

Z 3596

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

RIKZ

Toepasbaarheid van ESTMORF als instrument voor beheer van buitendelta's

Bureaustudie met Haringvlietmonding als case

Verslag

Oktober 2003

60713
Z 3596

WL | Delft Hydraulics



C 143588

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

RIKZ

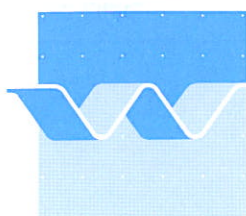
Toepasbaarheid van ESTMORF als instrument voor beheer van buitendelta's

Bureaustudie met Haringvlietmonding als case

Z.B. Wang

Verslag

Oktober 2003



wL | delft hydraulics

OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat
RIKZ

TITEL: Toepasbaarheid van ESTMORF als instrument voor beheer van buitendelta's

SAMENVATTING:

Dit rapport beschrijft de resultaten van een bureaustudie naar de toepasbaarheid van het lange-termijn morfologische model ESTMORF als instrument voor het beheer van buitendelta's. De studie is gedaan aan de hand van het geval van de Haringvlietmonding. De te beantwoorden vraag bij de studie is of ESTMORF in staat is de veranderingen van de beheersparameters in dit gebied onder invloed van een gewijzigd spui-beheer van de Haringvliet-sluizen te voorspellen, en zo ja hoe nauwkeurig.

Om de vraag te beantwoorden wordt elk beheersparameter beschouwd door in te gaan op:

- De exacte definitie van de parameter
- Hoe en of het af te leiden is uit de ESTMORF – uitvoer.
- Fysische processen en mechanismen die van belang zijn
- Vertegenwoordiging van de relevante fysische processen en mechanismen in de ESTMORF formulering
- De relevante menselijke ingrepen en hoe ze doorwerken
- Representatie van de ingrepen weergeven van de effecten door ESTMORF
- Voorspellingsvermogen / nauwkeurigheid
- Alternatieve instrumenten voor handen
- Aanbevelingen over wat nu best kan doen en wat kan best gedaan worden in de toekomst.

Samenvattend is geconcludeerd dat het ESTMORF model goed kan worden ingezet voor de voorspelling van de sediment-balans, de veranderingen van het areaal van het intergetijdegebied, en de vaargeuldiepte. Het model is niet geschikt voor de beheersparameters MKL, strandbreedtes en ligging van geulen en platen.

REFERENTIES: Opdrachtnummer: 71030731

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1	Z.B. Wang	5 september 2003		M.C.J.L. Jeuken	
2	Z.B. Wang	10 oktober 2003		M.C.J.L. Jeuken	T. Schilperoort
PROJECTNUMMER		Z3596			
TREFWOORDEN:		Lange-termijn morfologie, ESTMORF, Buitendelta, Haringvlietmonding, Beheersparameters			
AANTAL BLADZIJDEN		35			
VERTROUWELIJK		☐ JA, tot (datum)		☒ NEE	
STATUS:		☐ VOORLOPIG		☐ CONCEPT	
				☒ DEFINITIEF	

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Achtergrond	1—1
1.2	Doelstelling.....	1—1
1.3	Aanpak en opzet van het rapport	1—2
2	Haringvlietmonding en ESTMORF	2—1
2.1	Inleiding.....	2—1
2.2	Zand en slib.....	2—1
2.3	2D/3D stroming en golfwerking.....	2—2
2.4	Interactie binnen- en buitengebied.....	2—3
2.5	Intergetijdegebied en ondiep water gebied	2—4
2.6	Hoog-dynamische gebieden.....	2—4
2.7	Trendbreuk en tijdschaal.....	2—5
3	Voorspelling van beheerparameters.....	3—1
3.1	Inleiding.....	3—1
3.2	Algemene opmerkingen.....	3—2
3.3	Sediment balans	3—4
3.4	MKL	3—4
3.5	Strandbreedte	3—5
3.6	Locatie platen en geulen	3—5
3.7	Areaal intergetijdegebied en ondiep water	3—6
3.8	Vaargeul diepte	3—7
4	Gebruik en voorspelkracht van ESTMORF	4—1
4.1	Inleiding.....	4—1

4.2	Modelrand en randvoorwaarden	4—1
4.3	Calibratie en validatie	4—2
4.4	Parameter setting	4—3
5	Conclusies en aanbevelingen.....	5—1
6	Referenties	6—1
A	ESTMORF model	A—1
A.1	Inleiding.....	A—1
A.2	Model principe en functionaliteit.....	A—1
A.2.1	Algemeen model concept	A—1
A.2.2	Samenvatting model formulering	A—2
A.1.1	Speciale functionaliteit	A—3
A.2	Model formulering en fysische processen	A—4
A.2.1	Hydrodynamica.....	A—4
A.2.2	Empirische relaties.....	A—5
A.2.3	Sediment transport.....	A—5
A.3	Model resultaten en verwerking	A—5
A.4	Toepassingen /Ervaringen.....	A—7
B	Vragen over toepasbaarheid van ESTMORF	B—1

I Inleiding

I.1 Achtergrond

Ingrepen in zeegaten beïnvloeden de morfologie van het gebied, en daarmee het zanddelend systeem en gebruiksfuncties. De beheerder wil zicht hebben op mogelijke veranderingen als gevolg van voorgestelde ingrepen. De veranderingen dienen uitgedrukt te worden in beheersparameters, dit zijn kwantificeerbare grootheden die de staat van een bepaalde functie uitdrukken.

In het deelproject K2005*Voordelta, onderdeel van het KUST2005 programma, wordt onder andere gekeken naar de mogelijke inzet van Lange-termijn modellen (LT-modellen) bij de beantwoording van beheersvragen over de effecten van ingrepen in zeegaten. Hiertoe worden verschillende modellen ingezet en/of geanalyseerd. De gevolgen van een gewijzigd spuibeheer van de Haringvlietsluizen dienen daarbij als casus. De in 1998 voorgestelde wijziging (KIER) zal ook invloed hebben op de beheersparameters (let wel niet op de keuze voor deze parameters) die verband houden met de gebruiksfuncties als veiligheid, recreatie, ecologie en scheepvaart. In Tabel 3.1 staan de thema's (gebruiksfuncties), aspecten (beheersvragen) en de beheersparameters voor de Haringvlietmonding.

Naar aanleiding van gebiedskennis over de Haringvlietmonding (Stam et al, 2002), modelkennis (concepten waarop een model gebaseerd is) en modelervaring (o.a. ESTMORF voor de Westerschelde en monding) zijn er vragen geformuleerd m.b.t. de inzet van ESTMORF voor de simulatie van beheersparameters in zeegaten in het algemeen, en in de Haringvlietmonding in het bijzonder. Voordat een ESTMORF schematisatie van de Haringvliet (incl. monding) gemaakt wordt, is het belangrijk deze vragen verder te analyseren.

De 12 vragen, zoals gesteld door RIKZ, zijn gegeven in Appendix B.

I.2 Doelstelling

In de huidige bureaustudie worden de door het RIKZ gestelde vragen (Appendix B) beantwoord. Het doel van de huidige studie is om duidelijk te maken wat de verwachting is van de inzet van ESTMORF m.b.t. het voorspellen van de effecten van een gewijzigd spuibeheer van de Haringvlietsluizen in termen van beheersparameters. Indien de verwachtingen nog niet aan de eisen voldoen zal n.a.v. de analyse aangegeven worden wat de oorzaken en mogelijke oplossingen (ontwikkelingsrichtingen) zijn. Het gaat dus voornamelijk om het beantwoorden van de volgende twee hoofdvragen:

- Welke beheersparameters kan ESTMORF simuleren voor a) specifiek de Haringvlietmonding en b) algemeen voor de Nederlandse kust?
- Wat is de betrouwbaarheid/nauwkeurigheid van de modeluitkomsten en wat zijn de kritieke validatiepunten ?

I.3 Aanpak en opzet van het rapport

Centrale vraag is voor welke beheersparameters ESTMORF ingezet kan worden en wat het verwachte voorspellingsvermogen is (Vraag 1 in Appendix B). Er zijn een aantal achterliggende, aanverwante en aanvullende vragen (3 t/m 8 in Appendix B) gesteld. Het antwoord op deze vragen vormt een deel van de onderbouwing van het antwoord op de centrale vraag. Ieder van deze vraag heeft betrekking op een aspect van een gebied zoals de Haringvlietmond en de vraag is of ESTMORF in staat is daarmee om te gaan. In hoofdstuk 2 worden eerst deze achterliggende vragen bediscussieerd. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens ingegaan op de centrale vraag. Aanvullende vragen die betrekking hebben op de robuustheid / voorspellingskracht en mogelijkheden op basis van voorgaande modelberekeningen in andere gebieden worden in hoofdstuk 4 behandeld. In hoofdstuk 5 worden de conclusies van de studie en de daaruit voortvloeiende aanbevelingen kort samengevat.

In appendix A is een korte beschrijving van ESTMORF gegeven, waarbij de nadruk is gelegd op aspecten die bij het beantwoorden van de gestelde vragen van belang zijn. Voor verdere omschrijving van het ESTMORF model wordt verwezen naar de overige rapporten. Een overzicht van alle ESTMORF rapporten en publicaties is gegeven in Wang en Van Helvert (2001)

2 Haringvlietmonding en ESTMORF

2.1 Inleiding

Voordat de hoofdvraag wordt behandeld in hoofdstuk 3 worden in dit hoofdstuk eerst de achterliggende vragen (3 t/m 8) beantwoord. Ieder van deze vragen heeft betrekking op een aspect van het fysische systeem, waarbij twijfel bestaat of ESTMORF in staat is ermee om te gaan. De vragen zijn gesteld vanuit het specifieke geval van de Haringvlietmond, maar de meeste vragen zijn ook van toepassing op buitendelta's in het algemeen. Hiermee vormen zij ook een deel van de onderbouwing van de antwoorden op vraag 1 in hoofdstuk 3.

In dit hoofdstuk wordt per paragraaf een vraag behandeld. Eerst wordt de oorspronkelijke vraag herhaald, gevolgd door het antwoord.

2.2 Zand en slib

Vraag 3: *Sediment in de Haringvlietmonding bestaat voor een aanzienlijk deel uit slib. Een groot aantal (beheers)vragen opgesteld door de Werkgroep Morfologie & Kwaliteit van het project De KIER omvat slibprocessen. Metingen in het gebied (MEDUSA metingen en boringen) laten zien dat sinds de afsluiting in 1970 een dik pakket slib is afgezet. De vraag is of het ESTMORF model in staat is om met slibfracties om te gaan en of het ook in staat is met zand-slib combinaties om te gaan.*

De volgende opmerkingen kunnen worden gemaakt met betrekking tot het omgaan met slib en zand-slib combinatie door ESTMORF:

- In principe zijn er ervaringen met de toepassing ESTMORF in zowel slibarme als slibrijke gebieden. Van de toepassingen van ESTMORF tot nu toe zijn de Nederlandse gebieden slibarm. In zowel de Westerschelde als het Friesche Zeegat is de morfologie voornamelijk bepaald door zand. De toepassingen in het buitenland hebben echter vaak betrekking op slibrijke gebieden. Als voorbeelden kunnen Southampton Water en het Humber Estuarium in Engeland worden genoemd. Het model werkt voor zowel zandige als slibrijke systemen. Korte beschrijvingen van de genoemde toepassingen zijn te vinden in Appendix A.
- Het model maakt momenteel geen onderscheid tussen verschillende sedimentfracties. De enige modelparameter die expliciet de eigenschappen van sediment weergeeft is de verticale uitwisselingscoëfficiënt. Deze parameter heeft voornamelijk invloed op de morfologische tijdschaal. De waarde hiervan wordt ook meestal bepaald door calibratie m.b.t. de morfologische tijdschalen. Het is mogelijk dat de coëfficiënten in de empirische relaties impliciet ook de invloed van het type van sediment weergeeft. Deze zijn de mogelijke verklaringen dat het model voor zowel slibarme als slibrijke gebieden werkt.
- Twee beperkingen van het model kunnen worden genoemd:
 - Veranderingen van bodemsamenstellingen kunnen niet door het model worden weergegeven.

- Het model maakt geen onderscheid tussen tijdschaal van sedimentatie en van erosie. Voor slibbodem is dit niet voldoende omdat het erosieproces veel sneller of langzamer kan verlopen dan het sedimentatieproces, afhankelijk van de mate van consolidatie van de bodem.
- Een uitbreiding van het model is in principe mogelijk. Op basis van het inzicht verkregen in het onderzoek van Van Ledden (2003) wordt voorgesteld een 2-fractie sediment transport model te implementeren als uitbreiding van ESTMORF. Om ervaringen op te doen wordt aanbevolen deze uitbreiding eerst in ASMITA te implementeren en te evalueren. ASMITA is gebaseerd op hetzelfde principe als ESTMORF, maar eenvoudiger qua opzet. Als de uitbreiding tot de beoogde resultaten leidt kan de uitbreiding in ESTMORF worden geïmplementeerd. Met deze uitbreiding wordt verwacht dat de morfologische tijdschalen beter door het model wordt weergegeven, en dat een voorspelling van de bodemsamenstelling kan worden gedaan.

2.3 2D/3D stroming en golfwerking

Vraag 4: *Stroming, sedimenttransport en morfologie in zeegaten hebben veelal een twee- of driedimensionaal karakter, terwijl ESTMORF en SOBEK-MOR ééndimensionale modellen zijn. In hoeverre kan de fysica en dynamica van een dergelijke meer dimensionaal systeem weergegeven worden door een één-dimensionaal netwerk model? In hoeverre vormt de afwezigheid van golfmodellering een beperking?*

Het gaat hier om weergeven van 2D/3D stromingen en transporten en golfwerking door 1D-netwerk modellen. De volgende opmerkingen worden gemaakt:

- In principe heeft een 1D-netwerk model de volgende beperkingen:
 - Stroming en transport gaan in de richting van de as van de takken van het netwerk. Uitwisseling van water en sediment in de dwarse richting tussen de takken is niet mogelijk.
 - Het model kan geen nieuwe geulen genereren. Ontstaan van nieuwe geulen kan dus niet worden weergegeven.
 - Golven en golf-gedreven stroming worden niet expliciet meegenomen, het morfologische effect ervan wordt impliciet meegenomen tijdens de calibratie, omdat de coëfficiënten in o.a. de empirische relaties op basis van velddata worden bepaald.
- Toepasbaarheid van een morfologisch netwerkmodel is afhankelijk of er per geul / gebied een dominante stroomrichting te definiëren is.
- Golf invloed wordt in het model alleen ten dele meegenomen via de empirische relaties voor de hoogtes van het intergetijdegebied.
- In de huidige situatie is er een duidelijke plaat geul structuur in de Haringvlietmond (zie Fig.A.4). De stroming in de geulen is vooral langs de geulen. Grote veranderingen van de plaat geul structuur worden niet verwacht zolang de wijziging van het lozingsprogramma van de sluizen niet verder dan het getemde getij gaat. Daarom wordt verwacht dat het toepassen van een 1D netwerkmodel zoals ESTMORF voor dit gebied mogelijk is. Dit geldt echter niet algemeen voor alle buitendelta's. In de buitendelta's van de zeegaten in de Waddenzee bijvoorbeeld, verplaatsen en vervormen de geulen voortdurend. Dan is ESTMORF niet goed toe te passen. Dit is ook de reden waarom bij het model voor het Friesche Zeegat alleen de resultaten in het bekken zijn gebruikt (Wang et al, 1998).

2.4 Interactie binnen- en buitengebied

Vraag 5: *Door een wijziging van het spuibeheer neemt de interactie tussen het binnengebied (het Haringvliet) en het buitengebied (de Haringvlietmonding) weer toe. Voor zowel het binnengebied als het buitengebied is een voorspelinstrumentarium gewenst waarbij deze interactie wordt meegenomen. Is ESTMORF ook geschikt voor bekken met obstakels (i.e. de Haringvlietssluisen), die een wezenlijk verschil tussen de Haringvlietmonding en de Westerscheldemonding vormen? Is ESTMORF de meest geschikte modelkeus voor een empirische benadering bij de koppeling tussen binnengebied en buitengebied? Hoe verhoudt Sobek-Mor (meer gericht op de korte termijn / middellange termijn) zich tot ESTMORF (meer gericht op de middellange termijn / lange termijn)?*

Deze vraag bevat twee aspecten: de representatie van interactie tussen binnen en buiten gebied en hoe ESTMORF zich verhoudt t.o.v. SOBEK.

- De interactie tussen het gebied buiten de Haringvlietssluisen en het gebied daarbinnen gaat via de waterbeweging en de sediment uitwisseling. SOBEK, dat als waterbewegingsmodule in ESTMORF wordt gebruikt, is goed in staat de werking van de sluisen in verschillende situaties / omstandigheden te simuleren. In het IVB project is SOBEK al gebruikt om de Kier en het getemde tij te simuleren. Het model heeft natuurlijke wel de beperking dat dichtheidstroming (zout/zoet) niet kan worden meegenomen. Hiermee is de interactie via waterbeweging goed gedekt. Met betrekking tot sediment transport is het plausibel te veronderstellen dat alleen zwevend transport door de sluisen kan optreden en dat er ter plaatse van de sluisen geen uitwisseling met de bodem plaats vindt. Dit kan ESTMORF goed weergeven. De werking hiervan is in de pilot toepassing van ESTMORF voor het Noordelijk Delta Bekken (NDB) al aangetoond (Wang, 2000).
- SOBEK-MOR kan alleen zand transport simuleren en is dus alleen van toepassing in het zandige deel van het NDB. In gebieden waar slib de eigenschap van de bodem bepaalt is SOBEK-MOR niet te gebruiken. Daarom kan worden geconcludeerd dat ESTMORF te kiezen is boven SOBEK-MOR wanneer beide gebieden in een model moeten worden meegenomen. Het meenemen van slibrijke gebieden door SOBEK-MOR is een bijna onoplosbaar probleem. Op dit moment wordt het SOBEK-MOR model gebruikt binnen het kader van het IVB project, maar men kijkt alleen naar de resultaten van het model in het zanddeel van het NDB (t/m Nieuwe Merwede).
- Het toepassen van ESTMORF voor het NDB geeft ook een aantal problemen zoals gebleken bij de pilot-toepassing. Eén daarvan is dat in het rivierstroming-gedomineerde deel andere evenwichtsrelaties gelden dan het getij-gedomineerde deel. Een ander is dat het model veel moeite had om met het kleine intergetijdegebied in het rivier deel om te gaan. Beide problemen zijn echter goed op te lossen door de software aan te passen. Voor het eerste probleem moet het programma worden uitgebreid zodat invoeren van verschillende evenwichtsrelaties per deelgebieden mogelijk wordt. Voor het tweede probleem moet er de mogelijkheid worden ingebouwd om in bepaalde vakken het intergetijdegebied buiten beschouwing te laten.

2.5 Intergetijdegebied en ondiep water gebied

Vraag 6: *Eerder is al geconstateerd dat de ontwikkeling van intertijdengebieden nog onvoldoende gereproduceerd kan worden (in vergelijking met de ontwikkeling van geulen). Hoe realistisch is ESTMORF (de schematisatie van het dwarsprofiel) voor ondiepe gebieden die niet droogvallen (in dergelijke vakken is geen profiel meer opgegeven)?*

Het gaat hier dus om de representatie van ondiepe gebieden.

- De schematisatie van dwarsprofielen is grof m.b.t. het geuldeel. Het profiel onder laagwater wordt weergegeven via een trapezium waarvan de breedte (dus ook diepte van de onderkant) vaak arbitrair gekozen is (bij een 1D model gaat het immers alleen om het stroomvoerende oppervlak en de hydraulische straal). In principe wordt het ondiepe water gebied niet apart door het model gesimuleerd.
- M.b.t. intergetijdegebied zijn er wel nog verbeteringen gerealiseerd voor het Westerschelde model (Wang en Helvert, 2000). De verbetering is vooral gerealiseerd door de evenwichtshoogtes van het intergetijdegebied beter te calibreren en door de verwerking van storten in de verandering van dwarsprofielen te verbeteren. Ook zijn er concrete aanbevelingen gedaan voor verder verbetering van ESTMORF op dit aspect (Wang en Van Helvert, 2001). De belangrijkste hiervan is een implementatie van een extra empirische relatie m.b.t. de breedte-diepte verhouding van geulen (Wang en Helvert, 2000).
- Informatie over de veranderingen van het ondiepe water gebied kan alleen worden verkregen via de 2D-naiverwerking van de ESTMORF resultaten (Zie appendix A). Dit geeft over het algemeen een goede trend, maar de kwantitatieve nauwkeurigheid is niet goed weer te geven. De schematisatie van de profielen, dus de keuze van de ligging van het onderste punt van het trapezium is dan wel van belang (liefst zodanig kiezen dat de helling van het ondiepe gebied zo goed mogelijk in het model is weergegeven). De 2D naiverwerking is toegepast bij het Westerschelde model (Wang et al, 1995) en bij het Humber model (zie Fig.A.3)

2.6 Hoog-dynamische gebieden

Vraag 7: *De Hinderplaat (de grootste plaat in de Haringvlietmonding) vertoont sinds de afsluiting in 1970 een groei, daarnaast heeft er ook een verandering in de oriëntatie van deze plaat plaats gevonden. Door het reduceren van het getijdenprisma zijn oude geulen in het gebied dichtgeslibd. Bij (gedeeltelijke) heropening van de sluizen is de verwachting dat nieuwe geulen gevormd zullen worden. Kan een dergelijk hoog dynamisch gebied zoals de Haringvlietmonding, waar platen/geulen ontstaan/verdwijnen/draaien door ESTMORF en/of SOBEK-MOR gesimuleerd worden?*

Deze vraag gaat over omgaan met hoog-dynamische gebieden door 1D netwerk modellen zoals ESTMORF en SOBEK-MOR.

- Een kenmerk /beperking van het 1D-netwerk model is dat de netwerkstructuur van tevoren vastligt, en niet verandert tijdens de simulatie met het model. In principe kan het model ook slecht omgaan met bijvoorbeeld draaien / verplaatsen van de geulen waardoor de geulen vaak van lengte veranderen.

- Het ontstaan van nieuwe geulen of platen kan niet door het model worden gesimuleerd. Wel kan het model in principe verruiming / verondieping van bestaande geulen en uitbreiding / afbraak van bestaande platen simuleren.
- Verdwijnen van geulen kan het model enigszins weergeven door (sterke) sedimentatie en verdwijnen van platen via erosie.
- Platen worden in het model toegekend aan de geulen in het model. De schematisatie moet op het juiste schaalniveau zijn. Dan is het ontstaan van bijv. platen weer te geven door sedimentatie / groei van intergetijdegebied.

2.7 Trendbreuk en tijdschaal

Vraag 8: *Bij een mogelijke historische validatie (hindcast) zal voornamelijk een sedimentarend systeem a.g.v. een reductie in getijdenprisma gevalideerd worden, bij een voorspelling zal juist een eroderend systeem a.g.v. een toename in getijdenprisma gemodelleerd moeten worden. In hoeverre zegt een validatie voor een importerend systeem iets over modelprestaties voor een exporterend systeem?*

Deze vraag gaat over omgaan met een trendbreuk in de sedimenthuishouding op de ruimteschaal van binnengebied en buitengebied. Twee aspecten zijn te onderscheiden: de trend van de veranderingen en de relevante morfologische tijdschalen.

- Met betrekking tot het eerste aspect moet het model goed in staat zijn de trendbreuk te simuleren. Essentieel hierbij is dat de juiste evenwichtsrelaties zijn gebruikt. De data met betrekking tot de sedimentbalans (Stam et al, 2002) laten zien dat een nieuw evenwicht na de bouw van de Haringvlietsluizen bijna bereikt is. Dit betekent dat er genoeg historische gegevens zijn voor de calibratie van deze evenwichtsrelaties.
- De morfologische tijdschaal is lastiger. Dit hangt samen met het omgaan met slib. Als het model gekalibreerd is voor alleen de sedimentatie periode, wordt dan dezelfde tijdschaal ook gehanteerd voor de latere periode waarin erosie optreedt. Als voor slibrijke gebieden de tijdschalen voor sedimentatie en voor erosie inderdaad anders zijn zal dit een fout veroorzaken in de snelheid waarin de veranderingen optreden (niet de trend).

3 Voorspelling van beheerparameters

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de belangrijkste vraag behandeld. Deze vraag luidt:

In (Stam et al, 2002) wordt gesteld dat de volgende beheersparameters van belang zijn in de Haringvlietmonding (zie tabel 3.1): sedimentvolume in de monding, MKL, strandbreedte, locatie platen en geulen, areaal intergetijdengebied en vaargeul diepgang. Tevens is aangegeven welke processen (b.v. storm en getij) de ontwikkeling van de beheersparameters in de monding mogelijk beïnvloeden hebben. Bij de vraag welke beheersparameters door ESTMORF gesimuleerd kunnen worden gaat het niet alleen om de mogelijkheid om de parameters als output te garanderen, maar ook om na te gaan of de processen die de beheersparameter beïnvloeden in het model in rekening worden gebracht; welke procesmodules en welke empirische relaties worden toegepast en zijn deze toereikend?

Tabel 3.1 Beleidsthema en toestandsparameters

Beleidsthema	Beheersparameter
Veiligheid en Kustlijnhandhaving	Sedimentbalans in de monding
	MKL
Recreatie	Strandbreedte
Ecologie	Locatie platen en geulen
	Areaal intergetijdgebied
Scheepvaart	Vaargeul diepte

Om de vraag te beantwoorden wordt hier onder per beheersparameter een beschouwing gedaan die ingaat op

- De exacte definitie van de parameter.
- Hoe en of deze is af te leiden uit de ESTMORF – uitvoer.
- Welke fysische processen en mechanismen van belang zijn.
- Hoe goed de relevante fysische processen en mechanismen zijn vertegenwoordigd in de ESTMORF formulering.
- Welke menselijke ingrepen van belang zijn en hoe deze doorwerken.
- Of ESTMORF de ingrepen kan representeren en op de goede manier de effecten kan simuleren.
- Voorspellingsvermogen / nauwkeurigheid.
- Welke alternatieven er zijn naast ESTMORF.
- Wat nu de beste aanpak is en wat er in de toekomst mogelijk is.

3.2 Algemene opmerkingen

Voorspellingsvermogen

Bij de evaluatie van het voorspellingsvermogen van het model voor de beheersparameters moet men onderscheid maken tussen het voorspellen van de autonome ontwikkeling en het voorspellen van de effecten van veranderde natuurlijke ontwikkelingen zoals versnelde zeespiegelrijzing, of de effecten van menselijke ingrepen. Zoals ook voor andere typen morfologische modellen geldt, is het voorspellen van autonome ontwikkelingen veel moeilijker dan het voorspellen van effecten van natuurlijke veranderingen, of menselijke ingrepen. Voor het voorspellen van autonome ontwikkelingen worden de modelresultaten in absolute zin gepresenteerd en geïnterpreteerd. Voor het voorspellen van effecten wordt vaak gebruik gemaakt van een relatieve beschouwing, d.w.z. veranderingen t.o.v. een referentie. Voor modellen als ESTMORF, waarin het bestaan van een morfologisch evenwicht als uitgangspunt wordt gehanteerd, kan de autonome ontwikkeling in strikte zin per definitie niet worden voorspeld. Het bestaan van een morfologisch evenwicht houdt namelijk in dat als de hydrodynamische condities niet meer veranderen en als de morfologische toestand niet afwijkt van het evenwicht er dan geen morfologische ontwikkelingen zullen optreden. Het model kan wel, zoals bewezen bij de toepassingen in de Westerschelde en in de Humber (Jeuken et al, 2003), autonome ontwikkelingen t.g.v. de 18.6 jarig cyclus in het getij simuleren. Het voorspellingsvermogen van ESTMORF, zoals geëvalueerd in de volgende paragrafen, hebben betrekking op effecten t.g.v. natuurlijke veranderingen, zoals versnelde zeespiegelrijzing, of effecten t.g.v. menselijke ingrepen.

Een kwantitatieve uitspraak over de nauwkeurigheid van voorspellingen voor de beheersparameters is moeilijk. Ervaringen met de toepassingen van het model zijn daarvoor nog te beperkt. Bovendien zal de nauwkeurigheid van voorspellingen van situatie tot situatie verschillen afhankelijk van een aantal factoren. De fysische omstandigheid van het beschouwde systeem maakt ESTMORF minder of beter geschikt voor de toepassing. De kwantiteit en kwaliteit van de beschikbare gegevens voor calibratie van het model bepalen ook het voorspellingsvermogen van het model voor een bepaalde toepassing. De uitspraken in de volgende paragrafen zijn dus ten dele gebaseerd op ervaringen met het model tot nu toe en ten dele gebaseerd op “expert judgement”, waarbij de toepassing op de Haringvlietmonding centraal staat.

Ingrepen

Een aspect van de beschouwing betreft de relevante menselijke ingrepen. De vraag is of ESTMORF in staat is de effecten van deze ingrepen goed mee te nemen. Het antwoord hierop is eigenlijk voor elk beheersparameters hetzelfde. Daarom wordt deze beschouwing hier eenmalig gedaan en niet meer herhaald bij alle beheersparameters.

De relevante ingrepen die in deze analyse aan bod komen zijn:

- Verandering lozingsprogramma Haringvlietstuizen.
- Baggeren / storten
- Landaanwinning.

SOBEK, gebruikt als stromingsmodule in ESTMORF, is in staat de verschillende lozingsprogramma's (huidig, kier, getemd getij) van de Haringvlietsluizen te simuleren. Daarmee is het effect van de verandering van het lozingsprogramma op de waterbeweging (getijvolume, hoog- en laagwater) goed meegenomen. Het 1D model kan niet de dichtheidstroming t.g.v. de toegenomen zoutindringing meenemen. Uitwisseling van sediment door de sluizen kan goed worden meegenomen door de sedimentuitwisseling tussen de waterkolom en de bodem lokaal bij de sluizen uit te schakelen. Kortom, ESTMORF moet goed in staat zijn de effecten van de verandering van het lozingsprogramma van de Haringvlietsluizen te representeren, behalve wanneer de dichtheidsstroming belangrijk is. Binnen de sluizen zal de dichtheidstroming gepaard gaan met gelaagdheid bij de kier en het getemde getij, omdat zout water ingelaten wordt en getijstroming beperkt blijft. In de Haringvlietmonding zal het effect van dichtheidstroming niet toenemen. Met dit aspect is al enige ervaring opgedaan in de pilot-toepassing van ESTMORF voor het NDB (Wang, 2000). Zowel de huidige situatie (Lozingsprogramma 84) als de situatie waarbij de sluizen helemaal open is werden daarbij gesimuleerd.

Baggeren en storten moeten geen probleem zijn. ESTMORF heeft voldoende faciliteiten om dit type ingrepen goed mee te nemen, zoals al is bewezen in de toepassing van het model in de Westerschelde. Gedurende een berekening kunnen baggeren en storten zowel op de geulbodem als op de geulwand worden meegenomen, maar geen baggeren/storten op het intergetijdegebied. Dit betekent dat een strandsuppletie alleen via de aanpassing van de initiële modelschematisatie mee te nemen is. Een software aanpassing is nodig als men herhaaldelijke strandsuppletie tijdens de simulaties wil meenemen.

Landaanwinning is weer te geven via aanpassing van de modelschematisatie, of door weglaten van bepaalde rekenvakken, of door aanpassen van de dwarsprofielen van de vakken. Met dit type ingrepen is voldoende ervaring opgedaan, vooral in het Humber estuarium, waarbij zowel landaanwinning als ontpoldering (omgekeerd) zijn meegenomen. Tot nu toe is er geen probleem geweest met de representatie van dit type ingrepen.

Wel kan men zich afvragen of er grenzen zijn waarbij het model de beschouwde ingrepen niet meer aankan. Van baggeren /storten en landaanwinning worden deze grenzen in de praktijk meestal niet bereikt. Baggeren en storten zijn vaak bedoeld om het systeem te onderhouden (vaargeulonderhoud, kustsuppletie, ...). Zelfs bij verdieping van vaargeulen zal men in het algemeen niet toelaten dat het systeem wezenlijk anders wordt. Het laatst geldt ook bij landaanwinning. In het geval van de verandering van het beheer van de Haringvlietsluizen is het wel denkbaar dat de grenzen van het model worden overschreden. Bij heel grote veranderingen kan de plaat-geul structuur in het gebied wezenlijk gaan veranderen, waarbij de 1D-netwerk structuur van het model beperkingen oplegt. Een ander voorbeeld is de vaargeuldiepte die in belangrijke mate bepaald wordt door de locatie en hoogte van de drempel (overgang vloed- en ebdominantie). Een grote verandering van het lozingsprogramma van de sluizen kan de locatie van de drempel veranderen, wat ESTMORF niet zou kunnen weergeven. Verwacht wordt dat zowel de optie kier als het getempte getij niet zo een grote verandering zal veroorzaken.

Samengevat wordt geconcludeerd dat er weinig probleem wordt verwacht met de representatie van ingrepen door ESTMORF bij de toepassing voor de Haringvlietmonding. Twee zaken vereisen de aandacht omdat ze niet goed door ESTMORF kunnen worden

weergegeven: dichtheidstroming t.g.v. zout indringing in het binnengebied en eventuele verplaatsing van de drempel in de vaargeul.

3.3 Sediment balans

Definitie	Het gaat eigenlijk om de verandering van de totale hoeveelheid van sediment in het gebied, totale sedimentatie /erosie dus, of wel sediment balans.
ESTMORF-uitvoer?	Ja. Direct beschikbaar in de standaard ESTMORF uitvoer.
Relevante processen / mechanismen	Stroming t.g.v. getij en afvoer door sluizen, golven en golfgedreven stroming, zandtransport, slibtransport. Morfologie wordt bepaald door netto transport, waarvoor zaken als getijasymmetrie belangrijk zijn.
Representatie processen en mechanismen in ESTMORF	Basis formulering in ESTMORF die relevant is voor deze parameter, is de empirische relaties voor het morfologische evenwicht. Vooral de evenwichtsrelatie voor de geulen is hierbij van belang. Voor de onderbouwing / validatie moet er een link gelegd worden tussen de fysische mechanismen (getij asymmetrie) die netto transport naar of uit het gebied bepalen en het transportmechanisme in ESTMORF: sediment transport wordt aangedreven door een gradiënt van 'zandhonger'. Een analyse op het schaalniveau van het hele getijdebekken laat zien dat het mechanisme in ESTMORF en het fysische mechanisme meestal kwalitatief goed met elkaar overeenkomen: veranderingen die tot zandhoger leiden veroorzaken ook vloeddominantie, en vice versa. Nadere studie hierover is nu gaande in een afstudeerproject bij de TUD.
Relevante ingrepen	• Verandering lozingsprogramma Haringvlietsluizen • Baggeren / storten • Landaanwinning
Voorspellingsvermogen	ESTMORF kan deze parameter goed voorspellen. Dit geldt vooral op schaal van grote deelgebieden (In de Westerschelde op lodingsvak niveau). Een goed gecalibreerd model moet een nauwkeurigheid van orde 20% kunnen halen voor veranderingen over decennia, zoals gebleken bij de Westerschelde toepassing.
Alternatieven	ASMITA, Delft3D-MOR, SOBEK-MOR.
Aanbeveling	ESTMORF gebruiken voor deze parameter / aspect. Voor lange-termijn voorspellingen is ESTMORF op dit moment het beste model voor dit aspect.

3.4 MKL

Definitie	Positie van de kustlijn t.o.v. die in 1990 (BKL). De positie van de kustlijn is bepaald door de hoeveelheid zand in een gebied vanaf de duinvoet, dat symmetrisch is t.o.v. het gemiddelde laagwater in de verticale richting (zie Van Koningsveld en Mulder et al, 2002).
ESTMORF-uitvoer?	Er is in principe een link met de ESTMORF uitvoer m.b.t. het intergetijdegebied. Door veranderingen van het intergetijdegebied te bekijken kan men iets afleiden over de positie van b.v. de NAP-lijn uit de resultaten van ESTMORF. Maar een verandering van MKL kan ook een gevolg zijn van veranderingen in het normaal droogdeel (boven HW) en van veranderingen van het ondiepe water gebied. Alleen via de 2D naverwerking zal men de veranderingen van MKL echt volgens de definitie afleiden.
Relevante processen /	• Golven • Golf gedreven stroming en transport

mechanismen	• Extreme stormen.
Representatie in ESTMORF	Evenwicht van intergetijdegebied is in ESTMORF alleen gerelateerd aan het getijverschil. Daarom wordt niet verwacht dat de relevante fysische processen die MKL bepalen voldoende in ESTMORF is vertegenwoordigd.
Relevante ingrepen	• Baggeren / storten. • Landaanwinning. • Verandering lozingsprogramma sluizen.
Voorspellingsvermogen	Gering
Alternatieven	UNIBEST, Delft3D, PONTOS
Aanbeveling	ESTMORF niet gebruiken voor deze parameter. Andere pakketen zoals kustlijn modellen hiervoor gebruiken.

3.5 Strandbreedte

Definitie	Onderscheid tussen totale strandbreedte en droge strandbreedte. Totale strandbreedte: afstand tussen duinvoet en GLW (NAP-1.3 m bij Haringvlietmond) Droge strandbreedte: afstand tussen duinvoet en GHW (NAP+1 m bij Haringvlietmond)
ESTMORF-uitvoer?	Een link is alleen te maken via de verandering van intergetijdegebied in de ESTMORF resultaten. In principe kan uit de ESTMORF resultaten de verandering van de positie van LW en HW lijn worden afgeleid. De verandering van de positie van duinvoet kan echter niet worden afgeleid omdat ESTMORF alleen het natte deel onder GHW simuleert. Men moet zich verder realiseren dat er in werkelijkheid een groot verschil is tussen kust intergetijdegebied en platen, zowel fysisch als qua waarde voor het ecologische systeem. In ESTMORF wordt dit verschil echter niet gemaakt.
Relevante processen / mechanismen	Zoals die bij MKL + processen die de ontwikkeling van het droge deel bepalen zoals wind gedreven sediment transport, stormen die windopzet en extreme golf condities veroorzaken.
Representatie in ESTMORF	Voor het natte deel idem als bij MKL. Voor het droge deel helemaal niet.
Relevante ingrepen	• Baggeren / storten. • Verandering lozingsprogramma sluizen. • Landaanwinning.
Voorspellingsvermogen	Voor het natte deel klein. Voor totale en droge strandbreedte helemaal niet.
Alternatieven	UNIBEST, Delft3D, PONTOS
Aanbeveling	ESTMORF niet gebruiken maar andere pakketen gebruiken.

3.6 Locatie platen en geulen

Definitie	Het onderscheid tussen platen en geulen is gedefinieerd aan de hand van inundatiefrequenties.
ESTMORF-uitvoer?	Intergetijdegebied in ESTMORF is gerelateerd aan de rekenvakken in het model. In principe is er dus niet direct informatie van veranderingen van locatie van platen en geulen op het 2D vlak in ESTMORF uitvoer. Wel kan via een 2D-naiverwerking (zie appendix A) van ESTMORF-resultaten iets worden gezegd. Maar de resulterende veranderingen zijn vooral het gevolg van veranderingen van b.v. plaat-areal. De waarde van de

	verkregen resultaten is zeer afhankelijk van de kwaliteit van de schematisatie van het model (verdeling van het gebied in ESTMORF vakken).
Relevante processen / mechanismen	• Plaat-geul interactie • Getij • Afvoer door sluizen • Golven en golf gedreven stroming en transport
Representatie in ESTMORF	Belangrijke beperking in ESTMORF (en ieder netwerk model) is dat de positie van de vakken vast ligt in het model. Hierdoor is verplaatsing van b.v. platen minder goed weer te geven. Het ontstaan van een nieuwe plaat of geul is niet weer te geven.
Relevante ingrepen	• Verandering lozingsprogramma sluizen. • Landaanwinning. • Baggeren / storten.
Voorspellingsvermogen	Kein en hangt in belangrijke mate af van de kwaliteit van de modelschematisatie. Bij de schematisatie van 2D naar 1D gaat er altijd informatie verloren, wat bij het terugvertalen van 1D naar 2D niet meer terug te winnen is.
Alternatieven	Delft3D
Aanbeveling	Bij gebruiken van ESTMORF-resultaten niet de nadruk leggen op dit aspect.

3.7 Areaal intergetijdegebied en ondiep water

Definitie	Definitie is gerelateerd aan de inundatiefrequentie. Voor een bepaald gebied zoals HVM te vertalen naar vaste waterniveaus. Opgemerkt wordt dat behalve het intergetijdegebied ook ondiep water zone hierbij is genoemd door Stam et al (2002) omdat het ook een belangrijke ecologische functie heeft. Voor de lange-termijn voorspellingen moet men eigenlijk met de variërende waterniveaus werken.
ESTMORF-uitvoer?	Veranderingen van areaal van intergetijdegebied wordt in principe berekend door ESTMORF en is af te leiden uit de ESTMORF uitvoer. Hierbij kan ESTMORF zowel intergetijdegebied gedefinieerd met vaste waterniveaus als intergetijdegebied gedefinieerd met variërende waterniveaus produceren. In principe kunnen m.b.v. 2D-naverwerking ook resultaten m.b.t. willekeurige andere dieptezones worden verkregen. De waarde hiervan m.b.t. sub-getijde deel is echter veel minder betrouwbaar wegens de grove schematisatie van dit deel in het ESTMORF model.
Relevante processen / mechanismen	Sedimentatie / erosie t.g.v. stroming en golven, verandering van waterniveaus (door bijv. zeespiegelrijzing) verandering van getijslag, mede onder invloed van afvoer door sluizen.
Representatie in ESTMORF	Bij de opzet van ESTMORF is er speciaal aandacht besteed aan het representeren van het intergetijdegebied. Wel is het zo dat ESTMORF in principe gebruik maakt van een standaard getij dat zowel gemiddelde getij als bijv. springtij kan zijn afhankelijk van de toepassing. Op lange-termijn kan de verandering van areaal intergetijdegebied verdeeld worden naar twee oorzaken: verandering van waterstanden en sedimentatie-erosie. Ook als er helemaal geen sedimentatie/erosie optreedt kan het areaal van intergetijdegebied bijvoorbeeld afnemen t.g.v. zeespiegelrijzing en de samenhangende verandering van getijslag. In het algemeen worden de veranderingen van waterniveaus en getijslag goed gerepresenteerd door het model en sedimentatie / erosie redelijk. Deze uitspraak is gebaseerd op de recente toepassing van het model voor de Humber, waarbij de invloed van zeespiegelrijzing en ontpolderingen op

	de ontwikkeling van intergetijdegebied is onderzocht (Wang en Jeuken, 2003).
Relevante ingrepen	• Verandering lozingsprogramma sluizen. • Baggeren / storten. • Landaanwinning.
Voorspellingsvermogen	Redelijk goed. Bij het Humber project is een marge van ongeveer 25% gehanteerd bij het gebruik van het voorspelde verlies van intergetijdegebied over 50 jaar. Dit kan men gebruiken als een indicatie van de nauwkeurigheid van de voorspellingen door ESTMORF voor deze parameter bij soortgelijke studies. In gevallen waarbij sedimentatie/erosie de hoofdoorzaak zal zijn voor de verandering moet men rekening houden met grotere onzekerheden in de voorspelling.
Alternatieven	Delft3D, ASMITA
Aanbeveling	ESTMORF wel gebruiken, doet op dit moment niet minder dan andere alternatieven. Vergeleken met Delft3D is het voorspellingsvermogen van ESTMORF op lange-termijn (decennia) beter. Naar aanleiding van de toepassingen bij de Westerschelde waren er concrete maatregelen voorgesteld voor verdere verbetering van het modelconcept voor dit aspect. Aanbevolen wordt dit op termijn te implementeren in ESTMORF.

3.8 Vaargeul diepte

Definitie	Minimale diepte binnen de vaarbare breedte
ESTMORF-uitvoer?	Deze parameter kan men berekenen met ESTMORF op twee manieren: (1) via de speciaal geïmplementeerde bagger-strategie optie van ESTMORF. (2) via post-processing van resultaten van een normale ESTMORF-berekening.
Relevante processen / mechanismen	drempel vorming (overgang van vloed- en ebdominatie in termen van netto sedimenttransport veroorzaakt door stroming en golven samen), plaat-geul uitwisseling
Representatie in ESTMORF	In ESTMORF wordt alles gerepresenteerd via de empirische evenwichtsrelaties. Lokaal bij de drempels kan de relatie voor de geul bijv. worden aangepast om drempelvorming weer te geven in het model. Beperking hiervan is dan dat een eventuele verandering van de locatie van de drempel niet door het model kan worden gesimuleerd. Dit houdt in dat als de verandering van het lozingsprogramma van de sluizen te groot wordt de voorspellingen van ESTMORF slechter worden.
Relevante ingrepen	• Verandering lozingsprogramma sluizen. • Baggeren / storten.
Voorspellingsvermogen	Potentieel moet het voor een grote klas van problemen goede voorspellingen geven. Er is echter nog relatief weinige ervaring, vooral met de strategie-optie.
Alternatieven	Delft3D
Aanbeveling	De mogelijkheid van ESTMORF goed exploreren.

4 Gebruik en voorspelkracht van ESTMORF

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resterende vragen beantwoord. Deze vragen hebben allemaal betrekking met de opzet van een toepassing (applicatie-model) van ESTMORF, voor de Haringvlietmonding en/of voor buitendelta's in het algemeen. Anders dan in de voorgaande twee hoofdstukken zijn niet alle vragen in een aparte paragraaf behandeld. In 4.3 zijn alle vragen met betrekking tot calibratie en validatie gebundeld.

4.2 Modelrand en randvoorwaarden

Vraag 9: *Voor het Westerschelde model van ESTMORF geldt dat de rand van het model in zeewaarts richting verplaatst is. Hierdoor valt ook het mondingsgebied binnen de schematisatie. Aanleiding hiervoor was het terugdringen van randeffecten in het binnengebied. Vervolgens is de nieuwe versie ingezet voor het modelleren van het mondingsgebied. Vraag blijft in hoeverre de randen de resultaten in termen van beheersparameters in het mondingsgebied beïnvloeden. Ligt de rand ver genoeg zeewaarts om betrouwbare resultaten voor de monding te verwachten?*

Deze vraag gaat over de randeffecten en de locatie van de openzee randen.

- In principe heeft een model altijd randeffecten. De randen moeten daarom ver genoeg van het interesse gebied liggen zodat de relevante resultaten van het model niet worden beïnvloed door de randeffecten. Verder moeten de randen ook zodanig geplaatst zijn dat de ontwikkelingen in het modelgebied de randvoorwaarden niet beïnvloeden, zowel hydrodynamisch als morfologisch.
- Er is ervaring met het Westerschelde model met betrekking tot dit aspect. Eerst was de rand van het model geplaatst bij Vlissingen. Later is de rand naar buiten verplaatst bij Cadzand-Westkappelle, zodat het mondingsgebied in het model is meegenomen. Bij deze actie is het gevolg in het westelijke deel van de Westerschelde beperkt gebleven. In andere woorden, de invloed van de locatie van de rand op de gesimuleerde morfologische ontwikkeling van de Westerschelde is in dit geval beperkt. Er is nog onvoldoende ervaring om te concluderen of de huidige rand in zeewaarts richting van het Westerschelde model ver genoeg gelegd is.
- In het geval van het NDB model is de openzee rand in het Noorden precies op de rug van de Hinderplaat gezet. Men kan zich afvragen of dit voldoende zeewaarts is.
- Doorgaans wordt als randvoorwaarde bij de openzee rand de overall evenwichtsconcentratie opgelegd. Dit houdt in dat het sediment transport bij de rand, import/export, wordt bepaald door de morfologische ontwikkelingen binnen het modelgebied zelf. Men kan zeggen dat import is aangedreven door zandhonger in het systeem. Als het hele modelgebied in evenwicht is treedt er geen import of export op. Een afwijking van deze randvoorwaarde heeft tot gevolg dat dit principe niet meer geldt: als er geen morfologische verandering meer optreedt, wordt er niet voldaan aan de empirische relaties voor het morfologische evenwicht. Dit is in tegenstelling tot het

basisprincipe van het modelconcept. In principe kan men hiermee bijvoorbeeld het gebrek van sediment beschikbaarheid modelleren, maar men moet wel goed realiseren hoe het doorwerkt in de uiteindelijke modelresultaten.

4.3 Calibratie en validatie

Vraag 11: *Berekeningen van morfologische veranderingen vinden meestal in een aantal stappen plaats. Bijvoorbeeld het beginpunt, de hydrodynamica. Welke hydrodynamische resultaten bepalen in het model de verdere morfologische ontwikkelingen (afhankelijk van de toegepaste procesbeschrijvingen of empirische relaties), m.a.w. op welke uitkomsten moet de waterbeweging gevalideerd worden? En op welke uitkomsten de morfologie?*

Deze vraag gaat over de relatie waterbewegingsmodel en morfologisch model en hoe de verschillende onderdelen moeten worden gevalideerd.

- ESTMORF gebruikt getijvolumina en de extreme waterstanden (hoogwater en laagwater) als de resultaten uit het hydrodynamische model. Vergeleken met proces-gebaseerde modellen die het verloop van zowel de waterstand als de stroomsnelheden gebruiken, is dit een groot voordeel: De geïntegreerde grootheden die ESTMORF gebruikt zijn meestal veel nauwkeuriger door hydrodynamische modellen te simuleren. In tegenstelling tot de proces-gebaseerde modellen hoeft men zich geen zorgen te maken over dingen zoals getijasymmetrie, die relatief veel minder nauwkeurig te meten en te simuleren zijn.
- ESTMORF simuleert in feite direct het netto sedimenttransport. Hiermee is één van de problemen bij morfodynamisch modelleren met proces-gebaseerde modellen vermeden. In proces-gebaseerde modellen rekent men eerst het momentane sediment transport uit en wordt daarna het netto transport bepaald door integratie over een getijperiode. Dit betekent dat een klein verschil tussen twee grote getallen (eb- en vloedtransport) wordt bepaald. De relatieve nauwkeurigheid voor het netto transport is daardoor laag, zelfs als het eb- en vloedtransport relatief nauwkeurig zijn berekend.
- De validatie van de hydrodynamische module (SOBEK) van een ESTMORF model is relatief eenvoudig. Een normale calibratie op waterstanden en debieten is voldoende. In tegenstelling tot proces-gebaseerde modellen is het niet nodig om te calibreren op zaken als getijasymmetrie, die vaak veel moeilijker af te regelen zijn.
- De validatie van het morfologische deel van het model is moeilijker. Hiervoor moet men veldgegevens van lange-termijn morfologische veranderingen hebben. Verder speelt het specifieke doel van een model een belangrijke rol. In de toepassingen tot nu toe zijn de calibratie en validatie van het model vooral gericht op totale sedimentatie / erosie in deelgebieden, en op de veranderingen van areaal intergetijdegebieden (zie tabel 4.1).

Vraag 2: *Een aantal van de genoemde beheersparameters is in eerdere modelstudies aan bod gekomen. Kan door middel van historische validatie van deze data al een uitspraak gedaan worden over de te verwachten nauwkeurigheid van de ESTMORF-modelresultaten?*

Tabel 4.1 Historische validatie / Ervaringen met de toepassingen (+ betekent gevalideerde ervaring, o betekent ervaring in de toepassing maar niet geverifieerd met bijv. veld data)

Toepassing	sediment volume	MKL en strandbreedte	ligging plaat en geul	areal intergetijde gebied	vaargeul diepte
Westerschelde	+		+	+	+
Friesche Zeegat	+				
Humber	+			+	
Southampton Water	+				
Yangtze	o		o	o	
Feiyun	+				
NDB	o				

In de tabel hierboven is voor alle toepassingen van ESTMORF tot nu toe aangegeven wat de ervaringen zijn met betrekking tot de relevante beheersparameters. Duidelijk is te zien dat het model vooral wordt gebruikt het voor berekenen van sedimentatie-erosie (sediment-balans). In mindere mate is het ook ingezet voor simuleren van veranderingen van het intergetijdegebied. Ervaringen met betrekking tot de vaargeuldiepte is alleen opgedaan in de Westerschelde. Er is helemaal geen ervaring met betrekking tot MKL en strandbreedtes. Uit de ervaringen kan men concluderen dat het model geschikt is voor de beheersparameters sediment-balans, areaal intergetijdegebied en vaargeuldiepte. Het is minder geschikt voor het bepalen van de locaties van intergetijdegebied en het is niet geschikt voor het voorspellen van MKL en strandbreedtes. Uitspraken over de nauwkeurigheid van voorspellingen van verschillende beheersparameters, zoals gedaan in hoofdstuk 3, zijn in belangrijke mate gebaseerd op ervaringen opgedaan in deze toepassingen.

Vraag 10: *Bij de studie m.b.t. de Westerschelde(monding) is een calibratie uitgevoerd op de tijdschaal van 30 jaar; de periode van 1968 tot heden. Dat betekent dat validatie niet heeft kunnen plaats vinden. Is het mogelijk om als aanvullende validatie de data van de Haringvlietmonding in te zetten?*

Het antwoord op deze vraag is in principe nee, omdat ieder nieuw model eigen calibratie nodig heeft. Na een nieuwe calibratie van het NDB model, waarbij nieuwe en aangepaste coëfficiënten zijn gebruikt, kan men het niet meer beschouwen als een validatie van een ander bestaand model. Verwacht wordt dat vooral de coëfficiënten in de empirische relaties voor het morfologische evenwicht per gebied anders zijn.

Eigenlijk moet men de calibratie en verificatie/validatie van een model strikt uit elkaar houden, door onafhankelijke datasets bij de verschillende fasen te gebruiken. In de praktijk veroorzaakt dit vaak een probleem, omdat men voor de calibratie van het model gegevens van lange-termijn morfologische ontwikkelingen nodig heeft. Zulke gegevens zijn vaak schaars en kunnen niet in aparte sets worden verdeeld voor de twee doeleinden.

4.4 Parameter setting

Vraag 12: *In numerieke modellen komen meestal meerdere modelcoëfficiënten voor. Tijdens de calibratiefase worden deze coëfficiënten ingesteld. Een overzicht van de belangrijkste coëfficiënten, de range waarbinnen deze gevarieerd mogen worden tijdens de calibratie en de verschillende instellingen voor de verschillende modelstudies geeft enig inzicht in de*

robuustheid van het model. De instelling van een juiste rekentijdstap is cruciaal voor modeluitkomsten. Welke aspecten beïnvloeden de tijdstap, is dat b.v. de snelheid waarmee veranderingen in de morfologie optreden en dus een gebiedsafhankelijke instelling? Hoe is dit voor ESTMORF getest en zijn verwijzingen naar desbetreffende literatuur aanwezig?

Deze vraag gaat over parameter-setting bij het opzetten van een toepassing van ESTMORF.

- Een onderscheid is te maken tussen de numerieke parameters en de “fysische parameters”. De numerieke parameters (de tijdstap, het aantal iteraties, etc.) moeten in principe zodanig gekozen zijn dat de nauwkeurigheid van de numerieke oplossing worden gegarandeerd. Voor de tijdstap kan men bepalen of deze klein genoeg gekozen is door te kijken of een halvering ervan de resultaten beïnvloedt. Zo ja dan is de oorspronkelijke tijdstap nog te groot. In het algemeen is het waar dat de tijdstap afhankelijk is van de snelheid van de morfologische verandering, ofwel van de morfologische tijdschalen. De tijdstap moet klein genoeg zijn t.o.v. de (kleinste) relevante morfologische tijdschaal. De “fysische parameters” zeggen iets over het morfologische systeem zelf en staan los van het numerieke oplossingsproces in het model. Deze parameters moeten realistisch gekozen worden zodat de werkelijkheid zo goed mogelijk wordt weergegeven.
- De fysische modelparameters in ESTMORF kan men weer in twee groepen verdelen: parameters die het morfologische evenwicht bepalen (coëfficiënten in de empirische relaties) en parameters die de morfologische tijdschalen bepalen (horizontale en verticale uitwisselingscoëfficiënten, overall evenwichtsconcentratie).
- Voor de eerste groep kan men vaak weinig leunen op ervaringen elders om een aantal redenen. Ten eerste zijn de coëfficiënten in de empirische relaties niet universeel (Allersma, 1988). Ten tweede, als gevolg van bijvoorbeeld schematisatiefouten moeten de coëfficiënten vaak als ruimtelijk variërend worden gehanteerd. Dit betekent dat zelfs als ze theoretisch constant moeten zijn, ze dat vaak niet zijn in het model omdat de schematisatie van het gebied in takken met hun dwarsprofielen altijd “oneffenheden” veroorzaakt. Wel is van belang dat men de orde van grootte van de coëfficiënten controleert aan de hand van de algemene kennis over de empirische relaties. Te grote variaties van de coëfficiënten in het model kunnen duiden op fouten in de schematisatie (zie bijvoorbeeld Wang, 2000).
- Voor de tweede groep parameters kan men goed gebruik maken van ervaringen elders, vooral van modellen in vergelijkbare gebieden. Zo is bij het opzetten van het model voor het Humber estuarium gebruik gemaakt van de ervaringen opgedaan bij het model voor het Southampton Water. Bij het opzetten van het model voor het NDB kan de ervaring met het Westerschelde model van groot belang zijn.
- Om een indicatie van de range van verschillende parameters te krijgen zijn de parameter settings van de modellen tot nu toe geïnventariseerd. Hierbij zijn alleen de recent gebruikte en gecalibreerde modellen meegenomen. De coëfficiënten die de morfologische tijdschalen bepalen zijn weergegeven in Tabel 4.2. De coëfficiënten in de evenwichtsrelaties zijn in de praktijk ruimtelijk variërend zoals hierboven is uitgelegd. De coëfficiënten zijn meestal bepaald door aan te nemen dat het modelgebied op een bepaald moment in evenwicht is. Zo is bij de Westerschelde aangenomen dat het estuarium in 1968 in evenwicht verkeerde omdat er daarvoor weinig in het estuarium is ingegrepen. Voor het Humber model is aangenomen dat het estuarium bij de huidige zeespiegelsnelheid (18 cm/eeuw) in dynamisch evenwicht verkeert.

Tabel 4.2 coëfficiënten die de morfologische tijdschaal beïnvloeden.

Toepassing	w_s (m/s)	D_g (m ² /s)	D_l (m ² /s)	D_h (m ² /s)	c_E (-)
Westerschelde	0.001	1250	20	5	0.00005
Humber	0.0003	2000	25	10	0.0002
Southampton Water	0.0003	2000	25	10	0.0002
w_s = verticaal uitwisselingscoëfficiënt, D_g = diffusiecoëfficiënt in de geul in de langsrichting, D_l = diffusiecoëfficiënt in de dwarse richting tussen geul en laag intergetijdegebied, D_h = diffusiecoëfficiënt in de dwarse richting tussen en laag intergetijdegebieden, c_E = overall evenwichtsconcentratie in kubiek meter bodem per kubiek meter water. Per model zijn de coëfficiënten constant in het hele modelgebied. Lokale afwijkingen zijn alleen gebruikt om bijzonder situaties bijvoorbeeld niet erodeerbare bodem (van bijvoorbeeld de Haringvlietsluizen) aan te geven (door $w_s=0$ te gebruiken).					

5 Conclusies en aanbevelingen

Samengevat kunnen de volgende conclusies over het voorspellingsvermogen van ESTMORF, voor de Haringvlietmonding, worden getrokken:

- Het model is goed in staat voorspellingen te maken over veranderingen in de sediment balans (i.e. cumulatieve sedimentatie /erosie), voor het hele gebied en voor deel gebieden, onder invloed van menselijke ingrepen en natuurlijke ontwikkelingen. Een nauwkeurigheid van 20% moet haalbaar zijn.
- Het model kan redelijk goed veranderingen van het areaal van intergetijdegebied voorspellen, en in iets mindere mate van ondiep water gebied. De nauwkeurigheid van de voorspelling is minder dan voor de sediment-balans. In gevallen waarbij sedimentatie/erosie de hoofdoorzaak zal zijn voor de verandering moet men rekening houden maar voor lange-termijn (decennia) ontwikkelingen is ESTMORF op dit moment het beste instrument voor deze beheersparameter onder de beschikbare alternatieven.
- Het model is ook in staat voorspellingen te doen voor de veranderingen van de vaargeuldiepte. Verwacht wordt dat de nauwkeurigheid voor deze parameter hoger is dan voor het areaal intergetijdegebied, ondanks het feit dat er nog relatief weinig ervaring met de toepassing van ESTMORF voor deze parameter bestaat. Voor deze parameter bestaat er echter sterkere concurrentie (bijv. Delft3D). Verplaatsing van drempels niet mogelijk.
- Voorspelling van veranderingen van locatie van intergetijdegebied aan de hand van ESTMORF kan alleen worden gedaan door indirecte naverwerking / interpretatie van de modelresultaten. De voorspelkracht is laag.
- Het voorspellingsvermogen van ESTMORF voor beheersparameters MKL en strandbreedtes is gering.

Op basis van deze conclusies wordt aanbevolen het ESTMORF model toe te passen voor de Haringvlietmonding om voorspellingen te doen over de ontwikkelingen van de sediment-balans, het areaal van intergetijdegebied en ondiepwater, en de vaargeuldiepte, indien noodzakelijk ook voor veranderingen in de locatie van intergetijdegebied. Voor MKL en strandbreedtes kan men beter andere alternatieven zoals UNIBEST, PONTOS en Delft3D gebruiken. Een Delft3D model kan ook goed van toepassing zijn bij het voorspellen van veranderingen van vaargeul-diepte, en voor veranderingen van locatie intergetijdegebied. Zoals in het algemeen geldt zijn ESTMORF en Delft3D model complementair bij het voorspellen van morfologische ontwikkelingen (semi-empirisch versus proces-gebaseerd, lange-termijn versus korte en middel-lange termijn, 1D versus 2D/3D).

Deze conclusies over de toepasbaarheid van ESTMORF in de Haringvlietmonding mogen niet zonder meer doorgetrokken worden naar andere buitendelta's. De toepasbaarheid van zo een 1D netwerkmodel is sterk afhankelijk van een stabiele plaat-geul structuur, die in de Haringvlietmonding aanwezig is. In buitendelta's, zoals bij de zeegaten in de Waddenzee, maken de voortdurende veranderingen van de locatie en oriëntatie van de geulen het model minder toepasbaar. Voor de algemene gevallen wordt aanbevolen in de praktijk per geval apart te bekijken of het model in te zetten is voor bepaalde doelen.

Verder kunnen de volgende conclusies uit de huidige studie worden samengevat:

- ESTMORF maakt geen expliciet onderscheid tussen zand en slib en simuleert dus ook niet de bodemsamenstelling. Wel is er positieve ervaring met de toepassing van het model in zowel slibrijke als slibarme gebieden. Een mogelijk probleem door deze beperking van het model kan zijn dat het model fouten maakt m.b.t. de morfologische tijdschalen, als het model is gecalibreerd met data alleen uit sedimentatie-periode en voorspellingen moet doen over erosie in de toekomst.
- Als men de morfologische ontwikkelingen van zowel het binnen- als het buitengebied mee wilt nemen in één model, dan is ESTMORF te kiezen boven SOBEK-MOR.
- De schematisatie van het dwarsprofiel in ESTMORF is relatief grof in het geuldeel. Het geuldeel is alleen met één punt weergegeven en het ondiepe water gebied is niet apart geschematiseerd. Dit heeft consequenties voor de nauwkeurigheid waarmee veranderingen van ondiep water gebieden kunnen worden voorspeld.

Op basis van deze conclusies worden de volgende aanbevelingen gedaan met betrekking tot verdere ontwikkeling en toepassing van ESTMORF:

- Implementatie van een 2-fractie sediment transport model, zodat de zand-slib combinatie goed kan worden meegenomen. De resultaten van het onderzoek door Van Ledden (2003) kan hiervoor als basis worden gebruikt. Aanbevolen wordt de implementatie eerst in het eenvoudigere ASMITA-model uit te proberen.
- De schematisatie van de dwarsprofielen in ESTMORF met een extra punt uitbreiden om het ondiepe water gebied beter weer te geven in het model.
- Bij het toepassen van het huidige ESTMORF model moet men bij de schematisatie van de dwarsprofielen in het geuldeel zoveel mogelijk rekening houden met de helling rondom het laagwater.
- ESTMORF verder verbeteren voor betere weergave van de ontwikkeling van het intergetijdegebied. Concrete voorstellen zijn in eerdere studies al gedaan.
- De mogelijkheden van het ESTMORF model voor het voorspellen van de veranderingen van vaargeuldiepte meer exploiteren.

6 Referenties

- Jeuken, M.C.J.L., Wang, Z.B., Keiller, D., Townd, I. en G.A. Liek, 2003, Morphological response of estuaries to nodal tide variation, International Conference of Estuaries and Coasts, November 2003, Hangzhou, China.
- Koomans, R.L., 2001, Bodemsamenstelling in de monding van het Haringvliet, Sediment karakterisatie en data analyse, MEDUSA Explorations BV, Rapport project 2001-P006.
- Stam, J.M.T., Groen, M. en L. Walburg, 2002, Haringvlietmonding: reconstructie van een afsluiting, Beschrijving, verklaring en modelaanpak van de effecten van de afsluiting van de Haringvlietmonding 1970-2000, Rapport RIKS/2002.028.
- Van Heteren, S., 2002, Analyse van slibdikte in de monding van het Haringvliet, NITG02-200-B.
- Van Koningsveld, M. and J.P.M. Mulder, 2002, Sustainable coastal policy in the Netherlands, A small and large scale approach, Proceedings of ICCE 2002, Cardif, UK.
- Van Ledden, M., 2003, Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins, Doctoral thesis, Delft University of Technology.
- Wang, Z.B., 2000, Morfologie van het Noordelijk Deltabekken, Pilot toepassingen van 1D netwerk modellen SOBEK-MOR en ESTMORF, Rapport Z2662, WL | Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B., Duel, H. en P.C.G. Glas, Verkenning naar effecten van vaargeulverdieping in de Westerschelde op de morfologische en ecologische ontwikkelingen, Eindrapport LWI/E&K fase 1B, Werkpakket 6, VR1173.95/Z754.
- Wang, Z.B., Karssen B., Fokkink, R.J. and A. Langerak, A dynamic/empirical model for long-term morphological development of estuaries, in Dronkers, J. and Scheffers, M.B.A.M. (ed.), Physics of estuaries and coastal seas, Balkema, Rotterdam, 1998.
- Wang Z.B. en M.A.G. Van Helvert, 2000, Verbetering weergave intergetijdegebied in ESTMORF, Implementatie van diverse maatregelen, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z3002.
- Wang, Z.B. en 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, Report Z3105, WL | Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B. and M.C.J.L. Jeuken, 2003, Morphologic modelling of the Humber estuary with ESTMORF, The future morphologic evolution and the impact of set backs, Report Z3451, WL | Delft Hydraulics.

A ESTMORF model

A.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ESTMORF kort beschreven. Uitgebreide beschrijvingen van het model zijn al eerder gegeven in verschillende rapporten en publicaties (zie voor een overzicht Wang en Van Helvert, 2001). De beschrijving hier heeft als doel analyse naar de mogelijkheden en onmogelijkheden van het model voor de voorspellingen van de beheerparameters mogelijk te maken. Zowel het principe, de functionaliteit, de uitvoer als de toepassingen tot nu toe van het model komen aan de orde. Ook wordt een analyse gemaakt van de fysische processen en mechanismen die wel en niet zijn meegenomen in de modelformuleringen van ESTMORF.

A.2 Model principe en functionaliteit

A.2.1 Algemeen model concept

Het ESTMORF model is ontwikkeld, vanaf begin jaren negentig vorige eeuw, na uitvoerige overwegingen van aan de ene kant de verschillende typen modellen en aan de andere kant de problemen van morfologische ontwikkelingen in getijdegebieden. Globaal kunnen de modellen in twee typen verdeeld: de proces-gebaseerde modellen en de empirische (ook wel gedrag-georiënteerde genoemd) modellen. Proces-gebaseerde modellen zijn modellen waarin men zoveel mogelijk gebruik maken van de fysische wetten om waterbeweging en sediment transport te beschrijven. Het 2D/3D model Delft3D-MOR en het 1D model SOBEK-MOR behoren tot dit type. De belangrijkste belemmering voor de toepassingen van proces-gebaseerde modellen voor getijdegebieden was en is nog steeds de onzekerheid m.b.t. morfologisch evenwicht. In tegenstelling tot het rivier-geval kan men geen morfologische evenwicht afleiden uit de fysische vergelijkingen. In het algemeen kan men niet eens aantonen of er een morfologisch evenwicht bestaat. Aan de andere kant zijn er allerlei empirische relaties beschikbaar tussen het morfologische evenwicht en hydrodynamische parameters. Een bekend voorbeeld hiervan is de relatie tussen de oppervlakte van het dwarsprofiel van een geul en het getijvolume door de geul. Deze relaties, afgeleid uit velddata, blijken min of meer algemeen van toepassing te zijn en heel nuttig voor het oplossen van praktische problemen. Er is dus een kloof tussen onze proceskennis en empirische kennis m.b.t. de morfologische ontwikkelingen in getijdegebieden. Bij de ontwikkeling is geprobeerd deze kloof te dichten door de sterke kanten van beide type modellen te combineren. Zo behoort ESTMORF ook tot de zogenaamde hybride type modellen.

De belangrijkste hypothese gebruikt in het ESTMORF model concept is dat voor ieder element in het systeem een morfologisch evenwicht te definiëren is afhankelijk van de hydrodynamische condities. Voor ieder element is een empirische relatie nodig voor het bepalen van het evenwicht. Afwijking van de morfologische toestand t.o.v. het evenwicht vormt de aandrijving voor morfologische ontwikkelingen. De opzet van het model is verder

analoog aan de proces-gebaseerde modellen, zoals Fig.A.1 aangeeft. In deze figuur is te zien dat de rekenprocedure van ESTMORF op één punt verschilt t.o.v. een proces-gebaseerd morfodynamisch model. De evenwicht sediment concentratie wordt niet meer direct aan de hand van de hydrodynamische condities bepaald. Nadat de hydrodynamische condities zijn bepaald wordt eerst de morfologische evenwichtstoestand bepaald. De evenwicht sediment concentraties worden bepaald door de bestaande morfologische toestand te vergelijken met het evenwicht. Deze manier van werken impliceert ook een ander belangrijk verschil t.o.v. proces-gebaseerde modellen, dat niet direct te zien is in Fig.A.1. Het getij-gemiddelde, of wel residuele, sediment transport wordt direct berekend, en niet zoals in proces-gebaseerde modellen waarbij eerst de momentane transporten worden bepaald en dan het residuele transport. Dit houdt ook in dat alleen de geïntegreerde hydrodynamische parameters worden gebruikt, i.p.v. de stromingsgegevens op iedere tijdstap binnen een getij. Voor de hydrodynamische module zelf is er geen verschil t.o.v. de proces-gebaseerde modellen. Ook voor de sediment transport module wordt hetzelfde model principe gebruikt, behalve dat het reststromingsveld i.p.v. de momentane stromingsvelden wordt gebruikt.

Wegens beschikbaarheid van empirische relaties is voor de schematisatie van het model gekozen voor de 1D-lijn. Een model gebied wordt dus geschematiseerd in een 1d-netwerk. Maar wegens het belang van de intergetijdegebieden worden de ontwikkelingen van het lage en hoge deel van de intergetijdegebieden en die van de geulen apart gesimuleerd. Zo ontstaat de schematisatie van de dwarsprofielen van de takken in een ESTMORF model, zoals weergegeven in Fig.A.2. Er is aangenomen dat het intergetijdegebied alleen sediment kan uitwisselen met de aangrenzende geul. Transport in de langsrichting treedt alleen in de geul op.

A.2.2 Samenvatting model formulering

Uitgebreide beschrijvingen van de modelformuleringen zijn al gegeven in eerdere rapporten en publicaties. Hier worden het principe van de formuleringen in ieder van de stappen zoals in Fig.A.1 zijn aangegeven kort beschreven.

Hydrodynamische moduul

Voor het berekenen van de hydrodynamische condities wordt het SOBEK model gebruikt, dat de getijstroming in een 1D-netwerk model simuleert. Per tak van het netwerk, een rekenelement in ESTMORF, worden de parameters ebvolume, vloedvolume, laagwater en hoogwater doorgegeven aan de andere modules.

Morfologisch evenwicht

Morfologisch evenwicht wordt bepaald aan de hand van empirische relaties. Deze empirische relaties zijn vereist voor de drie morfologische toestandvariabelen:

- Het oppervlak van het dwarsprofiel onder gemiddeld waterniveau. De evenwichtswaarde hiervan is gerelateerd aan de eb- en vloedvolumes.
- De hoogte van het lage deel van het intergetijdegebied t.o.v. het laagwater. De evenwichtswaarde hiervan is gerelateerd aan het getijverschil.

- De hoogte van het hoge deel van het intergetijdegebied t.o.v. het laagwater. De evenwichtswaarde hiervan is eveneens gerelateerd aan het getijverschil.

Evenwicht sedimentconcentratie

Dit is het enige nieuwe deel in het model. Alle andere onderdelen maken in principe gebruik van bestaande formuleringen / model concepten. Dit deel vormt ook de sleutel die de empirie en de proces-beschrijvingen in het model met elkaar verbindt. Dit onderdeel heeft dezelfde functie als de sedimenttransport formule in een proces-gebaseerd model.

De evenwichtsconcentratie wordt afhankelijk gesteld aan de verhouding tussen de waarde van de betreffende morfologische toestandvariabel en zijn evenwichtswaarde. In de geul is dit dus de verhouding tussen de oppervlakte van de geul en de evenwichtsoppervlakte volgens de empirische relatie. Voor de formulering is een macht-relatie gebruikt, die ervoor zorgt dat als het model voor een rivier geval zou worden gebruikt, het modelresultaat dan precies overeenstemt met de 1D proces-gebaseerd model op basis van zwevend sediment transport. De gebruikte relaties zijn verder zodanig dat als alle elementen in het modelgebied in evenwicht zijn de evenwichtsconcentratie, en dus ook de concentratie zelf overal hetzelfde is.

Sedimenttransport module

Voor het sediment transport wordt verondersteld dat het zwevend transport domineert. Net zoals in een proces-gebaseerd model wordt de sedimentconcentratie bepaald aan de hand van een advection-diffusie vergelijking. Een lineair bron/put term wordt gehanteerd voor de formulering van de uitwisseling van sediment tussen de waterkolom en de bodem. Dit betekent dat de uitwisselingsflux evenredig is met het verschil tussen de aanwezige sedimentconcentratie en de evenwichtsconcentratie. Sedimentatie treedt op als de concentratie hoger is de evenwichtswaarde, en omgekeerd treedt er erosie op. Het verschil met een proces-gebaseerd model is dat het residuele stromingsveld wordt gebruikt. De gehanteerde sediment concentratie is dus een getij-gemiddelde sedimentconcentratie.

Morfologische verandering

De morfologische verandering wordt bepaald aan de hand van de massa-balans voor sediment. De bron/put term in de sediment transport module, die de sedimentuitwisseling tussen water en bodem beschrijft, wordt hier dus gebruikt om de sedimentatie-erosie snelheid te berekenen.

A.1.1 Speciale functionaliteit

Het model is speciaal ontwikkeld om zo goed mogelijk de invloeden van zowel de natuurlijke ontwikkelingen als de menselijke ingrepen op de lange-termijn morfologische ontwikkelingen te voorspellen. Daarom zijn een aantal speciale functionaliteit en geïmplementeerd:

- De morfologische veranderingen van de geulen en de intergetijdegebieden worden apart gesimuleerd. Het apart meenemen van de veranderingen van het intergetijdegebied is vooral van belang bij de toepassingen in ecologische studies.
- Zeespiegelrijzing. Tijdafhankelijke zeespiegelrijzing kan worden meegenomen door het model.
- Verandering getijslag. Tijdafhankelijk getijslag bij de zeewaartse rand kan worden meegenomen.
- Bodemdaling. Bodemdalingen zoals veroorzaakt door bijvoorbeeld gaswinning kunnen in het model worden meegenomen.
- Voorgescreven baggeren, storten en zandwinning. Bagger- en stortgegevens kunnen per bagger- en stort-locatie in het model worden ingevoerd. Men kan de gegeven hoeveelheden per locatie verdelen naar de bodem en naar de oever van de geul.
- Voorschrijven van baggerstrategie. In plaats het voorschrijven van hoeveelheden baggeren en storten kan men ook de baggerstrategie optie gebruiken. Daarbij geeft men als invoer op de ligging van de vaargeul, de vereiste breedte en diepte van de vaargeul, en de beschikbare baggercapaciteit. Aan de hand van de gesimuleerde morfologische veranderingen berekent het model dan zelf hoeveel, waar en wanneer wordt gebaggerd. Men geeft ook de mogelijke stortlocaties van het gebaggerde materiaal op samen met de stortcapaciteit (hoeveel per jaar mag maximaal worden gestort). Het model regelt dan ook de verdeling van het gebaggerde materiaal over de stortlocaties.

A.2 Modelformulering en fysische processen

De modelformuleringen van ESTMORF, zoals in de vorige paragraaf zijn samengevat, kunnen globaal in drie delen verdeeld worden: hydrodynamica, empirische relaties voor morfologisch evenwicht, en sedimenttransport. Hieronder wordt per onderdeel nader ingegaan op de fysische processen / mechanismen die expliciet of impliciet zijn meegenomen in de modelformuleringen.

A.2.1 Hydrodynamica

Het model gebruikt een 1D-netwerk getijstromingsmodel als hydrodynamisch moduul. Dit houdt in dat getijstroming als belangrijkste aandrijving voor de morfologische ontwikkeling wordt beschouwd. Golven en golf-gedreven stroming zijn dus niet expliciet in het model meegenomen.

Het gebruiken van een 1D netwerk model heeft ook als beperking dat de netwerk structuur gedurende de hele simulatie vast ligt. Drie-dimensionale verschijnselen zoals dichtheidstroming zijn dus niet mee te nemen.

Voor lange-termijn morfologische simulaties, maakt het model gebruik van een standaard getij. Afhankelijk van de toepassing kan men wel zelf kiezen met wat voor getij wordt gerekend. In het Westerschelde model is gekozen voor een gemiddeld springtij. Voor de Humber toepassing is bewust gekozen voor een springtij, omdat men de effecten van ontpolderingen (die grotendeels alleen tijdens springtij worden overstroomd) wou bestuderen. Ook de getijperiode mag men zelf kiezen. Theoretisch is het dus mogelijk een hele spring-doodtij cyclus te gebruiken als “standaard getij”.

A.2.2 Empirische relaties

De empirische relaties voor het morfologische evenwicht zijn niet gebaseerd op procesbeschrijvingen. Het is daarom niet expliciet aan te geven welke fysische processen daarin zijn meegenomen. De relaties maken gebruik van resultaten van het getijstromingsmodel. Zij nemen in ieder geval dus impliciet de invloed van de getijstoming mee. De empirische relaties zijn direct gebaseerd op velddata. Dit betekent dat zij meer relevante processen impliciet meenemen dan alleen op basis van de gebruikte parameters mag worden verwacht. Zo is men over het algemeen eens dat intergetijdegebied zoals platen in werkelijkheid door zowel stroming als golven worden beïnvloed. Getijstroming heeft de neiging de platen op te bouwen en golven juist de neiging de platen afbreken. Zo redenerend kan men stellen dat de evenwichtshoogte van een plaat het resultaat is van de balans tussen de werking van de getijstroming en de werking van de golven. Dit suggereert dat in de empirische relaties voor de hoogtes van het intergetijdegebied, zoals in het model is gebruikt impliciet een deel van de invloed van de golven wordt meegenomen.

A.2.3 Sediment transport

Twee dingen zijn hierbij van belang. Ten eerste, het model berekent direct het getij-gemiddelde transport. De gebruikte advectie-diffusie vergelijking is op basis van reststroming. De heen en weer gaande getijstroming wordt dus als een mengingsproces beschouwd. Net zoals bij turbulentie op veel kleinere schalen wordt het beschreven via een diffusie (of beter inter-getijde-dispersie) coefficient. Ten tweede, de formulering van de evenwichtssedimentconcentratie, samen met het gebruik van de advectie-diffusie vergelijking, zorgt ervoor dat sediment transport in wezen wordt gedreven door de gradient van de “zandhonger”. Een vak dat een te ruim dwarsprofiel heeft t.o.v. het evenwicht heeft een tendens van sedimentatie en omgekeerd. Maar of een gebied met een sedimentatie tendens ook werkelijk sedimenteert hangt af van situatie in de omgeving. Het gebied met de grootste zandhonger zal het eerst sedimenteren. Zo kan een naastliggend gebied, dat ook zandhonger heeft, eerst eroderen voor dat het uiteindelijk sedimenteert.

A.3 Modelresultaten en verwerking

Zoals in A.2 is beschreven, hanteert het model drie morfologische toestandvariabelen: oppervlakte van het dwarsprofiel van de geul, hoogtes van het lage en hoge deel van het intergetijdegebied. Per tijdstap en in iedere tak (rekenelement) van het model worden de sedimentatie / erosie hoeveelheden in de geul, op het lage deel van het intergetijdegebied, en op het hoge deel van het intergetijdegebied berekend. In het model worden deze sedimentatie / erosie hoeveelheden vervolgens vertaald naar een aanpassing van het dwarsprofiel. De veranderde dwarsprofielen per tak worden met het gespecificeerde tijdsinterval weggeschreven naar het uitvoerbestand van het model. Verder worden ook de eb- en vloedvolumes in hetzelfde bestand uitgevoerd.

In ESTMORF wordt een 7-punten schematisatie gehanteerd voor de dwarsprofielen. De definities van de 7 punten, in de volgorde van onder naar boven, zijn (zie ook Fig.A.2):

1. Punt op de bodem. Dit is het enige punt onder het laagwater. De ligging van het punt moet ervoor zorgen dat de oppervlakte van de geul onder het laagwater goed is. In

principe is er dan nog een vrijheidsgraad: men kan variëren tussen een driehoekig tot een rechthoekig profiel. Ervaring heeft geleerd dat dit punt best gekozen kan worden zodanig dat de bodemhelling van het ondiepwater deel (net onder laagwater) het best wordt weergegeven.

2. Punt op het niveau van laagwater. Het punt is eenduidig gedefinieerd omdat de breedte op het niveau goed moet worden weergegeven.
3. Punt op het niveau van de hoogte van het lage intergetijdegebied. Dit punt is ook eenduidig gedefinieerd omdat zowel de hoogte als het volume van het intergetijdegebied boven laagwater moeten goed zijn.
4. Punt op het niveau van gemiddeld waterniveau, eenduidig gedefinieerd.
5. Punt op het niveau van de hoogte van het hoge intergetijdegebied, eenduidig gedefinieerd.
6. Punt op het niveau van hoogwater, eenduidig gedefinieerd.
7. Punt op het land (droog deel). De keuze hiervan heeft ook een zekere vrijheidsgraad. Wel moet het punt hoog genoeg zijn zodat het gedurende de hele berekening boven hoogwater blijft. Verder moet men de ligging zodanig kiezen dat de helling van het land boven het hoogwater goed wordt weergegeven.

Door deze speciale definities van de punten bevat de schematisatie veel informatie die men er via naverwerking uit kan halen. De volgende standaard naverwerkingen worden gebruikt:

- Naverwerking met vaste referentieniveaus. Hiermee kan men het verloop van het natte volume onder en areaal op een bepaald vast referentieniveau, van een willekeurig deelgebied (cluster van vakken) in het model, in de tijd bepalen. Men kan de sedimentbalans van het modelgebied hiermee afleiden door het kiezen van een referentieniveau dat hoog genoeg is. Door het hoog-, gemiddeld, en laagwater te kiezen als referentieniveaus kan men de veranderingen van het intergetijdegebied afleiden. Daarom is het naverwerkingsprogramma zo ontworpen dat men ieder keer drie verschillende referentieniveaus mag geven. Het naverwerkingsprogramma produceert ook standaard het verloop van de hydrodynamische parameters in alle vakken.
- Naverwerking met variërende referentieniveaus. Dit werkt in principe op dezelfde manier als de naverwerking met de vaste referentieniveaus. Het verschil is dat de in tijd en ruimte variërende hoog-, gemiddeld, en laagwaters worden gebruikt als referentie niveaus. Zo kan men de verandering van het intergetijdegebied volgens de strikte definitie (gebied tussen hoog- en laagwater) bepalen.

Verder bestaat er een speciale naverwerkingsprocedure waarmee men een 2D vertaling van de morfologische ontwikkelingen kan afleiden. Als extra invoer wordt de initiële 2D bathymetrie van het gebied vereist. De door het model berekende morfologische veranderingen, weergegeven in de vervormingen van de geschematiseerde profielen, worden geprojecteerd op deze initiële bathymetrie. Zo ontstaat voor een bepaald tijdstip een nieuw, veranderde 2D bathymetrie. Deze procedure is ontwikkeld speciaal voor het geschikt maken van de modelresultaten als invoer voor de ecologische modellering via bepalen van ecotopen/habitaten. Een voorbeeld van zo verkregen resultaten is gegeven in Fig.A.3.

A.4 Toepassingen /Ervaringen

Sinds de ontwikkeling is ESTMORF al voor verschillende estuaria en zeegaten toegepast. Hieronder is een korte samenvatting gegeven van elk van deze toepassingen.

Westerschelde

De Westerschelde fungeerde als referentieprobleem bij de ontwikkeling van ESTMORF. De toepassing in dit estuarium is parallel gegaan aan de ontwikkeling van de ESTMORF-software.

Het ESTMORF-Westerschelde model is een operationeel morfologisch model, dat geschikt is voor de evaluatie van effecten van de menselijke ingrepen in het estuarium, m.n. bagger en stort activiteiten voor verruiming en onderhoud van de vaargeul. Het model dekt het hele estuarium inclusief het mondinggebied. Het is gecalibreerd aan de hand van gegevens over de morfologische veranderingen sinds 1968. Het model heeft al zijn dienst bewezen in verschillende projecten / studies. Momenteel wordt het model ingezet in het PROSES-SMER project. De opzet en de toepassingen van het model zijn gerapporteerd in vele rapporten.

Friesche Zeegat

De toepassing voor het Friesche Zeegat was destijds bedoeld als test voor de mogelijkheden van ESTMORF. De gemeten morfologische ontwikkelingen sinds de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 leveren de benodigde gegevens voor de calibratie / test van het model. Het model bleek goed in staat te zijn de invloeden van de afsluiting op de morfologische ontwikkeling te simuleren. Zowel de sedimentatie in het buitenste deel van het bekken als de erosie achterin het bekken zijn goed gereproduceerd door het model.

Southampton Water

Een ESTMORF model voor Southampton Water in Engeland was opgezet voor ABP om de effecten van een geplande terminal haven in Dibden Bay en de samenhangende maatregelen te evalueren. Het model is gecalibreerd aan de hand van sedimentatie – erosie gegevens van het estuarium in de huidige situatie. Vervolgens is het model gebruikt om de effecten van het project op de ontwikkeling van zowel de geulen als van het intergetijdegebied te bepalen voor verschillende scenarios van de zeespiegelrijzing.

Humber

Er zijn twee ESTMORF modellen opgezet voor het Humber estuarium in Engeland. Het eerst is opgezet binnen het kader van het EMPHASYS project, een strategisch onderzoekprogramma voor estuaria gefinancierd door de Britse overheid. Het model was gebruikt om de mogelijkheden van hybride-type morfologische modellen aan te tonen. Hierbij is het model gebruikt om de effecten van versnelde zeespiegelrijzing en van een ooit gepland maar nooit uitgevoerd landaanwinningsproject te simuleren. Het tweede model is een uitbreiding en detaillering van het eerste model, dat tevens beter is gecalibreerd. Dit

model is opgezet in opdracht van Environmental Agency, en gebruikt om de invloeden van zeespiegelrijzing en de voorgenomen natuurherstel-projecten te voorspellen. Nadruk van de studie ligt op de ontwikkelingen van het areaal intergetijdegebied. Opvallend bij dit estuarium is de grote invloed van de 18.6 jarige cyclus van het getij door de relatieve kleine morfologische tijdschaal.

Yangtze

ESTMORF is gebruikt als morfologische module in het EDSS (Estuarine Decision Support System), ontwikkeld binnen het kader van het LWI project. Het Yangtze estuarium in China was bij het LWI project gekozen als buitenlandse pilot toepassing van het EDSS. Daarom is er een ESTMORF-model voor dit estuarium ontwikkeld. Het doel van de pilot toepassing was vooral het demonstreren van de mogelijkheden van het EDSS. Daarom is het ESTMORF-model niet uitgebreid gecalibreerd, ook mede vanwege het gebrek aan gegevens.

Feiyun

Binnen het kader van het Delft Cluster project “Ecomorfologie voor kusten en estuaria” is er een ESTMORF-model opgezet voor Feiyun, een klein estuarium in Zhejiang, China. Opvallend hierbij is de extreme kleine morfologische tijdschaal en het grote effect van een verandering van de bovenstroomse rivierafvoer op de morfologie van het estuarium.

Noordelijk Deltabekken

Bij het onderzoek naar de morfologische modellering van het NDB is er een pilot ESTMORF-model opgezet aan de hand van het bestaande SOBEK model voor het NDB. Het model is helemaal niet gecalibreerd. Er is alleen aangetoond dat het model werkt en dat het zinnige resultaten geeft met betrekking tot een (grote) verandering van het lozingsprogramma van de Haringvlietsluizen.

Het model bevat ook de Haringvlietmond. Zoals Fig.A.4 laat zien ligt de grens van het modelgebied op de rug van de Hinderplaat.

Overzicht alle toepassingen

In de volgende tabel is een overzicht gegeven van alle toepassingen tot nu toe. Per toepassing is ook aangegeven welke van de relevante beheerparameters zoals beschreven in Hoofdstuk 2 zijn gesimuleerd. Duidelijk is te zien dat de meeste ervaring is opgedaan voor de sediment balans. In iets minder mate is er ook ervaring met de verandering van areaal intergetijdegebied. Met betrekking tot MKL en strandbreedten is er nog nooit ervaring opgedaan in de eerdere toepassingen van het model.

Historische validatie / Ervaringen met de toepassingen (+ betekent validerende ervaring, o betekent ervaring in de toepassing maar niet geverifieerd met bijv. veld data)					
Toepassing	sediment volume	MKL en strandbreedte	ligging plaat en geul	areaal interge tijdege bied	vaargeul diepte
Westerschelde	+		+	+	+
Friesche Zeegat	+				
Humber	+			+	
Southampton Water	+			o	
Yangtze	o		o	o	
Feiyun	+				
NDB	o				

B Vragen over toepasbaarheid van ESTMORF

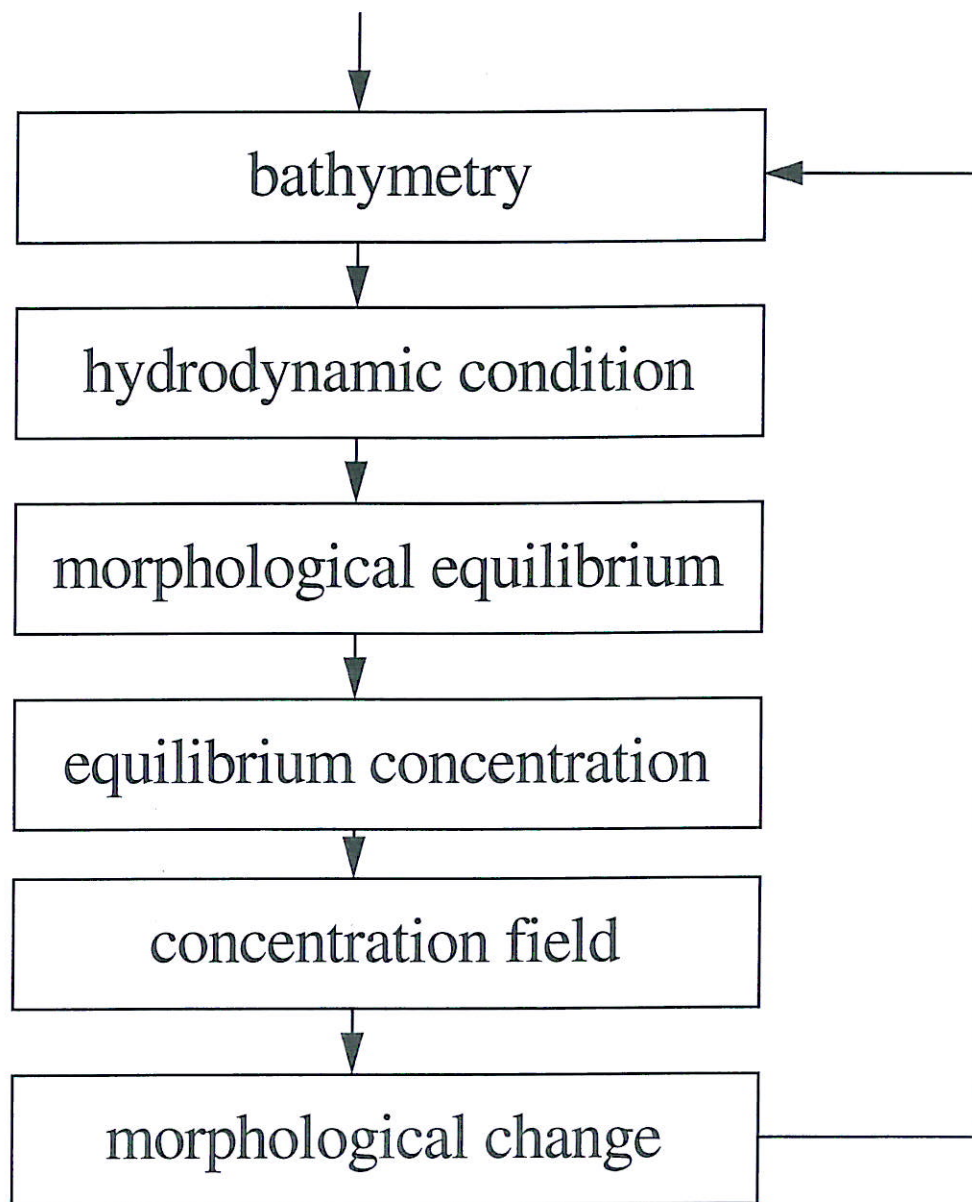
Naar aanleiding van gebiedskennis over de Haringvlietmonding (Stam et al, 2002), modelkennis (concepten waarop een model gebaseerd is) en modelervaring (o.a. ESTMORF voor de Westerschelde en monding) zijn er vragen geformuleerd m.b.t. de inzet van ESTMORF voor de simulatie van beheersparameters in zeegaten in het algemeen, en in de Haringvlietmonding in het bijzonder. Voordat een ESTMORF schematisatie van de Haringvliet (incl. monding) gemaakt wordt, is het belangrijk deze vragen verder te analyseren.

Concreet zijn de volgende vragen gesteld:

1. In het rapport RIKZ/OS/2002.028 wordt gesteld dat de volgende beheersparameters van belang zijn in de Haringvlietmonding: sedimentvolume in de monding, MKL, strandbreedte, locatie platen en geulen, areaal intergetijdengebied en vaargeul diepte. Tevens is aangegeven welke processen (b.v. storm en getij) de ontwikkeling van de beheersparameters in de monding mogelijk beïnvloed hebben. Bij de vraag welke beheersparameters door ESTMORF gesimuleerd kunnen worden gaat het niet alleen om de mogelijkheid om de parameters als output te garanderen, maar ook om na te gaan of de processen die de beheersparameter beïnvloeden in het model in rekening worden gebracht; welke procesmodules en welke empirische relaties worden toegepast en zijn deze toereikend?
2. Een aantal van de genoemde beheersparameters is in eerdere modelstudies aan bod gekomen. Kan door middel van historische validatie van deze data al een uitspraak worden gedaan over de te verwachten nauwkeurigheid van de ESTMORF-modelresultaten?
3. Sediment in de Haringvlietmonding bestaat voor een aanzienlijk deel uit slib. Een groot aantal (beheers)vragen opgesteld door de Werkgroep Morfologie & Kwaliteit van het project De KIER omvatten slibprocessen. Metingen in het gebied (Medusa metingen en boringen) laten zien dat sinds de afsluiting in 1970 een dik pakket slib is afgezet. Is het LT-model in staat om met slibfracties om te gaan en zo ja ook in combinatie met zand?
4. Stroming, sedimenttransport en morfologie in zeegaten hebben veelal een twee- of driedimensionaal karakter, terwijl ESTMORF en SOBEK-MOR ééndimensionale modellen zijn. In hoeverre kan de fysica en dynamica van een dergelijke meer dimensionaal systeem weergegeven worden door een ééndimensionaal netwerkmodel? In hoeverre vormt de afwezigheid van golfmodellering een beperking?
5. Door een wijziging van het spuibeheer neemt de interactie tussen het binnengebied (het Haringvliet) en het buitengebied (de Haringvlietmonding) weer toe. Voor zowel het binnengebied als het buitengebied is een voorspelinstrumentarium gewenst waarbij deze interactie wordt meegenomen. Is Estmorf ook geschikt voor bekkens met obstakels (i.e. de Haringvlietluizen, die een wezenlijk verschil tussen de Haringvlietmonding en de Westerscheldemonding vormen)? Is Estmorf de meest geschikte modelkeus voor een empirische benadering bij de koppeling tussen binnengebied en buitengebied? Hoe verhoudt SOBEK-Mor (meer gericht op de korte termijn / middellange termijn) zich tot ESTMORF (meer gericht op de middellange termijn / lange termijn)?
6. Eerder is al geconstateerd dat de ontwikkeling van intertijdengebieden nog onvoldoende gereproduceerd kan worden (in vergelijking met de ontwikkeling van geulen). Hoe

realistisch is ESTMORF (de schematisatie van het dwarsprofiel) voor ondiepe gebieden die niet droogvallen (in dergelijke vakken is geen profiel meer opgegeven)?

7. De Hinderplaat (de grootste plaat in de Haringvlietmonding) vertoont sinds de afsluiting in 1970 een groei, daarnaast heeft er ook een verandering in de oriëntatie van deze plaat plaats gevonden. Door het reduceren van het getijdenprisma zijn oude geulen in het gebied dichtgeslibd. Bij (gedeeltelijke) heropening van de sluizen is de verwachting dat nieuwe geulen gevormd zullen worden. Kan een dergelijk hoog dynamisch gebied zoals de Haringvlietmonding, waar platen en geulen ontstaan, verdwijnen en draaien door ESTMORF en/of SOBEK-MOR gesimuleerd worden?
8. Bij een mogelijke historische validatie (hindcast) zal voornamelijk een sedimentarend systeem a.g.v. een reductie in getijdenprisma gevalideerd worden, bij een voorspelling zal juist een eroderend systeem a.g.v. een toename in getijdenprisma gemodelleerd moeten worden. In hoeverre zegt een validatie voor een importerend systeem iets over modelprestaties voor een exporterend systeem?
9. Voor het Westerschelde model van ESTMORF geldt dat de rand van het model in zeewaartse richting verplaatst is. Hierdoor valt ook het mondingsgebied binnen de schematisatie. Aanleiding hiervoor was het terugdringen van randeffecten in het binnengebied. Vervolgens is de nieuwe versie ingezet voor het modelleren van het mondingsgebied. Vraag blijft in hoeverre de randen de resultaten in termen van beheersparameters in het mondingsgebied beïnvloeden. Hoe ver moet de rand zeewaarts liggen om betrouwbare resultaten voor de monding te verwachten?
10. Bij de studie m.b.t. de Westerschelde(monding) is een calibratie uitgevoerd op een tijdschaal van 30 jaar; de periode van 1968 tot heden. Dat betekent dat validatie niet heeft kunnen plaats vinden. Is het mogelijk om als aanvullende validatie de data van de Haringvlietmonding in te zetten?
11. Berekeningen van morfologische veranderingen vinden meestal in een aantal stappen plaats. Bijvoorbeeld het beginpunt, de hydrodynamica. Welke hydrodynamische resultaten bepalen in het model de verdere morfologische ontwikkelingen (afhankelijk van de toegepaste procesbeschrijvingen of empirische relaties), m.a.w. op welke uitkomsten moet de waterbeweging gevalideerd worden? En op welke uitkomsten de morfologie?
12. In numerieke modellen komen meestal meerdere modelcoëfficiënten voor. Tijdens de calibratiefase worden deze coëfficiënten ingesteld. Een overzicht van de belangrijkste coëfficiënten, de range waarbinnen deze gevarieerd mogen worden tijdens de calibratie en de verschillende instellingen voor de verschillende modelstudies geeft enig inzicht in de robuustheid van het model. De instelling van een juiste rekentijdstap is cruciaal voor modeluitkomsten. Welke aspecten beïnvloeden de tijdstap, is dat b.v. de snelheid waarmee veranderingen in de morfologie optreden en dus een gebiedsafhankelijke instelling? Hoe is dit voor ESTMORF getest en zijn verwijzingen naar desbetreffende literatuur aanwezig?



Reken procedure van ESTMORF

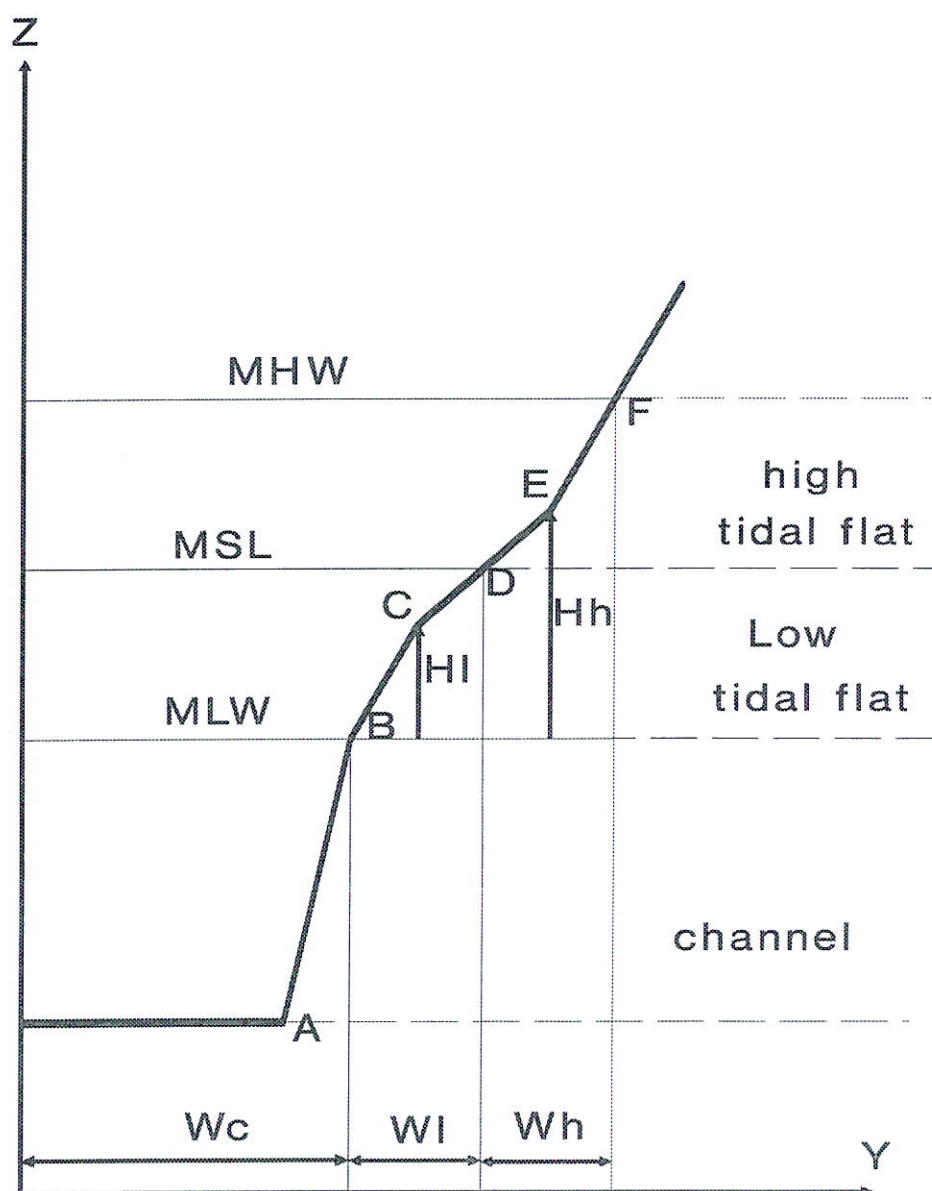
Z3596

sept.

2003

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. A.1



Schematisatie van dwarsprofielen in ESTMORF

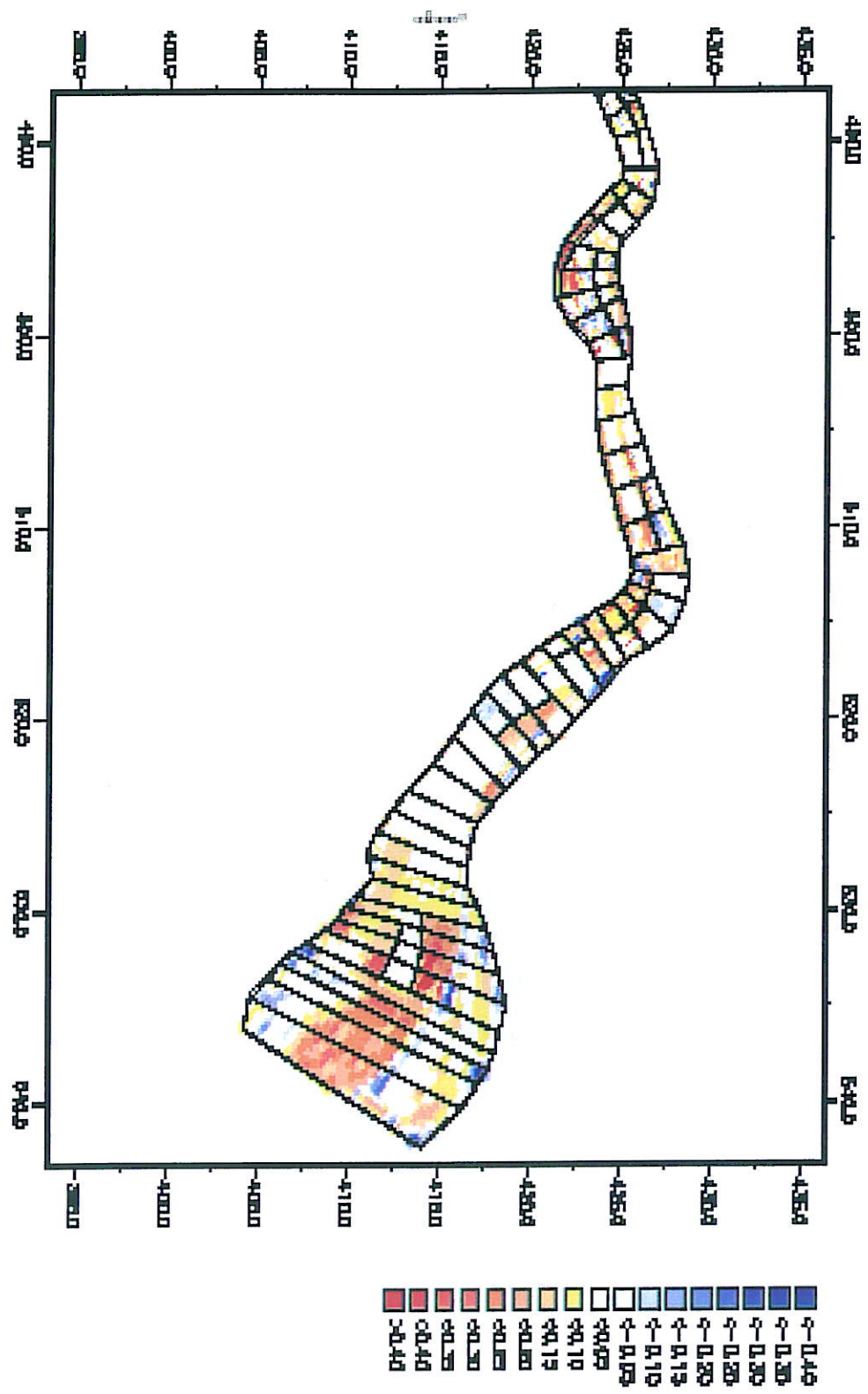
Z3596

sept.

2003

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. A.2



Een voorbeeld van 2D naverwerking van resultaten uit
ESTMORF berekening

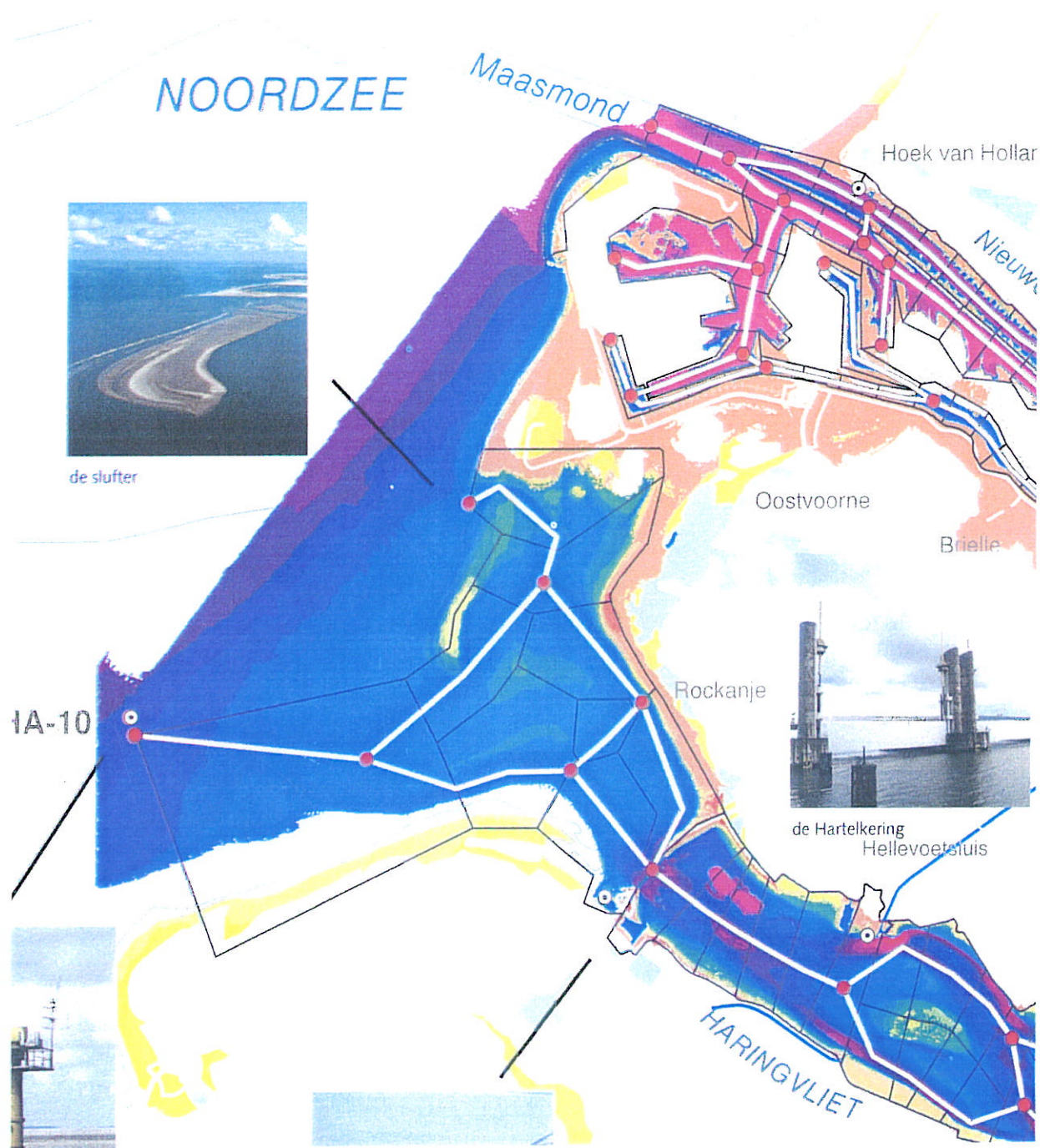
Z3596

sept.

2003

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. A.3



Schematisatie van het SOBEK model voor het NDB
in het mondinggebied

Z3596

sept.

2003

WL | DELFT HYDRAULICS

Fig. A.4



WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

