de kust. De schematisatie in het RAM-module geeft hier (nog) wat kwaliteitsverlies.

Resultaten van simulaties met DELFT3D-RAM (2D) voor de buiten-delta's van de Oosterschelde en de Grevelingen worden gegeven door Roelvink et al (2001) en Jeuken et al (2000). Het morfologische model is gecalibreerd voor de periode 1960-1980 en geverifieerd voor de periode 1980-1996, na de voltooiing van de Oosterschelde-dam. Het model bleek in staat grootschalige morfologische veranderingen (geulenpatroon, ontstaan

van een kortsluitgeul) te kunnen reproduceren over een periode van 20 jaar. Tekortkomingen zijn waarschijnlijk het gevolg van de schematisatie van het golfklimaat. Bij een frequentere 'update' van de hydrodynamica blijken de resultaten van DELFT3D-RAM te convergeren naar die van DELFT3D-MOR. Een aanpassing van de hydrodynamica elke 0,5-1 jaar geeft goede resultaten.

In Morfologisch Onderzoek Maasvlakte 2 (Steijn et al, 2000) is een combinatie gebruikt van MOR (initiële transporten tgv getij alleen) en RAM, waarbij elk jaar de door RAM berekende bodem is teruggekoppeld naar MOR. Op die manier werd een stabiele ontwikkeling verkregen die weinig zal afwijken van een volledige MOR berekening. De berekening is nog steeds betrekkelijk goedkoop. De in het rapport beschreven sommen zijn voor getij alleen.

In Steijn et al (2001) worden de resultaten van berekeningen met DELFT3D-RAM (2D) voor de monding van het Haringvliet gepresenteerd. Uitgaande van de 1970-bodem is het jaarlijks zandtransportpatroon berekend, uitgaande van een gewogen set van 11 hydraulische (golf-)randvoorwaarden. Met DELFT3D-RAM is vervolgens een simulatie van 1 jaar uitgevoerd, waarna met de verkregen bodem een nieuwe DELFT3D-MOR simulatie is gemaakt. Deze cyclus is herhaald over de periode 1970-1986. De veranderingen in de arealen, zoals deze uit de beschikbare bodemkaarten waren afgeleid, konden redelijk met het morfologische model worden gereproduceerd. Dit betrof in hoofdzaak de diepere zones (beneden -3 m NAP), maar ook veranderingen in de dieptezone +1 m/-3 m NAP werden redelijk gereproduceerd. Het model bleek niet goed in staat om de veranderingen in de arealen van de hogere dieptezones (boven GHW) te reproduceren.

DELFT3D-RAM is recent toegepast in de studie naar de morfologische effecten van een vliegveld in zee (MARE, 2001). Het model is gecalibreerd op basis van (jaarlijkse veranderingen van) het zandvolume tussen twee hoogteniveau's langs de Hollandse kust voor de periode 1972-1980. Op deze wijze werd een redelijke, kwalitatieve overeenkomst gevonden tussen metingen en berekeningsresultaten. Ook de berekende bodemveranderingen voor de buitendelta van het Marsdiep gaven in kwalitatieve zin dezelfde trends aan als de metingen, ondanks dat het model niet speciaal was opgezet voor de reproductie van de bodemveranderingen ter plaatse. In kwantitatieve zin mag daarom geen waarde worden gehecht aan de uitkomsten.

6.4 ESTMORF

Beschrijving

ESTMORF is ontwikkeld door Rijkswaterstaat / RIKZ en WL | DELFT HYDRAULICS om de lange-termijn (decennia) morfologische ontwikkeling van estuaria en getijdebekken onder invloed van natuurlijke processen en menselijke ingrepen te voorspellen. Het model is in het begin van de 90-er jaren opgezet voor de Westerschelde, maar inmiddels ook toegepast voor andere gebieden, zoals: het Friesche Zeegat, Southampton Water, de Humber, het Noordelijk Deltabekken en de Yangtze. Daarnaast is het model geïmplementeerd in de ecomorfologische module van het 'Estuarine Decision Support System' (EDSS), zoals

opgezet binnen het LWI-project, en toegepast op de Westerschelde. In een recent verschenen verslag wordt overzichts gegeven van de ontwikkeling van ESTMORF en uitgevoerde toepassingen (Wang en van Helvert, 2001).

ESTMORF is een dynamisch-empirisch model en combineert de voordelen van procesmodellen met die van empirische modellen, d.w.z. fysische wetmatigheden worden gebruikt in samenhang met empirische relaties. Als hydrodynamisch model wordt een één-dimensionaal netwerk model voor getijstroming gebruikt. Momenteel zijn hiervoor beschikbaar IMPLIC en SOBEK. De toegepaste morfologische formuleringen betreffen het lange-termijn-gemiddelde evenwichtsconcentratie concept volgens Di Silvio (1989) en evenwichtsrelaties voor zowel geulen als platen. De omvang van geulen (dwarsprofiel) en platen (hoogte en oppervlak) is gerelateerd aan de hoeveelheid water die getransporteerd wordt (lokaal getijvolume). Door menselijk ingrijpen of invloeden van buitenaf (zeespiegelrijzing) verandert de getransporteerde hoeveelheid water en dus ook de omvang van de geulen en de platen. In een rekenstap in ESTMORF wordt eerst de waterbeweging berekend. Uit de waterbeweging wordt voor elke geulsectie het getijvolume, het gemiddeld zeeniveau en de getijslag bepaald, welke worden gerelateerd aan evenwichtsomvang van de geul en de aangrenzende plaat. Het verschil tussen de evenwichtsomvang en de actuele omvang wordt vertaald in de morfologische veranderingen. De morfologische veranderingen geven een nieuwe bathymetrie en dus een nieuwe waterbeweging, welke weer worden bepaald in de volgende rekenstap.

ESTMORF onderscheidt geulen, lage platen (tussen GLW en GW) en hoge platen (tussen GW en GHW) in de buitendelta en de vloedkom(men) van een zeegat en kan hierdoor een vrij gedetailleerde voorspelling doen van effecten van verstoringen in dit systeem. Effecten als zeespiegelstijging, getijslagverandering en bodemdaling kunnen worden meegenomen in de berekeningen. Tevens kunnen bagger- en storthoeveelheden worden gespecificeerd alsmede volumina gerelateerd aan zandwinning. Voor het simuleren van toekomstige scenario's zijn de te baggeren en storten hoeveelheden nog onbekend. Daarom is binnen ESTMORF een nieuwe functionaliteit ontwikkeld, waarmee het mogelijk is de vereiste baggerhoeveelheden uit te rekenen op basis van gegevens m.b.t. vereiste diepte, potentiële stortlokties, de baggercapaciteit en de overdiepte tijdens baggeren.

Resultaten van ESTMORF zijn vergeleken met de uitkomsten van een procesmodel en een geïdealiseerd model. Hieruit blijkt dat de morfologische ontwikkelingen, zoals aangegeven door deze modellen, in hoge mate gelijksoortig zijn.

Toepassingen

Van het ESTMORF model voor de Westerschelde zijn momenteel twee versies beschikbaar. De eerste versie gebruikt IMPLIC als stromingsmodel en alle toepassingen van voor 1998 zijn hiermee uitgevoerd. De benedenstroomse rand is gelegen bij Vlissingen. Het model is gecalibreerd op basis van waarnemingen sinds 1968, toen begonnen is met de verdieping van de vaargeul. Verondersteld is dat de Westerschelde voor 1968 in een (dynamisch) evenwicht verkeerde. De veranderingen in de geuldoorsneden konden goed worden gereproduceerd; voor de platen is de reproductiekwiteit minder. Voor de tweede versie is SOBEK gebruikt als stromingsmodel. Verder is het modelgebied uitgebreid tot Westkapelle,

d.i. incl. de ebdelta, en is de schematisatie van het Land van Saeftinge verbeterd. Deze versie is eveneens gecalibreerd, met eenzelfde nauwkeurigheid als de eerste versie. ESTMORF (de eerste versie) is o.a. ingezet binnen de projecten VERDIEP (effecten vaargeulverdieping), MOVE (monitoring van het effect van de vaargeulverdieping sinds 1997) en LTV (lange-termijn visie m.b.t. toegankelijkheid, veiligheid en natuurlijkheid).

Voor het Friesche Zeegat is ESTMORF redelijk succesvol ingezet, om over een periode van 20 jaar de morfologische veranderingen te reproduceren, die zijn opgetreden sinds de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Een lange-termijn morfologisch model, gebaseerd op ESTMORF, is opgezet, om het effect van een diepzee-terminal in Southampton Water (UK) op de morfologie van het gebied na te gaan. Voor de Humber (UK) is met ESTMORF een studie uitgevoerd, naar de morfologische effecten van een (hypothetisch) landaanwinning-project in combinatie met verschillende snelheden van de zeespiegelstijging. Voor het Yangtze-estuarium is ESTMORF opgezet als onderdeel van de Ecomorfologische module van het 'Estuarine Decision Support System'. Het doel van het project was de toepasbaarheid van het model aan te tonen; het model is gecalibreerd a.d.h.v. data over een periode van 10 jaar. Voor het Noordelijk Deltabekken is een test toepassing opgezet, om de potenties van het model dan wel de beperkingen en mogelijke problemen na te gaan. Vooralsnog zijn bemoedigende resultaten verkregen.

Samenvattend geldt dat ESTMORF de mogelijkheid biedt, morfologische simulaties uit te voeren over een periode van 50 jaar. Het model kan onderscheid maken tussen geulen en platen als morfologische eenheden; m.n. dit laatste maakt het model geschikt voor ecologische studies. Daarnaast kan het omgaan met bagger- en stortactiviteiten, baggerstrategieën optimaliseren en rekening houden met natuurlijke veranderingen, zoals zeespiegelstijging en variaties in getijslag. Beperkingen betreffen het vaste rekengrid, waardoor verplaatsingen, ontstaan en verdwijnen van geulen niet kan worden gesimuleerd. Het model rekent met één sedimentfractie en kan dus niet de bodemsamenstelling voorspellen.

6.5 ASMITA

Beschrijving

Het ASMITA-model (Aggregated Scale Morphological Interaction between a Tidal inlet system and the Adjacent coast) is specifiek ontwikkeld om de invloed van de zandvraag van een vloedkom van de Waddenzee op het gedrag van de Noordzeekust te kunnen bepalen. Het model bestaat in principe uit drie grote morfologische elementen, i.e. een vloedkom, de buitendelta en de aangrenzende zeekust. Elk van deze elementen wordt in de eerste plaats, direct of indirect, beïnvloed door de aan het getijprisma van de vloedkom gerelateerde stroming en in de tweede plaats door golfinvloed op de hydrodynamica. Het getijbassin wordt geschematiseerd tot één geul en één plaat. De elementen zijn als volgt te schematiseren:

- plaat: zandvolume tussen GLW en GHW (plaatoppervlak is constant, hoogte variabel);
- geul: watervolume beneden GLW (geuloppervlak is constant, diepte variabel);

- delta: zandvolume ten opzichte van een fictief kustprofiel, wat er zou zijn als er geen zeegat was (deltaoppervlak is constant, diepte variabel);
- kust: watervolume beneden GZN bestaande uit een kustvak met constante diepte (kustlijn variabel) en een zeevak met constant oppervlak (diepte variabel).

Voor elk element is een relatie bekend, die de gemiddelde evenwichtstoestand beschrijft zonder dynamische fluctuaties door storm of seizoen. In het model zijn alle relaties, voor zover nodig, omgerekend naar representatieve evenwichtsvolumes, die een functie van een karakteristieke hydrodynamische parameter (getijprisma, getijslag) zijn. De hydrodynamische parameters worden op eenvoudige wijze bepaald. ASMITA kan eenvoudig worden toegepast in samenhang met DELFT3D-MOR en DELFT3D-RAM.

Het sedimenttransport in ASMITA wordt beschreven door een diffusievergelijking voor gesuspendeerd sediment. In de evenwichtstoestand heeft elk element een constante concentratie: de *globale* evenwichtsconcentratie c_E . In het model is aangenomen dat de concentratie op de randen constant in de tijd is en gelijk aan de evenwichtsconcentratie. Een verstoring van een evenwichtsvolume (bijvoorbeeld een volume verkleining) leidt door lokale veranderingen in de stroomsnelheden tot transportgradiënten en dus tot uitwisseling van sediment, net zo lang totdat de transportgradiënten weer zijn verdwenen en het evenwicht weer is hersteld. Elk element heeft ook een *lokale* evenwichtsconcentratie c_L die wordt bepaald door de momentane lokale transportcapaciteit. De volume verandering van een element wordt bepaald door het verschil tussen de actuele en de lokale evenwichtsconcentratie. Als de actuele concentratie groter is dan de lokale evenwichtsconcentratie zal er bij een zandvolume aanzanding optreden en omgekeerd erosie.

De horizontale uitwisseling tussen twee elementen, bijvoorbeeld een geul en een plaat, wordt bepaald door het verschil in actuele concentraties. Bij uitwisseling tussen twee elementen, waarbij ook een netto advectioneel transport een rol speelt, kan de extra uitwisseling door het netto debiet ook in rekening worden gebracht.

Om het model beter te kunnen toepassen voor eilandkusten, is het uitgebreid met extra kustelementen. De veronderstelling is dat dicht bij het zeegat de evenwichtsconcentratie hoger is dan verder van het zeegat door verschil in invloed van het getij en de golven. Met het model kan ook de invloed van een zeespiegelstijging in rekening worden gebracht.

Toepassingen

ASMITA is voor het eerst toegepast in een integrale Bodemdalingen-studie Waddenzee voor de NAM (Eysink et al., 1998; NAM, 1998). In deze studie zijn de effecten van bodemdaling door gaswinning en van versnelde zeespiegelrijzing op het systeem van het Friesche Zeegat bestudeerd. Het model is afgeregeld op de dynamisch stabiele situatie vóór de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 en op de response van de verstoorde situatie ná afsluiting. Na het inregelen van het model zijn verschillende scenario's voor bodemdaling en versnelde zeespiegelrijzing, startend in het jaar 2000, doorgerekend.

Door Wang (1997) is ASMITA toegepast op de Westerschelde (6 secties) en de Voordelta (26 secties). De calibratie is uitgevoerd op basis van evenwichtsvolumina voor de vakken. De modelresultaten zijn vergeleken met data voor de periode 1970-1994, op basis waarvan is geconcludeerd dat het model voldoende is gecalibreerd. Aansluitend is een groot aantal scenario's gesimuleerd, naar de effecten van zeespiegelstijging, getijslagvergroting, bagger- en stortscenario's en zandwinning.

6.6 Geïdealiseerde modellen

Beschrijving

Geïdealiseerde modellen zijn gebaseerd op specifieke schematisaties; voor ieder ander probleem worden andere schalen gekozen en specifieke vereenvoudigingen en aannamen gedaan. De modellen zijn bedoeld om een bepaald verschijnsel te verklaren, maar ze zijn minder geschikt om een realistisch geval zo gedetailleerd mogelijk weer te geven. De geïdealiseerde modellen zijn analytisch van aard; vooral lineaire en niet-lineaire stabiliteitsanalyse wordt toegepast. Het voorspellen van de verandering van het aantal geulen, zal met geïdealiseerde modellen wellicht opgelost kunnen worden. De combinatie van geïdealiseerde modellen met bestaande procesmodellen kan wat dat betreft mogelijkheden bieden. Het CELLENCONCEPT (zie hierna) vormt in feite een kader, waarin procesmodellen (v.w.b. de kwantificering van sedimenttransporten) en geïdealiseerde modellen (stabiliteitsanalyse voor riviersplitsingen) gecombineerd worden.

Toepassingen

Voor de Westerschelde is door de Jong en Heemink (1995) het zgn. 1-taks model ontwikkeld met het oog op de mega-schaal dynamiek. Door Schuttelaars en de Swart (1996) is een lange-termijn één-dimensionaal morfologisch model voor een (kort) getijdebekken opgezet, dat de interactie tussen getijstroming, sediment transport en bodemveranderingen beschrijft. Voor de situatie met alleen een M_2 -getij volgt voor suspensief sediment dat een enkelvoudige en stabiele evenwichtsbodem ontstaat met een lineair verloop vanaf de mond naar het gesloten einde van het bekken. Voor sediment dat langs de bodem wordt getransporteerd wordt een horizontale bodem verkregen. Indien hogere harmonischen worden meegenomen, wordt de evenwichtsbodem voor suspensief transport convex of concaaf; voor bodemtransport is dit een lineair verlopende bodem met een eindige waterdiepte aan het eind van het bekken. Met hetzelfde model geven Schuttelaars en de Swart (1997) aan dat instabiel gedrag van bodemverstoringen ontstaat indien de breedte-diepte verhouding en de bodemwrijving voldoende groot worden. Meervoudige evenwichten en periodieke oplossingen met eindige amplitudes kunnen ontstaan. De karakteristieken van de periodieke oplossingen blijken overeenkomsten te vertonen met migrerende bodemvormen in getijgaten. Het voorkomen van meervoudige morfodynamische evenwichten van getijdebekkens met een grotere lengte wordt door hen verder beschreven in 'Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments' (te verschijnen in JGR Oceans) en specifiek voor de Westerschelde in (Schuttelaars, 1999). In de laatstgenoemde referentie wordt geconcludeerd dat ook voor langere getijdebekkens sprake is van een enkelvoudig evenwicht, indien geen externe 'overtides' (hogere harmonischen)

aanwezig zijn; voor bekkenlengtes groter dan een bepaalde lengteschaal bestaan echter geen evenwichten meer. Indien wel externe 'overtides' worden meegenomen, ontstaan andere evenwichten.

6.7 Cellenconcept

Beschrijving

Het CELLENCONCEPT is ontwikkeld voor het onderzoek 'Lange Termijn Visie Schelde-estuarium'. Met het concept worden de grenzen van de stortcapaciteit van de geulen in de Westerschelde bepaald, opdat het meergeulensysteem niet degenereert als gevolg van het storten (Winterwerp et al, 2000). Het CELLENCONCEPT maakt gebruik van het zogenaamde 10%-criterium: in ieder stelsel van twee parallelle geulen (een cel) kan netto 5-10% van de bruto sediment transportcapaciteit van die cel in één van beide geulen worden gestort, zonder dat deze geul, en dus het tweegeulensysteem, degenereert. Dit criterium is gebaseerd op een stabiliteitsanalyse, zoals die kan worden uitgevoerd voor riviersplitsingen. De stabiliteit hiervan wordt bepaald door de verdeling van het sedimenttransport als gevolg van drie-dimensionale stromingsverschijnselen. In 1D-modellen wordt dit gemodelleerd met een zgn. knooppuntrelatie, waarbij de verhouding van de sedimenttransporten door beide geulen wordt bepaald door de breedte van en het debiet door de geulen. Als onderdeel van het CELLENCONCEPT zijn de vergelijkingen voor de analyse uitgebreid met bron- en putwerkingen voor het storten en baggeren en is tevens de interactie tussen geulen en platen vereenvoudigd gemodelleerd. De basis-hypothese is, dat het meergeulensysteem gehandhaaft blijft zolang de macro-cellen in stand blijven.

De huidige uitwerking van het CELLENCONCEPT kent een aantal aannamen en beperkingen:

- Het geul-plaatsysteem in de cellen en de Westerschelde als geheel wordt verondersteld in evenwicht te zijn. Autonome ontwikkelingen, waarbij geulen van nature eroderen of sedimenteren, worden niet door het concept beschreven.
- Het gedrag van kortsluitgeulen kan niet met het concept worden beschreven.
- Het eb- vloed-schaar karakter, de niet-uniforme geometrie van de geulen in langsrichting, wordt niet expliciet gemodelleerd.
- In de stabiliteitsanalyse wordt de lokatie van baggeren of storten in een geul niet gespecificeerd. Baggeren op een drempel wordt beschreven als baggeren in de gehele geul.
- Het CELLENCONCEPT geeft geen inzicht in de stabiliteit van het gehele estuarium of in de interactie tussen de diverse cellen. Ook de sedimentuitwisseling tussen de Westerschelde en de Voordelta worden niet beschreven.

Toepassingen

Bij de eerste toepassing op de Westerschelde in het kader van LTV is het systeem, op basis van getij-gemiddelde zandtransporten en het onderscheid tussen grote en kleine eb- en vloedgeulen, geschematiseerd als een ketting van morfologische cellen (Winterwerp et al, 2000). Iedere cel bestaat uit een ebgedomineerde en een vloedgedomineerde geul met daartussen een plaat. De grote geulen vormen de macro-cellen; de meso-cellen zijn

geassocieerd met de kleinere geulen of inscharingen. Het 10%-criterium is geverifieerd, door de daadwerkelijk gerealiseerde bagger- en storthoeveelheden over de periode 1985-1997 te vergelijken met observaties m.b.t. het gedrag van de beschouwde geulen. Op basis van de berekende stortcapaciteiten is geconcludeerd, dat met het huidige bagger- en stortbeleid (sinds 1997-1999) de maximale stortcapaciteit van de totale Westerschelde is bereikt.

Een verificatie van het CELLENCONCEPT is uitgevoerd door Jeuken (2001) op basis van veldobservaties voor de periode 1955-1999. Hiertoe zijn beschouwd de morfologische ontwikkelingen van de geulsystemen: Honte en Schaar van de Spijkerplaat (cel 1), Pas van Terneuzen en Everingen (cel 3), Middelgat en Gat van Ossensisse / Overloop van Hansweert, (cel 4), Zuidergat / Overloop van Valkenisse en Schaar van Valkenisse / Waarde (cel 5), Nauw van Bath en Schaar van de Noord (cel 6) en Vaarwater boven Bath en Appelzak (cel 7). Geconcludeerd wordt dat het theoretisch stortcriterium (5-10% van de totale bruto transportcapaciteit) redelijkerwijs kan worden toegepast op de macro-cellen.

6.8 Probabilistisch modelleren

Beschrijving

Bij probabilistisch modelleren worden morfologische berekeningen uitgevoerd waarbij (een deel van) de modelinvoer bestaat uit kansdichtheidsverdelingen van een fysische parameter, bijvoorbeeld de waterhoogte. Deze methodiek levert op een formalistische wijze een (on)nauwkeurighedsband in de berekende morfologische ontwikkeling en kan daarmee dus inzicht geven in de onzekerheid van de resultaten van numerieke modellen. Ook is het mogelijk om de fysische processen zelf van een onzekerheidsband te voorzien, indien de fysische processen zelf niet goed of nauwkeurig bekend zijn.

Deze techniek wordt momenteel o.a. bestudeerd in het kader van een aan de Technische Universiteit Delft. Zij staat echter nog in de kinderschoenen, en zal voorlopig niet beschikbaar zijn voor toepassing in operationele modellen, c.q. ten behoeve van de beantwoording van praktijkvragen (de adviespraktijk).

7 Onderzoeksstrategie

Het begrip en de kennis van het morfodynamisch systeem Westerschelde is momenteel onvoldoende om betrouwbare en nauwkeurige voorspellingen te kunnen doen over de autonome ontwikkelingen en/of de (lange-termijn) respons van het systeem op menselijke ingrepen. Verdere kennisontwikkeling door gericht onderzoek is daarom onontbeerlijk. Zulk onderzoek kan op diverse wijzen worden uitgevoerd. In deze voorstudie wordt ook, conform de conclusies van de Workshop, onder andere een lans gebroken voor verder werk met geïdealiseerde modellen, omdat zulk werk direct aansluit bij de ontwikkeling van de morfologische modellen voor de Westerschelde die in deze voorstudie aan de orde komt. Zulke geïdealiseerde modellen zijn onder meer geschikt voor onderzoek aan de volgende aspecten:

- Het complexe gedrag van complexe processen kan op diverse schalen ontrafeld worden; denk hierbij aan de vorming van geulen en intergetijdegebieden, plaat-geuluitwisseling, ontstaan van beddingvormen, enz.
- Het complexe gedrag van complexe modellen kan ontrafeld worden; denk hierbij aan het al dan niet convergeren naar een evenwicht, de invloed van diverse termen in de vergelijkingen (Coriolis, advectie, enz.), cyclisch gedrag, enz.
- De geïdealiseerde modellen kunnen bijdragen aan de begripsvorming ten aanzien van de definitie van indicatoren om de morfologische ontwikkeling van het systeem te monitoren.

Het blijkt uit de conclusies van de Workshop, literatuurstudie en discussies met morfologische specialisten voorlopig niet haalbaar om met een procesgeoriënteerd drie-dimensionaal morfodynamisch model gedetailleerde morfologische berekeningen voor het gehele Westerschelde-systeem uit te voeren: rekentijden en bestandsgroottes worden prohibitief groot. Het is daarom de eerst komende tijd noodzakelijk om een aantal modellen te operationaliseren, c.q. operationeel te houden om de diverse beheers- en beleidsvragen op de diverse schalen te kunnen beantwoorden. Aanbevolen wordt hierbij voort te bouwen op in gang gezette ontwikkelingen, dat wil zeggen dat aanbevolen wordt om voort te bouwen op zowel ESTMORF als DELFT3D.

De samenhang tussen deze modellen en de daarmee verkregen resultaten wordt op twee wijzen bereikt:

- gebruik van beide modelsystemen om hetzelfde probleem te bestuderen (i.e. Praktijkgeval 2),
- integratie van de modelresultaten in een GIS-omgeving, gestoeld op het Cellenconcept.

Met betrekking tot ESTMORF wordt de volgende strategie aanbevolen:

1. Bouw ervaring op met de recentelijk uitgebrachte ESTMORF-versie uitgebreid met het voordelta-gebied. De voordelta speelt waarschijnlijk een zeer belangrijke rol bij de lange termijnontwikkeling van het Westerschelde-systeem en kwantificering van de uitwisseling tussen voordelta en de Westerschelde, en de invloed van ingrepen hierop is van cruciaal belang. Pas na een gedetailleerde calibratie en uitvoerig gevoeligheidsonderzoek kan worden vastgesteld of de nieuwe schematisatie adequaat is.

2. Implementeer en test de nieuwe formulering voor de intergetijdegebieden, inclusief een (empirische) formulering voor de breedte-diepteverhouding van de geulen (zie Wang en Helvert, 2000). Tijdens de in het verleden uitgevoerde calibratie van ESTMORF bleek de morfologische ontwikkeling van geulen beter voorspeld te worden dan de ontwikkeling van intergetijdegebieden. Naar verwachting brengt een nieuw ontwikkelde formulering hierin verbeteringen. Een betrouwbare voorspelling van de ontwikkeling van intergetijdegebieden is met name van belang voor ecologische studies voor het systeem.
3. Momenteel wordt de geometrie van geulen in ESTMORF beschreven in de vorm van dwarsdoorsneden. Echter, vanuit nautische overwegingen is vooral de geuldiepte van belang; deze bepaalt dan ook in belangrijke mate het noodzakelijk baggeronderhoud. Een goede beschrijving van de breedte-diepteverhouding van de geulen is ook van belang voor een goede voorspelling van de baggervolumina. Naar verwachting zal in dat geval ook het overall gedrag van ESTMORF verbeteren.
4. Verbeter de baggermodule in ESTMORF door sub-grid effecten in rekening te brengen, en implementeer de nieuwe beschrijving en test deze. Tijdens de uitvoering van het LTV-project (b)leken de voorspelde te baggeren volumina als functie van de vaardiepte van het systeem te klein. Een betrouwbare voorspelling van de baggervolumina is uiteraard van groot belang voor een correcte afschatting van de consequenties van vaargeulverdieping.
5. Berekeningen in het LTV-kader van de morfologische ontwikkelingen van het Schelde-estuarium na verdere verdieping tot 14 m NAP leidden niet tot evenwicht. Onderzocht dient te worden of de tijdschaal voor de aanpassing van het systeem (veel) langer is dan de simulatieperiode van 30 jaar, of dat het systeem zich überhaupt niet tot een evenwicht ontwikkelt.
6. Ontwikkel een formulering voor de voorspelling van schorvorming, implementeer deze in ESTMORF en test haar. Schorvorming is niet alleen van belang vanuit ecologisch oogpunt, doch kan ook in belangrijke mate van invloed zijn op de lange-termijnontwikkeling van het systeem door verlandingsprocessen.
7. Implementeer de 1998-bathymetrie in ESTMORF. Momenteel wordt bij lange-termijnvoorspellingen (tot 2030 en verder) gebruik gemaakt van de 1968-bathymetrie. Het is duidelijk dat deze aanpak onnodige onnauwkeurigheden introduceert, ondanks het feit dat ESTMORF is gecalibreerd voor de periode 1968-1998.
8. Verbeter de ESTMORF-schematisatie van de Beneden Zeeschelde. Momenteel maakt de Beneden Zeeschelde weliswaar onderdeel uit van de ESTMORF-schematisatie, doch is zeer rudimentair gemodelleerd. Deze verbetering wordt slechts aanbevolen indien de morfologische ontwikkeling van de Beneden Zeeschelde expliciet bestudeerd dient te worden: haar ontwikkeling beïnvloedt de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde waarschijnlijk nauwelijks. Merk op dat de bedding van de Beneden Zeeschelde voor een deel uit harde, niet-erodeerbare lagen bestaat. Het is momenteel echter niet mogelijk om de effecten van zulke lagen in ESTMORF te modelleren; aanpassing van ESTMORF daartoe vraagt een behoorlijke inspanning.

Met betrekking tot DELFT3D wordt de volgende strategie aanbevolen:

1. Bouw zo snel mogelijk ervaring op met het huidige DELFT3D-mor systeem voor de Westerschelde, inclusief voordelta. Veel van de relevante fysische processen zijn al in het modellenstelsel geïmplementeerd, doch nog niet getest voor een complex systeem als de Westerschelde. Hierbij wordt de volgende strategie aanbevolen:

- Bouw voort op de 2D-SCALWEST-modelschematisatie, aangezien deze qua waterbeweging behoorlijk is gecalibreerd. Het SCALWEST-model is echter erg groot en dient daarom uitgedund te worden om een handzaam morfodynamisch model te verkrijgen, waarmee snel gevoeligheidsonderzoek kan worden uitgevoerd. Dit grovere model is ook geschikt voor lange-termijnberekeningen i.e. van de orde 10 à 20 jaar.
 - Voer verkennende studies uit met een 3D-modellering, bijvoorbeeld gebaseerd op SCALWEST of TRISCAL voor kleinere gebieden, zoals een individuele bochtgroep of drempelgebied. Gebruik deze aanpak vooral om inzicht te krijgen in het belang van drie-dimensionale effecten, en hoe deze geschematiseerd kunnen worden. Vooralsnog wordt ontraden om de drie-dimensionale effecten met een quasi-3D aanpak te simuleren - mogelijk dat dit in de toekomst wel een gangbare weg is als meer inzicht in de drie-dimensionale effecten verkregen is.
 - Opgemerkt wordt dat bovenbeschreven drie-dimensionale berekeningen slechts voor een beperkte tijdsperiode uitgevoerd kunnen worden.
 - Voer morfodynamische berekeningen uit voor het gehele Schelde-estuarium om ervaring op te doen met dergelijke grote modellen: in de toekomst zullen toch gedetailleerde voorspellingen op langere tijdschalen gevraagd worden.
2. Bij het bovenbeschreven gevoeligheidsonderzoek zal expliciet aandacht aan de randvoorwaarden geschonken moeten worden. Wat zijn de maatgevende condities: kan met een morfologisch getij worden volstaan of zijn simulaties over een springtij-doodtij cyclus van belang, dient het effect van golven meegenomen te worden?
 3. Bestudeer het effect van de initiële condities. Tot op heden zijn slechts simulaties uitgevoerd voor relatief korte periodes. Als gevolg daarvan "passen" waterbeweging en bodemligging niet bij elkaar hetgeen tot onrealistische erosie- en sedimentatiepatronen aanleiding kan geven.
 4. Bestudeer de rol van intergetijdegebieden en de modellering van deze gebieden. De ontwikkeling van zulke intergetijdegebieden is niet alleen van belang vanuit ecologisch oogpunt, doch beïnvloedt ook de grootschalige morfologische ontwikkeling als gevolg van plaat-geuluitwisselingen en hun invloed op de waterbeweging door hun invloed op de effectieve hydraulische weerstand en de generatie van hogere harmonische componenten. Belangrijk aspect voor dit gedrag is de gedetailleerde bathymetrie van de intergetijdegebieden, welke vaak niet goed bekend is vanwege beperkingen om deze in te meten, haar lokale hydraulische weerstand, en de invloed van (lokale) golven op zowel de waterbeweging als de sedimenthuishouding.
 5. Bestudeer het effect van secundaire stromingen, zoals ook onder 1. is uiteengezet. Deze secundaire stromingen zijn van belang voor de sedimentverdeling in geulen en bochtgroepen, voor de ontwikkeling van de drempelgebieden en de migratie van geulen en de precieze locatie van bagger- en stortgebieden. Onderzocht dient te worden of het gewenst is deze secundaire stromingen te parameteriseren, en zo ja, hoe. Merk op dat zo'n parameterisatie voor secundaire stromingen in over het dwarsprofiel (dus bochteffecten) momenteel reeds in het DELFT3D-systeem is geïmplementeerd. Wij bevelen echter aan om vooralsnog of volledig dieptegemiddeld (2Dh) te rekenen of volledig drie-dimensionaal; parameterisatie van de drie-dimensionale effecten zou pas weer opgepakt kunnen worden als de drie-dimensionale effecten volledig begrepen zijn, zowel kwalitatief als kwantitatief.
 6. Bestudeer het effect van verschillen en gradiënten in lithografie:

- De korrelgrootteverdeling van het zand op de rivierbodem varieert van 125-150 μm op de voordelta tot ca. 150 μm in de monding van de Westerschelde tot ca 200 μm bij de Nederlands-Belgische grens.
 - Met name de Honte doorsnijdt slecht erodeerbare Boomse kleilagen; elders in het estuarium bevinden zich lagen met Hollands veen en slecht gepakte holocene afzettingen, met name van de Duinkerken Geul, welke makkelijk erodeerbaar zijn, c.q. zettingsvloeiingsgevoelig. Opgemerkt wordt dat er momenteel geen gedetailleerd overzicht bestaat van deze lithografie.
7. Het is aan te bevelen ook de bodemsamenstelling met betrekking tot de zand-slibverhouding te bestuderen: relevante formuleringen voor het gedrag van zand-slibbodem zijn recentelijk in DELFT3D-FLOW geïmplementeerd. Inzicht in de bodemsamenstelling van met name de intergetijdegebieden is van belang voor de ecologische ontwikkeling van het Schelde-estuarium.
8. Ontwikkel, implementeer en test een beschrijving voor schorvorming; zoals onder ESTMORF is opgemerkt is dit van belang vanuit ecologisch oogpunt en voor de lange-termijnontwikkeling van het estuarium.

Het ESTMORF-model en het DELFT3D-mor systeem genereren uitvoer op een nogal verschillend aggregatieniveau. Vergelijking van de modelresultaten en afstemming van de modellen dient op het niveau van de “grootste gemene deler” te geschieden, d.w.z. op het hoogste aggregatieniveau. Aanbevolen wordt om deze afstemming te realiseren door middel het Cellenconcept waarmee complexe informatie inzichtelijk kan worden weergegeven.

Opgemerkt wordt dat uiteraard niet alle modelresultaten zich lenen tot zo’n aggregatieslag. Dit is bijvoorbeeld het geval als beslissingen juist op basis van detailinformatie genomen moeten worden, zoals de invloed van de exacte locatie van baggeren en/of storten.

Het Cellenconcept is jong en nieuwe toepassingen dienen goed geëvalueerd en getoetst te worden voor het concept min of meer operationeel kan worden ingezet. Daarnaast dient inzicht verkregen te worden in de volgende zaken:

1. Gebruik het Cellenconcept voor het in kaart brengen van de netto- en brutosedimenttransporten door het estuarium, dus onder andere voor het visualiseren van de zandbalans van het systeem en de veranderingen daarin als resultaat van menselijk ingrijpen en natuurlijke ontwikkelingen:
 - bereken de bruto zandtransporten in de diverse cellen, zoals in feite in LTV-kader al is gebeurd,
 - bereken de netto zandtransporten in de diverse cellen,
 - bereken de bruto- en netto zandtransporten tussen de cellen onderling,
 - bepaal, voor zover mogelijk, de bruto- en netto zanduitwisseling tussen voordelta en estuarium.

Het overzicht van de ruimtelijke variatie in bruto- en netto transporten geeft inzicht in de ruimtelijke schalen van de transportprocessen en daarmee in de daarvoor relevante tijdschalen. Veranderingen in deze patronen, met name veranderingen in transportrichtingen, zouden als indicator voor morfologische ontwikkelingen kunnen dienen.

2. Bepaal het effect van de ruimtelijke variatie in korrelgrootte van het sediment. Heeft de grootschalige zandverplaatsing van oost naar west als gevolg van de nieuwe bagger-/stortstrategie invloed op de korrelverdeling, c.q. de sedimenttransporten?
3. In het huidige Cellenconcept zijn de cellen symmetrisch verondersteld. Bepaal het effect van het verschil in lengte van eb- en vloedgeulen.
4. Bij de opstelling van het huidige Cellenconcept is verondersteld dat de Westerschelde in een soort van dynamisch evenwicht verkeert. Hoe kan een autonome morfologische ontwikkeling van het estuarium in het Cellenconcept worden verdisconteerd?
5. Het cellensysteem kan in een BeleidsOndersteunend Systeem worden ondergebracht waarin ook de kosten van de baggeractiviteiten (met name de vaarafstand) expliciet in de evaluatie van een bagger-/stortstrategie kunnen worden ondergebracht.
6. Voorgesteld wordt om het Cellenconcept in een GIS-omgeving onder te brengen zodat de resultaten van modelleringsexercities en van waarnemingen eenvoudig in het Cellenconcept is onder te brengen en onderling te vergelijken en te analyseren.

Samenvattend wordt dus op hoofdlijnen de volgende onderzoeksstrategie aanbevolen:

1. voortzetting van onderzoek met geïdealiseerde modellen ten behoeve van begripsvorming van het systeemgedrag,
2. onderhoud van het operationele ESTMORF-model ten behoeve van adequate advisering bij beleids- en beheersvragen,
3. ervaring opdoen met het DELFT3D-mor systeem om het modelgedrag te leren begrijpen en ten behoeve van kennisopbouw van het Schelde-estuarium, en
4. afstemming van de modellen en -resultaten met behulp van GIS en het Cellenconcept.

De op de voorgaande pagina's beschreven aandachtspunten zijn in Tabel 7.1 samengevat:

aandachtspunt	geïdealiseerde modellen	DELFT3D-mor	ESTMORF	Cellenconcept
lange-termijnontwikkeling	systeem- en modelgedrag bestuderen door analyse vereenvoudigd mathematisch model en gevoeligheidsanalyses	simulaties voor diverse scenario's en condities		
bereiken evenwicht	nagaan onder welke omstandigheden wel of geen evenwicht wordt bereikt	voorlopig minder geschikt zolang modelgedrag niet volledig begrepen	ESTMORF-berekeningen hoeven niet per sé tot evenwicht te leiden	
cycliciteit	cycliciteit op kleinere schaal (bijv. drempelgebieden) kan bestudeerd worden door integratie geïdealiseerde modellen & DELFT3D-mor			
schorontwikkeling		vraagt om toevoegen van slibmodule	schormodule ontwikkelen, toevoegen en testen	
overall zandbalans & uitwisseling met voordelta		geïntegreerde studies ESTMORF en DELFT3D-mor geven inzicht in overall zandbalans		geschikt voor integratie en visualisatie modelresultaten
inzicht in drijvende krachten	effect getijperiode	effect getijperiode, golven en eventueel ecologie		
inzicht in fysische parameters		effect korrelgrootte, hydraulische weerstand, secundaire stromingen en intergetijdegebieden		
bepalen baggervolumina		ESTMORF is nu zeer geschikt; integratie met DELFT3D-mor		
optimaliseren baggerstrategie			integratie ESTMORF en Cellenconcept	
bevaarbaarheid nevengeulen		heeft nauwe relatie met cycliciteit		
integratie veldgegevens en modelresultaten				onderbrengen in GIS

Tabel 7.1: Overzicht aandachtspunten morfologisch onderzoek Westerschelde.

8 Plan van aanpak

In Hoofdstuk 7 is uiteengezet dat het op redelijke termijn niet mogelijk is, en zelfs op langere termijn wellicht niet wenselijk, om te streven naar één morfodynamisch model waarmee alle beheers- en beleidsvragen ten aanzien van het Schelde-estuarium kunnen worden opgelost. Het is daarom noodzakelijk om een aantal parallelle sporen te blijven volgen, dat wil zeggen dat geïnvesteerd dient te worden in de ontwikkeling van meerdere modellen. Deze ontwikkeling, het opdoen van ervaring met deze (gecompliceerde) modellen en vergroting van de kennis van het estuarium gaan hand in hand. Op basis van de in de Hoofdstukken 4 t/m 7 gegeven informatie, Tabel 7.1 en de in Hoofdstuk 7 genoemde punten 1 t/m 4 kan de aanpak worden gespecificeerd. Leidraad hierbij is om zo snel mogelijk resultaten voor de alledaagse adviespraktijk te verkrijgen, dus::

- een hindcast uit te voeren van het gedrag van het Straatje van Willem (Praktijkgeval 1) en het baggeronderhoud na de laatste verdieping (Praktijkgeval 2).
- zo snel mogelijk ervaring op te doen met het DELFT3D-mor systeem voor het Westerschelde-estuarium, en
- zo snel mogelijk meer inzicht in het lange-termijngedrag van het estuarium en de modelsystemen te verkrijgen,

Activiteiten voor aanpak Praktijkgeval I

Het doel van deze activiteiten is om te onderzoeken of:

- Met een proces-georiënteerd morfologisch model de complexe, cyclische processen in een drempelgebied adequaat in algemene zin te voorspellen zijn,
- In het bijzonder de ontwikkeling van het Straatje van Willem na te rekenen (hindcast), en
- Indien deze hindcast succesvol is, de meerwaarde van zo'n morfologisch model ten opzichte van een meer empirische aanpak (expert judgement) te bepalen.

Case 1, het modelleren van kortsluitgeulen in een drempelgebied in het algemeen, en van het Straatje van Willem in het bijzonder, vraagt om een model dat de details van zo'n drempelgebied kan weergeven. Slechts DELFT3D-mor kan deze functionaliteit momenteel leveren. Echter, er bestaat weinig ervaring in het modelleren van zulke dynamische gebieden. Enigszins vergelijkbare studies zijn uitgevoerd voor het Amelandse Zeegat, het Marsdiep en het Humber estuarium (UK). De volgende activiteiten worden aanbevolen om genoemde hindcast uit te kunnen voeren en te evalueren.

Dit gebrek aan ervaring impliceert dat een uitgebreid gevoeligheidsonderzoek nodig is om de response van het morfologisch model op de diverse mathematisch-fysische parameters te bepalen. De volgende onderzoeksstappen zijn voorzien, waarbij allereerst het rekendomein in relatie tot de horizontale en verticale discretisatie dient te worden vastgesteld:

- A. Het rekendomein dient uiteraard het Drempelgebied van de Everingen te omvatten. Het is tamelijk triviaal dat het rekendomein groter dient te zijn vanwege allerlei randeffecten. De vereiste grootte is echter niet triviaal. Mogelijk dat een domein dat beide bochtgroepen aan weerszijde van het Drempelgebied omvat (dus van Vlissingen tot

Hansweert) voldoende is. Beter lijkt het om een groter domein te definiëren dat loopt van de zeerland van het SCALWEST-model tot de Nederlands-Belgische grens.

- B. De SCALWEST-modelschematisatie bevat echter veel te veel roosterpunten om een efficiënte morfologische simulatie mogelijk te maken. Deze schematisatie dient dan ook fors vergrofd te worden om de gewenste hoeveelheid roosterpunten t.g.v. ca. 10,000 te verkrijgen.
- C. Ter plaatse van het drempelgebied dient het rooster weer verfijnd te worden, dan wel het oorspronkelijke rooster gebruikt te worden. Dit kan op twee manieren:
- Verfijning en vergroving in het model zelf, gebruikmakend van de faciliteiten die een kromlijng rooster biedt - deze aanpak vereist dat het gehele domein of 2Dh, dan wel 3D wordt doorgerekend,
 - Gebruikmakend van domeindecompositie; opgemerkt moet worden dat dit in principe de meest aantrekkelijke aanpak is, doch dat domeindecompositie in het morfologisch systeem momenteel niet operationeel is - deze aanpak laat in principe toe dat het Drempelgebied 3D on-line wordt genest met een 2Dh buitengebied.

Samenvattend wordt voorgesteld om een deel van de studie geheel met een 2Dh-model uit te voeren, een deel met een volledig 3D-model en te zijner tijd een deel van de studie met een gekoppeld 2Dh-3D model. Ook vanuit fysisch oogpunt lijkt zo'n koppeling aantrekkelijk omdat de morfologische tijdschalen van het drempelgebied veel korter zijn dan die van nevengelegen hoofdgeulen.

De volgende aanpak wordt aanbevolen:

- I. Een gevoeligheidsonderzoek met een 2Dh-schematisatie met een aangepast rooster, uitgaande van de SCALWEST-schematisatie, waarbij met name de lange termijn effecten (i.e. tijdschaal morfologische cyclus) bestudeerd worden met aandacht voor:
 - het effect van de grootte van het rekendomein,
 - het ontstaan van een cyclisch gedrag en de invloed van de randvoorwaarden daarop; de achterliggende vraag is of het waargenomen cyclische gedrag een autonoom gedrag van het systeem is, dan wel of het door externe factoren (variëaties in aandrijvende krachten) wordt opgelegd.
- II. Een gevoeligheidsonderzoek met een 3D-schematisatie met een aangepast rooster, uitgaande van de SCALWEST- en TRISCAL-schematisatie en een beperkt rekendomein, waarbij met name de korte termijn effecten (twee tot vier jaar) bestudeerd worden,
- III. Een gevoeligheidsonderzoek met een hybride 2Dh-3D-schematisatie, gebruikmakend van domeindecompositie, waarmee de lange termijnontwikkeling van het drempelgebied, inclusief drie-dimensionale effecten bestudeerd kan worden.

Andere aspecten die in het gevoeligheidsonderzoek aan de orde dienen te komen zijn:

- IV. Tot op heden worden morfologische berekeningen uitgevoerd voor een zogenaamd morfologisch getij, dat wil zeggen een dubbeldagse getijperiode met een amplitude die representatief is voor het lange-termijn sedimenttransport. Onderzocht dient te worden of zo'n morfologisch getij ook voor de Westerschelde gedefinieerd kan worden, en zo niet, of dan bijvoorbeeld met een doottij-springtij cyclus gerekend dient te worden, dan wel met een andere aansturing (zie ook I.),

- V. Het Drempelgebied van de Everingen is niet erg groot en de ruimtelijke variatie in korrelverdeling zal daarom eveneens niet groot zijn. Daarom wordt vooralsnog voorgesteld om de morfologische berekeningen met één korrelgrootte uit te voeren, doch wel de invloed van deze korrelgrootte te bepalen,
- VI. Aangenomen wordt dat de opbouw en afbraak van intergetijdegebieden in belangrijke mate gestuurd wordt door de invloed van (lokaal opgewekte) golven; hierdoor ontstaan ook seizoensinvloeden in het gedrag van de intergetijdegebieden. Het is dus van belang gevoel te krijgen voor de invloed van golven op de morfologische ontwikkeling van het Drempelgebied. Voorgesteld wordt om deze golf invloed in eerste instantie op zeer eenvoudige, geparameteriseerde wijze mee te nemen: gedetailleerde berekeningen van het golfveld en de daarmee samenhangende bodemschuifspanningen als functie van een in de tijd (en mogelijk over de ruimte) variërend windveld zijn zeer rekenintensief,
- VII. Direct hierop aansluitend is de beschrijving van de hydraulische weerstand van belang. Dit betreft niet alleen de gekozen ruwheidsformulering (Manning en White-Colebrook resulteren bijvoorbeeld in een sterke toename van de bodemschuifspanning bij afnemende waterdiepte, terwijl dit bij Chézy niet optreedt), doch ook een eventuele terugkoppeling van het gesuspendeerde sediment op het turbulentieveld, dus de verticale menging en bodemruwheid. Recente exercities voor het Humber estuarium suggereren dat ook dit laatste effect mogelijk een rol speelt. Daarnaast is het van belang om te onderzoeken of de hydrodynamische weerstand richtingafhankelijk is, dus of de ruwheidscoëfficiënten een andere waarde heeft tijdens vloed- en ebstroming. Dit effect treedt bijvoorbeeld op als bodemvormen asymmetrisch zijn,
- VIII. Het gedrag van het drempelgebied, en dan met name haar zandbalans, is van groot belang voor de sedimenthuishouding op macro-schaal, dus de sedimentuitwisseling tussen de diverse bochtgroepen. Dit aspect speelt ook bij de verdere ontwikkeling van het Cellenconcept, zoals op de volgende pagina's uiteengezet.

Bij de beoordeling van de DELFT3D-MOR-resultaten dienen onder meer de volgende aspecten betrokken te worden:

- Het is van belang dat niet alleen de dwarsdoorsnede van de diverse geulen en hun ontwikkeling goed voorspeld wordt, doch ook hun breedte-diepte-verhouding (hypsometrie): met name de geuldiepte is van belang voor de scheepvaart. Mogelijk wordt de hypsometrie van geulen in belangrijke mate bepaald door de lokale hydrodynamische weerstand.
- Een ander beoordelingscriterium voor de morfologische voorspellingen is het gedrag van de berekende zandbalans van het Drempelgebied: kan het model de patroonwisseling, dat wil zeggen de overgang van een eroderend naar een aangroeiend drempelgebied, zoals door Jeuken beschreven, voorspellen?

Activiteiten voor aanpak Praktijkgeval 2.

Het doel van deze activiteiten is om:

- Een nauwkeurige schatting te maken van het in de komende jaren te verwachten baggeronderhoud,
- Een afstemming te bereiken tussen het ESTMORF-model en het DELFT3D-systeem, en

- Indien deze hindcast succesvol is, de meerwaarde van zo'n morfologisch model ten opzichte van een meer empirische aanpak (expert judgement) te bepalen.

In concreto worden de volgende werkzaamheden voorgesteld:

- IX. Berekeningen met ESTMORF voor de oude, i.e. pre-1997 bathymetrie, maar met de nieuwe stortstrategie, i.e. baggeren en zandwinnen in het oosten en storten in het westen, om de invloed van deze stortstrategie op de baggervolumina te bepalen,
- X. Uitwerken van twee verbeteringen in ESTMORF om de nauwkeurigheid van de ESTMORF-voorspellingen te vergroten:
 - breng zogenaamde sub-grideffecten voor het baggermodule in ESTMORF in rekening,
 - verbeter de modellering van de intergetijdegebieden; deze verbetering is mogelijk niet direct van belang voor de berekening van de baggervolumina, doch is zeker van belang met betrekking tot de bepaling van lange-termijneffecten.
- XI. Bereken de post-1998 baggervolumina, i.e. na de laatste verdieping, inclusief het effect van de veranderende stortstrategie, en vergelijk de resultaten met de waarnemingen van de laatste jaren. Bepaal ook de tijdschaal voor de respons van het systeem op een dergelijke verdieping in relatie tot de ontwikkeling van de baggervolumina gedurende de komende jaren (moet de retourstroom nog op gang komen?),
- XII. De lange-termijn zandbalans van het gehele estuarium wordt in belangrijke mate bepaald door de uitwisseling met de voordelta. De voordelta kan mogelijk ook een rol spelen bij de (tijdelijke) accommodatie van gebaggerd sediment. Het onlangs met de voordelta uitgebreide ESTMORF-model dient daarom snel geoperationaliseerd te worden, in de zin dat ervaring en gevoeligheidsanalyses worden uitgevoerd, waarna de sedimentuitwisseling tussen estuarium en voordelta voor diverse scenario's kan worden uitgewerkt.

Praktijkgeval 2 is ook uitstekend geschikt om de ESTMORF- en DELFT3D-mor-ontwikkelingen en modelresultaten op elkaar af te stemmen. Dit vraagt om de volgende activiteiten:

- XIII. Zet een reken-efficiënte 2Dh-schematisatie van het estuarium op in het DELFT3D-mor-systeem, gebaseerd op de SCALWEST-schematisatie, hierbij wordt uiteraard dezelfde schematisatie als beschreven onder IV. toegepast. Simuleer de morfologische ontwikkelingen van de Westerschelde, inclusief de effecten van baggeren, storten en zandwinning voor de calibratieperiode van ESTMORF, i.e. 1968-1996, en vergelijk de resultaten met de waarnemingen en de ESTMORF-resultaten.

Activiteiten voor verdere ontwikkeling van het Cellenconcept.

Het doel van deze activiteiten is om:

- het vertrouwen in en de toepasbaarheid van het Cellenconcept te vergroten, en
- het Cellenconcept geschikt te maken als gereedschap om, op een hoog aggregatieniveau, de resultaten van morfologische modellen onderling en met observaties te vergelijken.

De volgende activiteiten worden voorgesteld:

- XIV. Het huidige Cellenconcept is gebaseerd op een zeer eenvoudige geometrische schematisatie van het Schelde-estuarium. Onderzocht dient te worden hoe een aantal van de toegepaste vereenvoudigingen de bruikbaarheid en betrouwbaarheid van het Cellenconcept beïnvloeden. De belangrijkste aspecten zijn:
- er wordt nu verondersteld dat het estuarium zich in een dynamische evenwicht bevindt; wat betekent dit voor de toepasbaarheidstijdschaal en/of kan het effect van een autonome ontwikkeling in het concept worden opgenomen,
 - hoe kan de uitwisseling tussen de diverse cellen, en de mogelijke cycliciteit daarin (zie ook ontwikkeling van de drempelgebieden) in het concept worden verdisconteerd,
 - de cellen worden nu symmetrisch verondersteld; hoe belangrijk is deze vereenvoudiging, en is het nodig/mogelijk om het effect van celtakken van ongelijke lengte te bepalen,
 - in het concept wordt nu aangenomen dat de korrelgrootte van het sediment in het gehele systeem constant is; wat is de invloed van deze aanname, mede in relatie tot de vigerende bagger/stortstrategie waarbij sediment in het oosten gebaggerd (met grovere korrel) in het westen (waar het sediment een kleinere korrelgrootte heeft) wordt gestort.
- XV. Voorgesteld wordt om het Cellenconcept te integreren met de baggermodule in ESTMORF zodat de consequenties van diverse bagger/stortstrategieën eenvoudig geanalyseerd kunnen worden,
- XVI. Voorgesteld wordt om het Cellenconcept in een GIS-omgeving onder te brengen zodat de resultaten van modelleringsexercities en van waarnemingen eenvoudig in het Cellenconcept is onder te brengen en onderling te vergelijken en te analyseren.

Activiteiten met geïdealiseerde modellen

Het doel van deze activiteiten is tweeledig:

- Inzicht verkrijgen in de ontwikkeling van het systeemgedrag en het ontstaan en eventueel weer verdwijnen van (kortsluit)geulen en drempelgebieden op lokaal niveau,
- Inzicht verkrijgen in de globale ontwikkeling van het estuarium, zoals de interactie tussen diverse deelgebieden en het bestaan van omslagpunten,
- Inzicht krijgen in het gedrag van de modellen zelf.

In concreto worden de volgende activiteiten voorgesteld:

- XVII. Afronden van de in Utrecht lopende studie om lokale processen met een niet-lineair model te analyseren. Hierbij komen de volgende onderwerpen aan de orde:
- de ontwikkeling en het gedrag van bodemvormen en de onderliggende mechanismen (vrije bodemvormen of geforceerd),
 - de ontwikkeling en het gedrag van drempelgebieden,
 - de ontwikkeling en het gedrag van (kortsluit)geulen.
- XVIII. Verdere ontwikkeling van een lineair globaal model van het estuarium om de ontwikkeling van de diverse morfologische processen op diverse ruimtelijke en tijdschalen te bestuderen. Hierbij komen de volgende onderwerpen aan de orde:
- de (niet-)lineaire lokale processen dienen in het globale model ingebed te worden,

- de voorwaarden welke aan de rand van het model opgelegd dienen te worden, en
 - de invloed van de sedimenttransportformule.
- XIX. Tenslotte dient het globale lineaire model verder ontwikkeld te worden tot een niet-lineair model. Hiermee kan bijvoorbeeld op conceptueel niveau bestudeerd worden:
- de stabiliteit van het systeem, zoals het bestaan van omslagpunten,
 - de respons van het systeem op zeespiegelstijging (verdrinking), enz.,
 - de uitwisseling tussen en wederzijds beïnvloeding van de verschillende macro-eenheden van het systeem (bochtgroepen).

9 Prioritering en fasering

Directie Zeeland heeft behoefte aan een verdere ontwikkeling van het tot haar beschikking staande instrumentarium dat gebruikt kan worden voor het beheer van de Westerschelde. Numerieke morfologische modellen maken onderdeel uit van dit instrumentarium. Indien zulke modellen betrouwbaar, nauwkeurig en goed gevalideerd zijn, en er voldoende ervaring mee is opgebouwd, zullen zulke modellen een bijdrage kunnen leveren aan de onderbouwing van beleidsontwikkeling en -beslissingen: fysische processen en ervaring met het Westerscheldesysteem zijn op een formele wijze in de numerieke modellen ondergebracht, zodat genoemde beleidsbeslissingen minder op alleen intuïtie en/of individuele ervaring gestoeld hoeven te worden. Zulke modellen kunnen ook gebruikt worden voor het doen van voorspellingen ten aanzien van de morfologische ontwikkelingen van de Westerschelde ten gevolge van ingrepen of natuurlijke processen die de ervaring te boven gaan.

Hoofdstuk 8 beschrijft een erg ambitieus onderzoeksprogramma. Realisering van dit programma, of een deel daarvan, kan alleen succesvol zijn als prioriteiten en fasering van het onderzoek goed worden vastgesteld.

In Tabel 9.1 wordt een overzicht gegeven van de activiteiten, die (minimaal) noodzakelijk geacht worden om tot een verdere ontwikkeling van het bestaande morfologisch beheersinstrumentarium te komen. De vet gemarkeerde, onderstreepte activiteiten in Tabel 9.1 hebben een hoge prioriteit en deze zijn tevens terug te vinden in Tabel 9.2 in de vorm van een tijdschema. De gepresenteerde prioritering is gebaseerd op de volgende overwegingen:

- 1) Beantwoording van de beheersvragen zoals verwoord in de twee in Hoofdstuk 4 beschreven Praktijkgevallen.
- 2) Bij de beantwoording van de beheersvragen zullen de benodigde werkzaamheden gefaseerd uitgevoerd worden en met een minimale inspanning, dat wil zeggen met gebruik van, in eerste instantie, diepte-gemiddelde schematisaties (conform een Workshop-conclusie).
- 3) Het kunnen vaststellen van de meerwaarde van het gebruik van numerieke morfologische modellen bij de adviespraktijk, door aan te geven hoe de onzekerheid in de morfologische ontwikkelingen in de Westerschelde verkleind kan worden.
- 4) Het zo snel mogelijk kunnen opdoen van ervaring met de 2Dh-modellen voor gebruik in een praktijkomgeving; vervolgvragen kunnen slechts goed worden gedefinieerd op basis van die ervaring.
- 5) Integratie en afstemming van de verschillende modelsystemen en data met het Cellenconcept.
- 6) Verdere ontwikkeling, c.q. onderbouwing, van het Cellenconcept na vaststelling van de bruikbaarheid(sgrenzen).
- 7) Het is van groot belang om meer inzicht in het (lange-termijn) gedrag van het morfologisch systeem Schelde-estuarium (cycliciteit, stabiliteit geulen, omslagpunten, enz.) en in het (lange-termijn) gedrag van de morfologische modellen (cycliciteit, bestaan evenwicht, enz.) te verkrijgen. Alleen dan kunnen de resultaten van de morfologische modellen geïnterpreteerd en naar waarde worden geschat.

Er wordt sterk voor gepleit om tijdens de werkzaamheden ten behoeve van de behandeling en beantwoording van de beheersvragen van de Praktijkgevallen intensief contact te onderhouden met de beheerder om een zo goed mogelijke afstemming te garanderen tussen de vragen, de beantwoording daarvan en de ontwikkeling van het instrumentarium.

Uit het overzicht kan geconcludeerd worden dat nog veel werk gedaan moet worden voor een volledig operationeel modelinstrumentarium beschikbaar is. Niettemin is het mogelijk al ver voor de afronding van deze operationalisering een instrumentarium beschikbaar te krijgen dat bruikbaar is voor het beantwoorden van de elders in deze voorstudie genoemde beheers- en beleidsvragen. Afhankelijk van de inspanning en voortgang wordt ingeschat dat zo'n bruikbaar instrumentarium op een termijn van één à twee jaar beschikbaar zal kunnen zijn; sommige tussenproducten uiteraard eerder.

activiteit		argumentatie prioritering
<u>I.</u>	invloed rekendomein DELFT2D-mor	minimaal nodig voor Geval I (1, 2, 3, 4)
II.	gevoeligheid 3D schematisatie	in volgende fase (2)
III.	hybride 2Dh-3D aanpak	in volgende fase (2)
<u>IV.</u>	invloed randvoorwaarden	minimaal nodig voor Geval I (1, 2, 3, 4)
V.	invloed korrelgrootte(verdeling)	van belang voor overall begrip gedrag WS (7)
<u>VI.</u>	invloed golven DELFT2D-mor	minimaal nodig voor Geval I (1, 2, 3, 4)
<u>VII.</u>	invloed ruwheidsformulering	minimaal nodig voor Geval I (1, 2, 3, 4)
VIII.	invloed drempels op zandbalans	van belang voor overall begrip gedrag WS (7)
<u>IX.</u>	baggeronderhoud voor 1997 ESTMORF	minimaal nodig voor Geval II (1, 3)
X.	verbeteren ESTMORF	mogelijk nodig als IX en XI niet accuraat
<u>XI.</u>	baggeronderhoud na 1997 ESTMORF	minimaal nodig voor Geval II (1, 3)
XII.	effect voordelta op zandbalans	van belang voor overall begrip gedrag WS (7)
<u>XIII.</u>	vergelijking DELFT2D en ESTMORF	nodig voor integratie modellen (5)
XIV.	verdere onderbouwing Cellenconcept	in volgende fase na vaststellen bruikbaarheid (6)
<u>XV.</u>	integreren ESTMORF en Cellenconcept	nodig voor integratie modellen (5)
<u>XVI.</u>	Cellenconcept in GIS-omgeving	nodig voor integratie modellen (5)
<u>XVII.</u>	geïdealiseerd, niet-lineair lokaal	van belang voor overall begrip gedrag WS (7)
<u>XVIII.</u>	geïdealiseerd, lineair globaal	van belang voor overall begrip gedrag WS (7)
<u>XIX.</u>	geïdealiseerd, niet-lineair globaal	van belang voor overall begrip gedrag WS (7)

Tabel 9.1: Overzicht argumenten voor prioritering: vet gemarkeerd en onderstreept heeft prioriteit; de nummers tussen haakjes verwijzen naar de overwegingen op de vorige pagina (WS = Westerschelde).

activiteit	globaal tijdschema (arbitraire tijdas)
I. invloed rekendomein DELFT2D-mor	_____
IV. invloed randvoorwaarden DELFT2D-mor	_____
VI. invloed golven DELFT2D-mor	_____
VII. invloed ruwheidsformulering DELFT2D-mor	_____
IX. baggeronderhoud voor 1997 ESTMORF	_____
XI. baggeronderhoud na 1997 ESTMORF	_____
XIII. vergelijking DELFT2D-mor en ESTMORF	_____
XV. integreren ESTMORF en Cellenconcept	-----
XVI. Cellenconcept in GIS-omgeving	_____
XVII. geïdealiseerd, niet-lineair lokaal	_____
XVIII. geïdealiseerd, lineair globaal	_____
XIX. geïdealiseerd, niet-lineair globaal	_____

Tabel 9.2: Globaal tijdschema ontwikkeling morfologisch modelinstrumentarium (activiteit I, IV, VI en VII zijn nodig voor een hindcast van de ontwikkeling van het Straatje van Wilem; activiteit XI en XIII voor een hindcast (en voorspelling) van het baggeronderhoud na 1997/98).

10 Beschikbare en benodigde data

10.1 Globaal overzicht beschikbare metingen

Dieptekaarten

Vanaf 1931 zijn voor de Westerschelde dieptekaarten beschikbaar. Momenteel worden lodingen om de 1 à 2 jaar op een 20x20 m grid herhaald. De lodingen worden uitgevoerd vanaf een boot en de resultaten zijn daardoor vooral beperkt tot de geulen. Op de intergetijdegebieden is de hoeveelheid informatie veel geringer en lokaler van karakter.

Waterstanden

Waterstandsmetingen zijn beschikbaar in de vaste 'monitoring' stations, zie onderstaande tabel:

Waterstandsm Meetpunt	Astronomische getijcomponenten
Vlakte van de Raan	ja
Westkapelle	ja
Vlissingen	ja
Borssele	nee
Hansweert	ja
Bath	nee
Liefkenshoek (België)	nee
Kallo (België)	nee
Antwerpen (België)	nee
Cadzand	nee
Terneuzen	ja
Overloop van Hansweert	nee
Walsoorden	nee
Baalhoek	nee

Golfgegevens

Golfgegevens (golfhoogte, -periode en -energie) worden continu gemeten in het mondingsgebied: Deurloo, Scheur West, Scheur Oost en Wielingen. In de Westerschelde zijn geen vaste meetpunten.

Stroomsnelheden en debieten

Debietmetingen worden tegenwoordig met een ADCP uitgevoerd. Hiermee kunnen in verticale profielen snelheden worden gemeten, van belang voor de circulaties, evenals suspensieconcentraties. Dit laatste is echter nog niet gedaan voor de Westerschelde. Dwarsstroommetingen zijn éénmalig (op projectbasis); in een aantal vaste meetraaien worden wel dwarsstroommetingen op regelmatige basis uitgevoerd, zie onderstaande tabel:

Raai	Naam	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00
1	Ned.-Belgische grens				x					x				x
2	Nauw van Bath - Sch vd Noord		x					x				x		
3	Overloop Valkenisse Z.geul			x					x	x				
4	Land van Saeftinge				x			x						
5	Zuidergat Sch v Waarde	x		x					x	x	x	x	x	x
6	Gat van Ossenis Middelgat	x	x					x						
7	Pas van Terneuzen Everingen		x							x	x	x	x	x
9	Honte Sch vd Spijkerplaat Vw				x					x				
10	Honte Sch vd Spijkerplaat Vw		x								x			
11	Vlissingen Breskens								x		x			x
12	Westerscheldemon (A B C)				x						x		x	x
14	Monding Westerschelde					x						x		

Tabel 10.1: Overzicht van recente dwarsraaistroommetingen

Historische stroombeelden kunnen worden gereproduceerd op basis van dieptekaarten en modelberekeningen.

Bodemsamenstelling

Informatie over de bodemsamenstelling is te ontleen aan de gebiedsdekkende McLaren meting van 1993. Kennis omtrent de bodemsamenstelling is belangrijk voor de modellering.

10.2 Benodigde data

DELFT3D-MOR / DELFT2D-MOR, DELFT3D-RAM en DELFT3D-FLOW

Voor deze modellen zijn gegevens omtrent de bodemontwikkeling over de beschouwde tijdschaal essentieel. Afhankelijk van de vraag kan dit betrekking hebben op de geulen en de platen. Het sediment wordt gekarakteriseerd door de mediane diameter van het sediment in de bodem en/of de waterkolom. Voor een beoordeling van de sedimentdynamica tijdens het getij is het gewenst in het beschouwde gebied te beschikken over informatie m.b.t. sedimentconcentraties (profielen). Voor de bodemruwheid is informatie omtrent de hoogte van bodemribbels van belang. Randen dienen voldoende ver van het interessegebied te liggen, zodat over een zekere lengte aanpassing kan geschieden van de opgegeven (evenwichts)-concentratieprofielen. Informatie over de verticale en horizontale getijbeweging (getijcomponenten) is nodig, m.n. in verband met het optreden van getijasymmetrie. Tenslotte dient te worden nagegaan of het effect van golven voor de morfologische ontwikkeling moet worden meegenomen. Indien dit het geval is, zijn

gegevens nodig over de golfhoogte, golfperiode, windrichtingen en -snelheden met bijbehorende frequenties.

ESTMORF

Voor ESTMORF is een 1D-netwerk model nodig om de hydrodynamische parameters te bepalen (getijvolume en getijslag). Gebruik wordt gemaakt van geometrische parameters, zoals het dwarsprofieloppervlak van de geulen en hoogten van het hoge en lage intergetijdegebied. De specifieke modelparameters worden bepaald tijdens de calibratie van het model op basis van berekende en gemeten morfologische veranderingen. Eventueel kan een snelheid voor de bodemdaling worden opgegeven alsmede de snelheid voor zeespiegelstijging en verandering in getijamplitude. Tenslotte is informatie nodig over bagger- en storthoeveelheden en zandwinning en hun lokaties.

ASMITA

De morfologische toestand van de diverse elementen van het model (geulen en platen in het getijdebasin, de buitendelta en de aanliggende kust) worden beschreven met het natte volume als toestandsvariabele. Deze volgen dus uit de geometrische schematisatie van het gebied, evenals het horizontale oppervlak van de elementen, en dienen bekend te zijn aan het begin en het eind van de calibratieperiode. Verder dienen gespecificeerd te worden de snelheid van de zeespiegelstijging en de ingrepen (baggeren en storten). De evenwichtsvolumina voor de elementen volgens uit de calibratie.

GEÏDEALISEERDE MODELLEN

De benodigde gegevens zijn specifiek voor het gekozen geïdealiseerde model. Deze kunnen zijn: bodemveranderingen, getijcomponenten en korreldiameter van het sediment.

CELLENCONCEPT

Het CELLENCONCEPT maakt gebruik van de bruto sedimenttransporten door de (hoofd)-geulen van de Westerschelde. Deze bruto transporten worden berekend door DELFT3D-MOR. De benodigde gegevens zijn gelijk aan die, zoals hierboven genoemd voor DELFT3D-MOR. Voor de validatie van het model is informatie nodig omtrent de morfologische ontwikkeling.

Overzicht geraadpleegde en beschikbare literatuur

- Aarninkhof, S.G.J., J.A. Roelvink, 1999. Long-term morphodynamic modelling. An intercomparison of different approaches. Note as part of project Z2422. WL | Delft Hydraulics.
- Allersma, E., 1992. Studie inrichting Oostelijk deel Westerschelde. Analyse van het fysische systeem. Nota voor de Werkgroep OOSTWEST. Z368. Waterloopkundig Laboratorium.
- Cleveringa, J., 2000. Reconstruction and modelling of Holocene coastal evolution of the western Netherlands. Ph.D. thesis. Universiteit Utrecht.
- Delft Hydraulics, 1997. Analysis of the ESTMORF model. Z2039.
- Di Silvio, G., 1989. Modelling the morphological evolution of tidal lagoons and their equilibrium configurations. XXII Congress of the IAHR, Ottawa, Canada.
- Dongeren, A.R. van, H.J. de Vriend. 1994. A model of morphological behaviour of tidal basins. Coastal Engineering pp. 287-310.
- Eck, G.Th.M. van, 1999, De Schelde-atlas: een beeld van een estuarium, Schelde InformatieCentrum.
- Eysink, W.D. et al., 1998. Effecten van bodemdaling door gaswinning in en rond de Waddenzee, Morfologische, infrastructurele en economische aspecten, WL | Delft Hydraulics, Report H3099, december 1998, in: NAM-rapport Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee, Assen, ISBN 90-804791-2-8, December 1998
- Eysink, W.D., D.J.R. Walstra, M.J.F. Stive. 2001. Vergelijking van bestaande Lange Termijn Morfologische modellen. Mogelijkheden en beperkingen in gebruik en visie op ontwikkeling lange-termijn modellering. Z3005. WL | Delft Hydraulics.
- Fokkink, R.J. 1998. Morphological modelling of the Western Scheldt estuary. In: J.Dronkers and M.Scheffers. pp. 329-336.
- Gerritsen, F., H. de Jong, A. Langerak, 1991. Cross-sectional stability of estuary channels in the Netherlands. Proceeding 22-th International Conference on Coastal engineering ASCE New York. pp. 2922-2935.
- Groenewoud, M.D. 1997. Modelling morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Report Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering.
- Groenewoud, M.D., F.T.G. Tank, J.A. Roelvink, J. van de Graaff, H. Verbeek. 1997. Modelling of the morphodynamics of a sill in the Scheldt Estuary (The Netherlands). Combined Australasian Coastal Engineering and Ports conference, Christchurch, New Zealand. Vol II, 637-642.
- Holland, G. van. 1997. Hydrodynamica en morfodynamica van de monding van het Haringvliet. Validatie van modeltechnieken voor een intergetijde gebied. MSc. thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering.
- Jeuken, M.C.J.L., S.G.J. Aarninkhof, R. Bruinsma, G. van Holland en J.A. Roelvink. 2000. Modelling van de grootschalige bodemveranderingen in de voordelta van de Oosterschelde en Grevelingen. WL | DELFT HYDRAULICS, rapport Z2422.
- Jeuken, M.C.J.L. 2000. On morphological behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary. Phd. thesis.
- Jeuken, C., 2001. Verificatie van het cellen-concept Westerschelde op basis van historische gegevens. Z3078. WL | Delft Hydraulics.
- Jong, H. de, F. Gerritsen. 1984. Stability parameters of the Western Scheldt estuary. Proceeding 19-th Conference on Coastal engineering ASCE New York. pp. 3078-3093.
- Jong, J.E.A. de, 2000, Zandbalans Westerschelde en monding, periode 1955-1999. Notitie NWL-00.16. Rijkswaterstaat/Directie Zeeland.
- 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, pp. 687-698.
- Jong, K. de. 1998. Tidally averaged transport models. Ph. D. thesis.
- Kornman, B., A. Arends, D. Dunsbergen, 2000. Westerscheldemond 1970-2020. Een morfologische blik op de toekomst. RIKZ/2000.030. Rijkswaterstaat/RIKZ.
- Ledden, M. van, 2001, Modelling of sand-mud mixtures. Part II: A process-based sand-mud model. WL | DELFT HYDRAULICS (Z2840), Delft University of Technology.

- Lesser, G., 2000, Computation of Three-dimensional Suspended Sediment Transport within the DELFT3D-FLOW module. wl | delft hydraulics (Z2396), IHE Delft (Thesis HE066), The Netherlands.
- MARE, 2001, Reference scenarios and design alternatives. Parcel 2, subproduct 3. Z3029.20. WL | DELFT HYDRAULICS.
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2000. Lange Termijnvisie Schelde-estuarium. Cluster Morfologie. Onderzoek exogene factoren. MOD.611. Departement Leefmilieu en Infrastructuur. Administratie Waterwegen en Zeewezen.
- NAM (1998). Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee, Assen, ISBN 90-804791-2-8, December 1998
- Pwa, S.T., 1998. Waterbeweging en morfologie van slikken in de Westerschelde. Eindverslag. Rap-51.88. Witteveen-Bos.
- Roelvink, D., Boutmy, A. en Stam, J-M. 1998. A simple method to predict long-term morphological changes. Coastal Engineering, 1998, pp 3224-3237.
- Roelvink, J.A., M.C.J.L. Jeuken, G. van Holland, S.G.J. Aarninkhof, J.M.T. Stam, 2001. Long-term, process-based modelling of complex areas. Proc. of the 4th Conf. on Coastal Dynamics, pp. 383-392.
- Schoeman, P.K., 2000. Getijasymmetrie in de Westerschelde. Een 1D model onderzoek naar invloed van geometrie op getijasymmetrie. Z2644. Technische Universiteit Delft en WL | Delft Hydraulics.
- Schuttelaars, H.M., H.E. de Swart. 1996. An idealized long-term morphodynamic model of a tidal embayment. European Journal of Mechanics / B: Fluid. 15. pp. 55-80.
- Schuttelaars, H.M., H.E. de Swart. 1997. Cyclic bar behaviour in a nonlinear model of a tidal inlet. IAHR Congress.
- Schuttelaars, H.M., 1999. Modelleren van geulen, platen en drempels in de Westerschelde. Rapport R99-2. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht.
- Schuttelaars, H.M., H.E. de Swart. 2001. Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments. Journal of Geophysical Research - Oceans.
- Schuttelaars, H.M., 2001. Modelleren van geulen en platen in de Westerschelde. Rapport R01-05. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), Universiteit Utrecht.
- Spek, A. van der, 1994. Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Ph.D. thesis. Universiteit Utrecht.
- Spek, A.J.F. van der, 1997, Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands: simulation of paleo-tides in the Schelde estuary. Marine Geology, pp. 71-90.
- Steijn, R.C. 1996. Maasvlakte-2. Invloed van de vormgeving van Maasvlakte-2 op de grootschalige morfodynamica van de Nederlandse kust. Delft Hydraulics report H3059.
- Steijn, R.C. 1997a. Kustonder Delfland Goeree. Invloed van MV2 varianten op het kustonderhoud van Delfland en Goeree. Alkyon report A168.
- Steijn, R.C. 1997b. Morfodynamische berekeningen Beleidsanalyse Slikgat. Effecten van beheersmaatregelen op de onderhoudsbehoefte van de vaargeul. Alkyon report A214.
- Steijn, R. et al. 2000. Morfologisch Onderzoek Maasvlakte 2, Onderhoud zachte zeewering, grootschalige ontgroning en aanzanding Maasgeul. Alkyon/WL | Delft Hydraulics, Rapport A579/Z2861.
- Steijn, R., W.D. Eysink, G. van Holland, J. van de Graaff, 2001. Bandbreedte morfologische effectvoorspelling - MV2: een onderzoek ten behoeve van natuurtypering. A792 / Z3127. Samenwerkingsverband ALKYON / WL | DELFT HYDRAULICS / TUD.
- Stive, M.J.F., Z.B. Wang, A.W. van der Weck, H.F.P. van den Boogaard, M.J. Baptist, 1998. Definitiestudie Morfologische Dynamiek Westerschelde. Z2427. WL | Delft Hydraulics.
- Tank, F.T.G., P.G.J. Sistermans, M.D. Groenewoud, H. Verbeek. The morphodynamics of a sill in the Schelde Estuary (The Netherlands) and the influence of maintenance dredging activities. Water for a changing global community, 27th IAHR Congress. Theme B, Vol I, 695-700.
- Thoolen, P.M.C., 2000. Modelleren secundaire stroming en 3D sedimenttransport Westerschelde. Z2799. WL | Delft Hydraulics.
- Torenga, E.K., 2001. Stabiliteit van tweegeulensystemen in estuariua. Afstudeerverslag. Technische Universiteit Delft/Delft Cluster.
- Verbeek, H., M.H.P. Jansen, C.A.H. Wouters. 1998. Adaptation of 2DH sediment transport patterns using 3D hydrodynamic modelling. Oceans'98, IEEE/OES conference, Nice, France. 6 pp.

- Verbeek, H., Z.B. Wang, P.M.C. Thoolen. 1999. Secondary currents in estuarine morphodynamic modelling, a case-study of the Western Scheldt. In: River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, Italy. Vol. I. pp. 649-658.
- Verbeek, H., Z.B. Wang, H.M. Schuttelaars. 2000. A comparison between process-based and idealized morphodynamic models for the Western Scheldt case. 10th International conference of estuaries and coastal seas. Extended abstract.
- Wang, Z.B., R.J. Fokking, M. de Vries, A. Langerak. 1995. Stability of river bifucations in 1D morphodynamic models. Journal of Hydraulic Research. 33, 6. pp. 739-750.
- Wang, Z.B., T. Louters, H.J. de Vriend. 1995. Morphodynamic modelling for a tidal inlet in the Wadden Sea. Marine Geology 126. pp. 289-300.
- Wang, Z.B., 1997. Morfologische Interactie Westerschelde Estuarium en het Mondingsgebied. ASMITA-Westerschelde. een gedragsgeoriënteerde modellering. Z2253. WL | Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B., B. Karssen, R.J. Fokkink, A. Langerak. 1998. A dynamic-empirical model for estuarine morphology. Physics of Estuaries and Coastal Seas. In: J Dronkers and M Scheffers. 279-286.
- Wang, Z.B., C. Jeuken, H.J. de Vriend, 1999. Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries. A literature study and application to the Western Scheldt. Z2749. WL | Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B., A. Langerak, R.J. Fokkink. 1999. Simulation of long-term morphological development in the Western Scheldt. In: River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, Italy. Vol. II. pp. 367-376.
- Wang, Z.B., M.A.G. van Helvert, 2001. ESTMORF, A model for long-term morphological development of estuaries and tidal lagoons. Overall review of the development of the model. WL | delft hydraulics. Z3105.
- Wijngaarden, M. van, H. Verbeek. 1996. Modelling suspended sediment transport in the Rhine-Meuse estuary using a 2DH model. Congres ? Zuid-Afrika.
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuijper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen, Z.B. Wang, 2000. Lange Termijnvisie Schelde-estuarium. Cluster Morfologie. Uitvoeringsfase. Deel 1: Hoofdrapport en Deel 2: Appendices. Z2878. WL | Delft Hydraulics.