

**Beschrijving kennisbasis  
modellering van zeegaten  
t.b.v. Kustgenese2**





**Beschrijving kennisbasis  
modellering van zeegaten t.b.v.  
Kustgenese2**

Edwin Elias  
Pieter Koen Tonnon

1230381-000



## Titel

Beschrijving kennisbasis modellering van zeegaten t.b.v. Kustgenese2

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1230381-000	1230381-000-ZKS-0005	58

## Trefwoorden

Morfologie, Modellen, Kustgenese2





## Samenvatting

Dit rapport beschrijft (a) de stand van zaken met betrekking tot de morfologische kennis en modellering van zeegaten op tijdschalen van jaren tot decennia en geeft (b) een overzicht van verbeterpunten in de morfologische modellering. Dit overzicht dient als basis voor een nog op te stellen onderzoeksplan voor de modellering van zeegaten binnen Kustgenese2. Uitgangspunt is de huidige onderhoudsstrategie van de kust waarbij de zandvolumes van de kust op peil gehouden worden met suppleties. De focus ligt dan ook op de modellering van de zandige buitendelta's en de uitwisseling met het zeegat op de tijd- en ruimteschaal van suppleties (jaren tot decennia).

Proces-gebaseerde modellen presteren redelijk op de korte termijn (dagen tot maanden) en zeer lange termijn (decaden tot eeuwen), maar minder op de middellange termijn (jaren tot decaden). Op basis van recente studies en gesprekken met modelexperts worden in dit rapport de volgende onderwerpen geïdentificeerd voor modelverbetering: (1) hydrodynamica en sedimenttransport in de brandingszone, (2) uitwisseling van sediment tussen nat en droog, (3) estuarine processen en (4) de geulstabiliteit en bodemsamenstelling. Daarnaast is het mogelijk de rekentijd te verkleinen en de nauwkeurigheid van voorspellingen te vergroten door verbeteringen in het numerieke schema (5). Voor de verbetering van de middellange termijn modelvoorspellingen binnen Kustgenese2 wordt een 3-stappen plan voorgesteld. Stap 1 is gericht op korte-termijn simulaties en het gedetailleerd oplossen van processen. Dit maakt het mogelijk modelverbeteringen door te voeren en te toetsen, wat essentieel is voor het opschalen naar het voorspellen van morfologische veranderingen op de schaal van een suppletie (1-5 jaar; Stap 2) of op de schaal van een suppletiestrategie (5-25 jaar; Stap 3).

## Referenties

Opdrachtbrief SPA Zeegaten KG2 KPP met zaaknummer 31115794/Adema, bestelnummer 4500248710, 14 maart 2016.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	mei 2016	Dr. ir. E.P.L. Elias		Prof. dr. ir. Z.B. Wang		Drs. F.M.J. Hoozemans	
		ir. P.K. Tonnon					

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Aanpak	1
1.4	Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>KPP B&amp;O Kust en deelproject 'Zeegaten'</b>	<b>3</b>
2.1	Opzet KPP B&O Kust	3
2.1.1	Deelprojecten	3
2.1.2	Hypothesen	3
2.2	Deelproject 'Zeegaten'	5
2.2.1	Onderzoekslijn	5
2.2.2	Producten	7
<b>3</b>	<b>Stand van zaken: systeemkennis</b>	<b>9</b>
3.1	De Hollandse kust	9
3.2	De Voordelta	10
3.3	De Waddenzee	11
3.4	Samenvattende opsomming	16
<b>4</b>	<b>Stand van zaken: modellering van zeegaten</b>	<b>17</b>
4.1	Inleiding: modellering op verschillende tijd- en ruimteschalen	17
4.2	Lessons learned	19
4.2.1	Korte termijn (quasi-realttime) modellering	19
4.2.2	Mesoschaal modellering	20
4.2.3	Macro- tot Megaschaal modellering	22
4.2.4	Discussie en conclusies	23
4.3	Verbeterpunten binnen de huidige modelkennis en formuleringen	25
4.4	Samenvattende opsomming	26
<b>5</b>	<b>Aanpak verbetering modelinstrumentarium in relatie tot Kustgenese2</b>	<b>29</b>
5.1	Inleiding	29
5.2	Modelaanpak en –toepassing: 3-stappenplan	29
5.3	Modelverbeteringen	31
5.3.1	Hydrodynamica en sedimenttransporten in de branding	31
5.3.2	Uitwisseling nat en droog	32
5.3.3	Geulstabiliteit (sedimentsortering, hellingseffecten en avalanching)	32
5.3.4	Estuarine Processen	32
5.4	Modelvalidatie	33
5.5	Samenvattende opsomming	34
5.5.1	Modellering	34
5.5.2	Metingen	36
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Literatuur</b>	<b>41</b>

## Bijlage(n)

<b>A</b>	<b>Overzicht hypothesen KPP B&amp;O Kust</b>	<b>A-1</b>
A.1	Werken met hypothesen	A-1
A.2	Hypothesen	A-2
A.2.1	Basislaag – werking kustfundament	A-2
A.2.2	Basislaag – sedimentuitwisseling kustfundament en getijbekkens	A-2
A.2.3	Basislaag – Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust (onderdeel KPP Kustbeleid 2013)	A-3
A.2.4	Netwerklaag – Toestand van de kust	A-3
A.2.5	Netwerklaag – Relatie kustlijnzorg & kustveiligheid (KPP-Kustbeleid)	A-3
<b>B</b>	<b>Overzicht producten KPP B&amp;O Kust, deelproject ‘Zeegaten’</b>	<b>B-1</b>
B.1	Inleiding	B-1
B.2	Producten 2011	B-1
B.2.1	Producten 2011 deelproject “Zeegaten”	B-1
B.3	Producten 2012	B-1
B.3.1	Producten 2012 deelproject “Zeegaten”	B-1
B.4	Producten 2013	B-2
B.4.1	Producten 2013 deelproject “Zeegaten”	B-2
B.4.2	Producten 2013 vanuit overige deelprojecten, met bijdragen vanuit deelproject “Zeegaten”	B-2
B.5	Producten 2014	B-3
B.5.1	Producten 2014 deelproject “Zeegaten”	B-3
B.5.2	Producten 2014 vanuit overige deelprojecten, met bijdragen vanuit deelproject “Zeegaten”	B-3
B.6	Producten 2015	B-4
B.6.1	Producten 2015 deelproject “Zeegaten”	B-4
B.6.2	Producten 2015 vanuit overige deelprojecten, met bijdragen vanuit deelproject “Zeegaten”	B-5
B.7	Producten 2016	B-6
<b>C</b>	<b>Overzicht gerelateerde onderzoeksprojecten</b>	<b>C-1</b>
C.1	NEMO	C-1
C.2	EMERGO	C-1
C.3	STW NatureCoast	C-2
C.4	CoCoChannel	C-3
C.5	STW SEAWAD	C-4
<b>D</b>	<b>Interviews</b>	<b>D-1</b>
D.1	Maarten van Ormondt	D-1
D.2	Arjen Luijendijk	D-1
D.3	Jebbe van der Werff	D-2



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Binnen het onderzoekprogramma KPP B&O Kust (KPP) werken Deltares en Rijkswaterstaat samen aan het beantwoorden van vragen met betrekking tot het beheer en onderhoud van de kust en het vergroten en verspreiden van kennis van de werking van het Nederlands kuststelsel. Het onderzoekprogramma werkt met hypothesen over het functioneren van het kuststelsel die periodiek geëvalueerd en zo nodig aangepast worden aan de hand van de resultaten van het programma.

Het deelproject 'uitwisseling getijbekkens en morfodynamiek eilandkoppen' bestudeert de sedimentuitwisseling tussen het kustfundament en de getijbekkens van de Waddenzee en de zeegaten en estuaria van de Zeeuwse delta en bestudeert de morfologische ontwikkeling van eilandkoppen. Hierdoor is het inzicht in de systeemwerking, fysica en processen in zeegaten de afgelopen jaren flink toegenomen.

Vanuit het te starten programma Kustgenese2 (KG2) is er een wens om de midden-lange termijn ontwikkeling (jaren tot decennia) van de zeegaten inclusief buitendelta's en het effect van toekomstige ingrepen in de zeegaten te kunnen voorspellen. Het huidige modelinstrumentarium is hiervoor nog niet toereikend. Enerzijds begrijpen we misschien niet alle processen in zeegaten en rond buitendelta's, anderzijds zijn er nog ontwikkelingen in het modelinstrumentarium nodig.

## 1.2 Doelstelling

Het doel van dit rapport is het beschrijven van de stand van zaken met betrekking tot de morfologische kennis en modellering van zeegaten op tijdschalen van jaren tot decennia en het opstellen van een overzicht van noodzakelijke en concrete verbeterpunten in de procesbeschrijving en morfologische modellering van zeegaten in het kader van Kustgenese2. Bij het overzicht van verbeterpunten wordt verder onderscheidt gemaakt in verbeteringen die binnen Kustgenese2 kunnen worden gerealiseerd (vóór 2020) en verbeteringen die in de periode daarna kunnen worden gerealiseerd.

Het in dit rapport gegeven overzicht dient als basis voor een nog op te stellen onderzoeksplan waarmee binnen Kustgenese2 de hiaten in bestaande proceskennis kunnen worden ingevuld en een modelinstrumentarium kan worden ontwikkeld dat de midden-lange termijn ontwikkeling van zeegaten en buitendelta's en het effect van toekomstige ingrepen hierop kan voorspellen.

## 1.3 Aanpak

Een belangrijk uitgangspunt voor dit rapport is dat we redeneren vanuit de huidige onderhoudsstrategie van de kust. De zandvolumes van de kust worden op peil gehouden door zandsuppleties. Deze suppleties vinden plaats langs de kust en niet in de bekkens. Wat is er aan modelverbetering nodig om deze strategie beter te kunnen onderbouwen? Nu maar ook in de toekomst. Kunnen we dan met de verbeterde modellen een schatting doen van het benodigde toekomstige beheer?

Samengevat zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- KPP B&O Kust is de basis, we bouwen voort op de basis die is gelegd binnen KPP B&O Kust;
- zand staat centraal, we redeneren vanuit de zandige morfologie en vanuit zandtransporten, niet vanuit zand-slib of slib;
- de kust staat centraal, we redeneren vanuit zee en de kust, niet vanuit de bekkens

Als basis van dit document is de kennis gebruikt opgedaan binnen KPP B&O kust en een inventarisatie van de modelknelpunten bij de verschillende experts binnen Deltares. Dit document geeft een verdere verdieping van het onderdeel proces-gebaseerde modellering in de modellenmemo (Tonnon en Elias, 2015), waarin vanuit KPP B&O Kust een aanzet is gegeven voor het lange-termijn ontwikkelpad voor de modellering van zeegatsystemen.

Bij het opstellen van dit rapport zijn de volgende onderdelen en activiteiten onderscheiden:

- het beschrijven van de opzet van het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust en de daarin gehanteerde hypothesen;
- het beschrijven van de onderzoekslijn en producten van het deelproject 'Systeemwerking uitwisseling getijdebekken & morfodynamiek eilandkoppen', ook wel deelproject 'Zeegaten' genoemd;
- het beschrijven van de stand van zaken met betrekking tot de morfologische kennis van zeegaten;
- het beschrijven van de stand van zaken met betrekking tot de morfologische modellering van zeegaten op middellange termijn (jaren tot decennia);
- Inventarisatie van de expertmening van morfologische modelleers bij Deltares;
- het opstellen van een overzicht van noodzakelijke en concrete verbeterpunten in de procesbeschrijving en morfologische modellering van zeegaten. Hierbij wordt onderscheidt gemaakt in verbeteringen die kunnen worden gerealiseerd vóór 2020 en in de jaren direct daarna.

Deze studie is uitgevoerd door ir. P.K. Tonnon en Dr. ir. E. Elias, in nauw overleg met ir. A.P. de Looft en ir. S. Quirijns van Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving. Het rapport is intern gereviewed door Prof. Dr. ir. Z.B. Wang.

#### 1.4 Leeswijzer

Dit eerste hoofdstuk beschrijft de aanleiding, doelstelling en aanpak van de studie. Hoofdstuk 2 behandelt de opzet van het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust en de onderzoekslijn en producten van het deelproject 'Systeemwerking uitwisseling getijdebekken & morfodynamiek eilandkoppen', ook wel deelproject 'Zeegaten' genoemd. In Hoofdstuk 3 wordt de stand van zaken met betrekking tot de systeemkennis van zeegaten beschreven. In Hoofdstuk 4 volgt de stand van zaken met betrekking tot de modellering van zeegaten. Hoofdstuk 5 tot slot, beschrijft verbeterpunten in de procesbeschrijving en morfologische modellering van zeegaten.

Bijlage A geeft een compleet overzicht van de hypothesen zoals in gebruik bij het programma B&O Kust en beschrijft de achtergrond hiervan. Bijlage B geeft een compleet overzicht van de producten van het deelproject 'Systeemwerking uitwisseling getijdebekken & morfodynamiek eilandkoppen' (Zeegaten). Bijlage C geeft een overzicht van de belangrijkste, voor de morfologische modellering van zeegaten, relevante projecten en programma's. Bijlage D vat de interviews met expert modelleers over modelverbeteringen samen.

## 2 KPP B&O Kust en deelproject 'Zeegaten'

### 2.1 Opzet KPP B&O Kust

#### 2.1.1 Deelprojecten

Het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. In 2011 is hiertoe een meerjarenplan opgesteld waarbij gewerkt is met hypothesen over het functioneren van het zandige kustsysteem. Het programma bestaat uit een zestal deelprojecten waarin verschillende aspecten van het morfologische en ecologische systeem centraal staan. De achterliggende redenatie hierbij is dat kennis van de morfologie van het kustsysteem onontbeerlijk is om het suppleren efficiënter en duurzamer te maken. Kusterosie heeft een morfologische oorzaak en daarom ligt de oplossing in het verkrijgen van voldoende kennis.

Deze deelprojecten zijn:

- 1 Toestand van de kust
- 2 Werking kustfundament & Verdeling suppletiezand
- 3 Uitwisseling getjibekkens & Morfodynamiek eilanden
- 4 Ondersteuning Rijkswaterstaat
- 5 Ecologisch gericht suppleren
- 6 Project coördinatie, - integratie en disseminatie.

#### 2.1.2 Hypothesen

Rijkswaterstaat baseert keuzes over suppleties op bestaande kennis van het kustsysteem (blauwe lijnen in Figuur 2.1). Als er sprake is van kennisleemten worden hiervoor hypothesen gebruikt. Deze hypothesen worden periodiek geëvalueerd en zo nodig aangepast aan de hand van nieuwe kennis en onderzoekresultaten; De aanpak van KPP-B&O kust is een cyclisch proces, zie Figuur 2.1.

Het toetsen van deze hypothesen en beantwoorden van de onderzoeksvragen die daarbij naar voren komen, wordt opgepakt in het project B&O Kust (rode lijnen in Figuur 2.1) Als daar nieuwe inzichten uit naar voren komen, kan dat leiden tot aanpassing van de hypothese en suppletie strategie.



Figuur 2.1 Aanpak KPP B&O Kust. Uitvoering (blauwe pijlen): Op basis van bestaande kennis wordt de huidige uitvoering van suppleties door RWS vastgesteld. Als er sprake is van kennisleemten worden hiervoor hypothesen gebruikt. Door onderzoek (rode pijlen) aan kennisleemten worden de hypothesen getoetst en indien nodig aangepast. Het resultaat is een toename van kennis dat leidt tot aanpassen van hypothesen en/of het aanpassen van de uitvoering

Door het werken met de hypothesen zorgen we voor: een focus in het onderzoek die relevant is voor beheer & beleid en een directe link heeft met de keuzes in beheer & beleid. Deze werkwijze heeft de voorkeur boven het werken met een (oneindig) aantal kennisvragen waarvan de link met beheer & beleid praktisch minder duidelijk is (of voor meerdere interpretaties vatbaar).

De hypothesen gebruikt binnen het zeegaten onderzoek zijn:

- Suppletiezand wordt verdeeld over het gehele kuststelsel.
- De Waddenzee onttrekt zand aan het kustfundament. Het onttrokken volume wordt bepaald door oppervlak Waddenzee, relatieve zeespiegelstijging (dus inclusief bodemdaling door mijnbouw) en morfologische aanpassingen afsluitingen. In 2014 vervangen door:
  - De Waddenzee onttrekt sediment aan het kustfundament.
  - Het volume dat op lange termijn wordt onttrokken, wordt bepaald door oppervlak Waddenzee, relatieve zeespiegelstijging (dus inclusief bodemdaling door mijnbouw) en morfologische aanpassingen afsluitingen.
  - De snelheid waarmee sediment aan het kustfundament wordt onttrokken wordt bepaald door de netto transportcapaciteit in de zeegaten.
- De Westerschelde onttrekt zand aan het kustfundament. Het onttrokken volume wordt bepaald door oppervlak Westerschelde, relatieve zeespiegelstijging en morfologische aanpassingen vaarwegverdieping. (NB inmiddels kan deze hypothese worden veranderd in 'De Westerschelde wisselt zand uit met het kustfundament'. Deze wijziging is echter nog niet officieel vastgesteld)
- Er is géén significant sedimenttransport door de Oosterscheldekering.
- Suppleren in de kustzone verhoogt de grootte van het netto zandtransport naar de Waddenzee niet.
- De ontwikkeling van eilandkusten wordt gestuurd door ontwikkelingen op de aangrenzende buitendelta's.

In 2014 vervangen door:

- De ontwikkeling van eilandkoppen wordt gestuurd door ontwikkelingen op de aangrenzende buitendelta's.

Zie bijlage A voor een compleet overzicht van de hypothesen en de eerste evaluatie aan de hand van de KPP B&O Kust onderzoeksresultaten in 2014 (Bruens, 2014).

## 2.2 Deelproject 'Zeegaten'

Het deelproject 'uitwisseling getijbekkens en morfodynamiek eilandkoppen' (Zeegaten) van het KPP programma B&O Kust bestudeert de sedimentuitwisseling tussen het kustfundament en de getijdebekkens, zeegaten en estuaria van zowel de Wadden en Zeeuwse delta. Daarnaast wordt de morfologische ontwikkeling van eilandkoppen bestudeerd. Met de verworven kennis kunnen de effecten van ingrepen in de kustzone op de Wadden en de Zeeuwse delta (en andersom) beter geëvalueerd worden en kunnen eilandkoppen en eilandkusten efficiënter beheerd worden. Binnen het deelproject wordt met de volgende onderverdeling gewerkt:

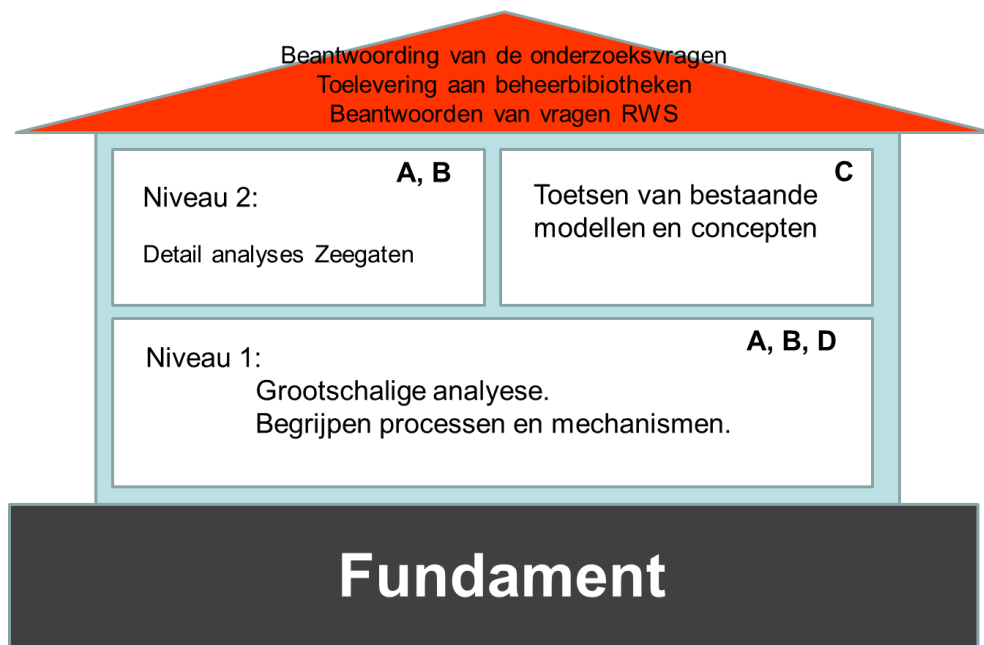
- A. Morfologische ontwikkelingen Zeeuwse delta
- B. Morfologische ontwikkelingen Wadden
- C. Validatie en evaluatie van het Modelinstrumentarium
- D. Uitdragen kennis en wetenschappelijke publicaties

In deze onderverdeling is expliciet onderscheid gemaakt in de Waddenzee en de Zeeuwse Delta (of Voordelta), zodat beide systemen voldoende aandacht krijgen. Naast de gebiedsspecifieke analyse proberen we generieke kennis te verwerven o.a. door validatie en evaluatie van het modelinstrumentarium. De kennis wordt niet alleen gerapporteerd in memo's of rapportages, maar we streven juist naar het uitdragen van kennis door publicaties. Met publicaties zorgen we voor internationale kwaliteitsborging, dragen we kennis en resultaten uit en ondersteunen we de internationale exploitatie van Nederlands kustbeheer en systeemkennis. Publicaties zijn verder een effectief middel om kennis geheel objectief te verspreiden, zonder het Deltares of Rijkswaterstaat label. Dit laatste kan vooral op termijn nuttig zijn bij de onderbouwing van bepaalde keuzes in het suppletiebeleid.

### 2.2.1 Onderzoekslijn

Een belangrijk middel om toch iets te kunnen zeggen over de langere tijdschalen is aggregatie. Door kennis te gebruiken van systeem op andere tijdschalen kan het grotere – of kleinere schaal gedrag misschien worden opgelegd zonder ieder detail van de processen te beschrijven (zie Hoofdstuk 3.1 voor meer uitleg). Dit principe vormt ook binnen het KPP-B&O kust programma een hoeksteen van het onderzoek. Binnen KPP proberen we door data (her)analyse ervoor te zorgen dat we het eerst het grootschalige gedrag beter begrijpen. Hierdoor krijgen we ook een meer begrip op de midden tijdschaal (de Meso – en Marco tijdschaal), de tijdschaal waarop ons kustbeheer door suppleties direct invloed heeft. De opzet van de tot nu gevolgde onderzoekslijn wordt geïllustreerd in Figuur 2.2 (De eerder genoemde onderdelen, A tot en met D, zijn verwerkt in de onderzoekslijn).

**Begrijpen van de Processen en Mechanismen  
van de Sedimenthuishouding in het Nldse  
kuststelsel**



Figuur 2.2 Opzet onderzoek KPP B&O Kust deelproject "Uitwisseling getijdebekkens & Morfodynamiek eilandkoppen"

De basis van het deelproject, het fundament, wordt gevormd door de hypothesen zoals weergegeven in Bruens (2014). De toetsing van deze hypothesen vindt plaats door analyses van de beschikbare meetdata op grote schaal (niveau 1) en kleine schaal (niveau 2). De beschikbaarheid van coherente meetdata is essentieel voor het deelproject en wordt daarom ook als fundament van het onderzoek gezien. Deze data is de afgelopen jaren op orde gebracht en wordt jaarlijks geactualiseerd.

Op basis van dit fundament worden verschillende analyses uitgevoerd. Grootschalige analyses (niveau 1) zijn essentieel om het morfologische systeem te begrijpen. In voorgaande jaren zijn hiervoor de grootschalige sedimentbalans en morfologische veranderingen beschouwd van zowel de Waddenzee (gerapporteerd in Elias et al. 2012) en de Voordelta (Elias en van der Spek, 2016). Op basis van deze analyses is veel inzicht verkregen in de werking van de individuele zeegaten. Deze kennis en inzichten vormen de basis van de detail analyses (niveau 2). Het zeegat van Ameland is uitvoerig bestudeerd en gerapporteerd in 2013 en 2014. Deze detailanalyses dragen rechtstreeks bij tot de Beheerbibliotheken en de beantwoording van vragen door Rijkswaterstaat. De keuze voor het betreffende gebied van detailanalyse wordt mede gestuurd door de verwachte vragen en de op te stellen Beheerbibliotheek.

Een apart blok wordt gevormd door Toetsen van modellen en concepten. Op basis van de Grootschalige (niveau 1) analyses worden ook hiaten in de huidige kennis of algemene onderwerpen geïdentificeerd (niet gebiedsafhankelijk). In 2012-2014 is aandacht besteed aan toetsing van de huidige modellen d.m.v. de modellering van Ameland en het ontwerpen van analyse methoden (bijv. Tracer simulaties).

Vanuit het fundament, door middel van begrip van het morfologische systeem (niveau 1) en toepassing van deze kennis op detailonderzoek van individuele systemen proberen we onderzoeksvragen te beantwoorden en dragen we bij aan de Beheerbibliotheek (actuele kennis) en anticiperen we op mogelijke vragen van Rijkswaterstaat.

### 2.2.2 Producten

Bijlage B geeft een overzicht van de producten van KPP B&O Kust met betrekking tot zeegaten. Dit overzicht bevat niet alleen de producten van het deelproject Uitwisselinggetijdebekkens en morfodynamiek van eilandkoppen (Zeegaten), maar bevat ook gerelateerde producten uit andere KPP B&O Kust deelprojecten met bijdragen vanuit het deelproject "Zeegaten". Dit overzicht is gebaseerd op de zogenaamde requirements KPP B&O Kust 2011 tot en met 2015 en het overzicht op <https://publicwiki.deltares.nl/display/KPP/Producten>.

De voor de beschrijving van de stand van zaken met betrekking tot systeemkennis en modellering van zeegaten belangrijkste producten zijn:

- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F, Wang, Z.B. and De Ronde, J., 2012. Morphodynamic development and sediment Budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences (Geologie en Mijnbouw)*, 91 – 3, pag. 293 – 310, 2012.
- Van der Spek, A.J.F. en Lodder, Q., 2015. A new sediment budget for the Netherlands; the effects of 15 years of nourishing (1991-2005). *Proceedings of Coastal Sediments 2015*, San Diego, USA.
- Elias, E.P.L, van der Spek, A.J.F., Lazar, M. 2016. The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal delta's in the SW Netherlands; Large-scale morphological changes and sediment budget 1965-2013; Impacts of large-scale engineering. Accepted for publication *Netherlands Journal of Geosciences*
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., 2016. Understanding ebb-delta-coastline interactions; a field case study of Texel inlet (Wadden Sea, The Netherlands) (Manuscript in preparation)





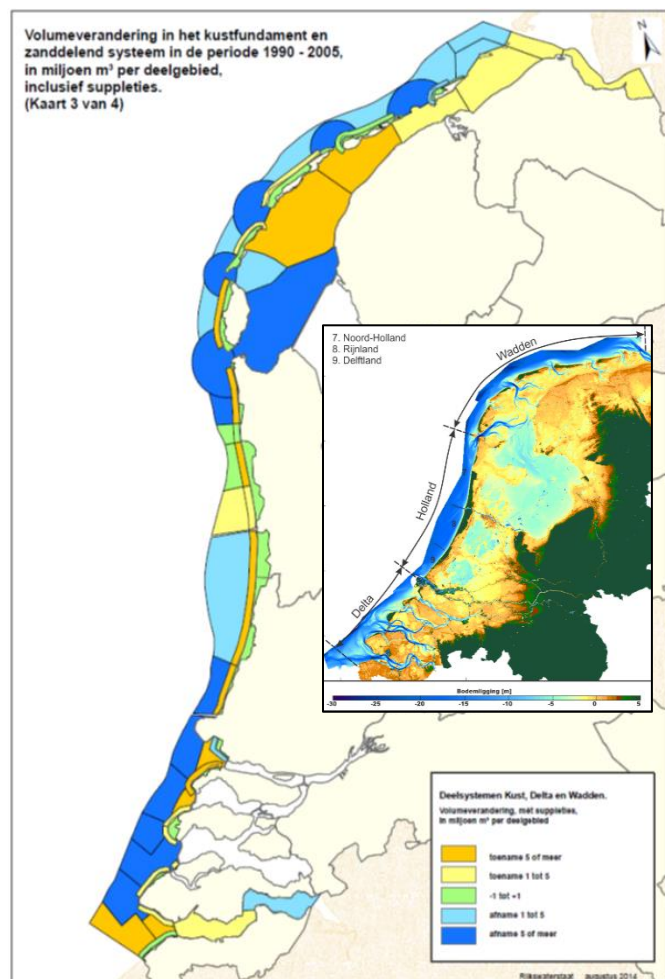
### 3 Stand van zaken: systeemkennis

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de belangrijkste inzichten in het gedrag van de Nederlandse kust met een focus op de zeegaten. Hierbij wordt de 'klassieke' onderverdeling van het kuststelsel in 3 min of meer gescheiden deelsystemen gebruikt (zie figuur 3.1). Deze 3 deelsystemen zijn: (1) de Zeeuwse delta tussen de Belgische grens en Hoek van Holland, (2) de gesloten Hollands Kust tussen Hoek van Holland en Callantsoog en (3) de Waddenkust. De deelsystemen Voordelta en Hollandse kust zijn vrijwel gescheiden door de havendammen bij Hoek van Holland en het baggeren in de Euro-Maas geul. In het noorden is deze scheiding minder duidelijk. Hier loopt de Hollandse Kust over in de buitendelta van het Zeegat van Texel. In de volgende paragrafen worden de morfologische kenmerken van de 3 deelsystemen kort behandeld op basis van de recente kennis opgedaan in het KPP onderzoek.

#### 3.1 De Hollandse kust

Vanuit het beheer is er langs de Hollandse kust als gevolg van het suppletiebeleid eigenlijk geen probleem. Sinds 1990 kunnen we de kustlijn in stand houden door middel van regelmatig terugkerende suppleties op strand en vooroever. Dit beleid zorgt ervoor dat de kust zelfs uitbouwt (zie Figuur 3.1). Als innovatief experiment is hier de Zandmotor uitgevoerd, met mede als doel om te kijken of deze systeemsuppletie op lange termijn het reguliere onderhoud kan verminderen (optimaliseren). De aanverwante onderzoeken dragen hierin bij tot kennisontwikkeling van de processen die spelen bij gesloten kusten en tot verbetering van het modelinstrumentarium. Dit onderzoek moet wel goed aansluiten bij het plan voor de gesloten kust binnen Kustgenese2 (o.a. het bepalen van de grenzen van het kustfundament (zie ook Bijlage C2.3).

*Figuur 3.1 De sedimentbalans van de Nederlandse kust over de periode 1990-2005. De blauwe tinten geven erosie aan, geel en oranje sedimentatie. Groen betekent dat de volumeverandering kleiner is dan 1 miljoen kubieke meter. Opvallend is dat de smalle strook langs de gehele kust, die de volumeverandering van brandingszone, strand en zeereep weergeeft, vrijwel overal in volume toeneemt. Dit is een gevolg van de uitgevoerde suppleties. (Bron: van der Spek & Lodder, 2014.)*



### 3.2 De Voordelta

De Voordelta bestaat uit een aaneengesloten ondiepte gevormd door de vier aan elkaar grenzende mondingsgebieden van de Westerschelde, Oosterschelde, Grevelingen en het Haringvliet (zie Elias et al, 2016 voor details). Alleen bij de Westerschelde en Oosterschelde is er nog een verbinding van de monding met het achterliggende estuarium door grote getijgeulen. Het afdammen (geheel of gedeeltelijk) heeft ervoor gezorgd dat er grote morfologische veranderingen zijn opgetreden over de laatste decaden. Recente inzichten in de sedimentbalans laat wel zien dat de netto verandering in volume zeer klein is met een 0.1 tot 0.2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar toename van de Haringvliet en Grevelingen, en een afname van volume rond de 1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar voor de Oosterschelde en Westerschelde buitendelta's.

Analyse van de aanwezige vaklodingen geeft een goed inzicht in de achterliggende processen (zie Elias et al. 2016). Ondanks dat de veranderingen zijn veroorzaakt door menselijk ingrijpen, kunnen de geobserveerde ontwikkelingen (op de mega- en macro-schaal) wel worden verklaard met algemene kennis van kustprocessen. Buitendelta's zijn ondiepe bankengebieden, zeewaarts van de zeegaten, die ontstaan doordat de met sediment beladen ebstroom na het verlaten van het zeegat snelheid en daarmee transportcapaciteit verliest, waardoor (een deel van) het zand afgezet wordt. Hierdoor ontstaan zeewaarts van de kustlijn relatief ondiepe gebieden. Invallende golven breken op deze ondieptes en transporteren een deel van het zand weer richting kust. De onderlinge verhouding, de balans, tussen de zandtransporten door ebstroming en golven bepaalt de omvang en vorm van de buitendelta. Door afsluiting van de Grevelingen en Haringvliet estuaria is hier de zeewaartse toevoer van sediment gestopt en blijft alleen de landwaartse (golf-gedreven) component aanwezig. Hierdoor worden de buitendelta's landwaarts opgeruimd. De sedimentbalans laat daarbij zien dat de volumes eigenlijk redelijk behouden worden. Dit opruimen van de restanten van de buitendelta gebeurt zeer langzaam. Zowel bij de Grevelingen als Haringvliet zijn eerst grote zandbanken gevormd (de Hinderplaat en Bollen van de Ooster), die naderhand steeds meer richting de kust worden gedrukt. Deze ontwikkelingen zetten zich ook in de nabije toekomst nog wel door.

Met behulp van de Vaklodingen kunnen ook de ontwikkelingen van individuele (of gekoppelde) plaat- en geulsystemen worden gevolgd. Door extrapolatie is het nog wel mogelijk een voorspelling naar de nabije toekomst te doen, en kunnen hypothesen worden opgesteld over de maatgevende processen zie o.a. voor de Westerscheldemonding (Elias en Van der Spek, 2015), het Krabbegat (Vermaas et al. 2015), Bollen van de Ooster (Elias, 2015). Een beperking van de data is dat we, misschien met uitzondering van de Westerscheldemonding, echt kijken naar morfologische veranderingen ten gevolge van de afsluitingen. Naarmate deze effecten uitdempen, wordt het lastiger een voorspelling te maken. De huidige ontwikkelingen zijn dan niet representatief. Proces-gebaseerde modellering is dan een goed (of misschien het enige) hulpmiddel om gefundeerde uitspraken te doen.

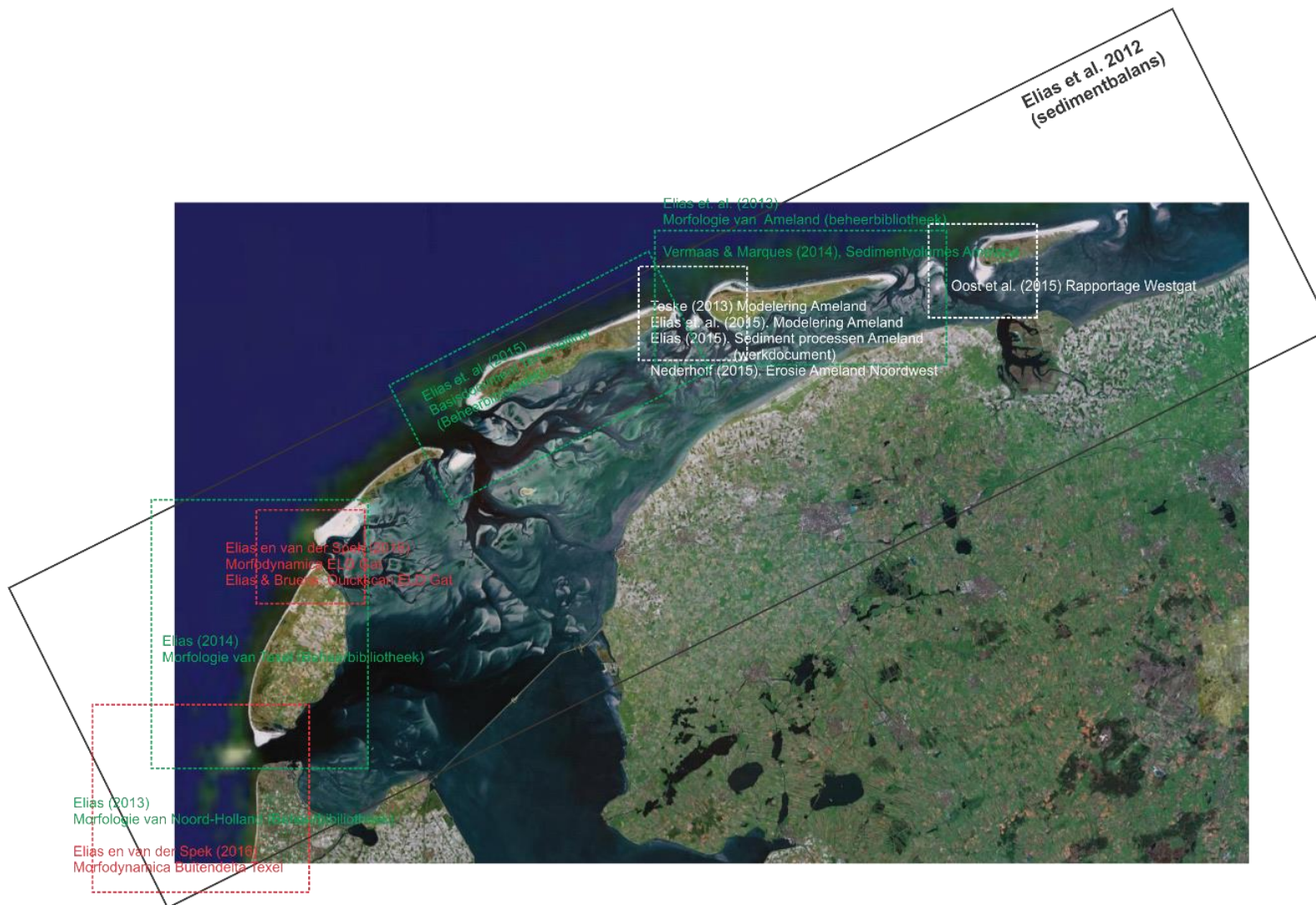
Het onderzoek binnen B&O Kust richt zich op de (voormalige) mondingsgebieden van de estuaria en niet op de estuaria zelf. De motivering hierachter is dat zowel de Westerschelde als Oosterschelde eigenlijk unieke systemen vormen. De veranderingen, achterliggende processen en mechanismen in deze systemen zijn lokaal belangrijk, maar minder (of niet) representatief voor de rest van het kuststelsel. De Oosterscheldestormvloedkering vormt bijvoorbeeld een duidelijke scheiding tussen het kuststelsel en het estuarium waarvan de

aanname is dat er geen sedimentuitwisseling meer plaatsvindt. De plaatproblematiek binnen de Oosterschelde, de herverdeling van zand naar de geul, vormt een onderdeel van daarop toegespitst onderzoek. Het Westerschelde-estuarium wordt vooral gedomineerd door de vele baggerwerken en ingrepen zoals verdieping. Dit wordt uitvoerig onderzocht binnen verschillende programma's.

### 3.3 De Waddenzee

Figuur 3.2 geeft een overzicht van de verschillende onderzoeken die op de verschillende schaal cascade tijdschalen zijn uitgevoerd in de Waddenzee. De grootschalige veranderingen van de gehele Waddenzee (Mega Schaal) zijn samengevat door Elias et al. (2012). In deze studie wordt geconstateerd dat er grootschalige volumeveranderingen zijn opgetreden. Grote hoeveelheden sediment zijn vanaf de kust, eilanden en met name de buitendelta's de Waddenzee in verplaatst (orde 400-500 miljoen m<sup>3</sup> zand in de periode 1926-2005). Deze sedimentuitwisseling tussen kust en achterliggend bekken gebeurt door natuurlijke processen (vooral getij en golven), maar wordt versterkt door menselijke ingrepen. In een natuurlijk zeegatsysteem vindt een herverdeling van sediment plaats waarbij een evenwicht ontstaat tussen stroming en volumes van geulen en platen in buitendelta's, bekken en zeegat. Dit is een dynamisch evenwicht, waarin bijvoorbeeld door zeespiegelstijging extra zand wordt geïmporteerd ter compensatie.





Figuur 3.2 Overzicht van de uitgevoerde onderzoeken op verschillende tijd- en ruimteschalen binnen de Waddenzee sinds 2012.



Elias et al. (2012) concludeert dat de ontwikkelingen van de Waddenzee gedomineerd worden door de vele menselijke aanpassingen in het systeem. Deze ingrepen zijn bijvoorbeeld de aanleg van de Zuiderzee en Lauwerszee waardoor o.a. de komberging is en de hydrodynamische processen zijn veranderd. Daarnaast zijn de begrenzings van het systeem vastgelegd. Het bekken is omzoomd door dijken. De eilandkusten worden juist weer in stand gehouden door suppleties (de eilanden liggen vast). Het besef dat het natuurlijk systeem binnen deze vast grenzen ook in de toekomst moet blijft werken is cruciaal voor het onderhoud van de kusten.

Over de laatste decennia (sinds 1986) hebben we gedetailleerde bodemmetingen waardoor we kennis genereren om de ontwikkelingen te begrijpen. De morfologische ontwikkeling van de Waddenkust(en die van het noordelijke deel van Noord Holland) wordt op dit moment gedomineerd door een zandverlies richting het bekken en een vorm en volumeverandering van de buitendelta. Hierdoor zijn de volumes van de buitendelta's afgenomen. Op zich is het afnemen van het buitendelta volume niet problematisch. Het is namelijk mogelijk dat de buitendelta's juist teveel zand bevatten t.o.v. de veranderde randvoorwaarde van het bekken. Wat nu precies het volume van de buitendelta's moet zijn is niet bekend en is eigenlijk vanuit de empirische relaties niet te bepalen. Wat we wel duidelijk kunnen zien uit de meetdata, is dat de volumeafname van de buitendelta's tijdelijk voor grote sedimentpulsen richting de eilanden heeft gezorgd. De aanlanding van het Bornrif is hier een mooi voorbeeld van, maar ook op de andere eilanden is dit zichtbaar. Met afnemend buitendeltavolume is het de verwachting dat bypassing en voeding vanaf de buitendelta naar de eilanden verandert. Met de keuze de eilandkusten voor een groot deel op zijn plaats te houden kan dit betekenen dat er in de toekomst meer gesuppleerd zal moeten worden. Het is de vraag of dit met reguliere suppleties alleen op de eilanden kan worden bereikt.

De afnemende buitendelta hebben een aantal mogelijk negatieve effecten. Zo kan een kleinere buitendelta ertoe leiden dat er lokaal meer golfaanval optreedt, waardoor er erosie optreedt. Ook kunnen de geul-plaatpatronen wijzigen waardoor scheepvaart wordt gehinderd of beperkt. Een verkleinde, andere vorm van de buitendelta, heeft ook effect op de sedimentuitwisseling langs de eilandkusten. In principe vormt de buitendelta een doorgeefluik van (1) sediment van de bovenstroomse naar de benedenstroomse kust (voor de Nederlandse Wadden situatie is dit van west naar oost) en (2) de sedimentuitwisseling tussen kust en bekken. De zanduitwisseling van kust naar buitendelta vindt plaats als continue proces via golf-gedreven transporten aan de buitenzijde van de buitendelta en getij-gedreven transporten door de geulen. Via de geulen op de buitendelta en in het zeegat wordt het sediment verspreid naar de buitendelta en het bekken in. Afhankelijk van de zandvraag van het bekken blijft hier sediment achter. Dit sediment is o.a. benodigd voor het meegroeien van de platen met zeespiegelstijging. Sediment wordt met de eb-stroming terug op de buitendelta gebracht. Via deze circulatie zal er al een uitwisseling van sediment zijn met het benedenstroomse eiland. Een gedeelte van het zand accumuleert op de buitendelta en vormt hier kleine zandbanken. Deze zandbanken migreren over het front van de buitendelta en landen periodiek aan op de aanliggende kust (dit wordt ook wel bar-bypassing genoemd). Het Bornrif bij Ameland is een voorbeeld van de aanlanding van zo'n plaatoppervlak op het benedenstroomse eiland. Na aanlanding wordt het zand vervolgens verplaatst langs het eiland. Eigenlijk is de aanlanding een natuurlijke zandmotor; een suppletie met een volume van vele tientallen miljoenen die na aanlanding de kust nog jaren zand voedt.

Het periodiek aanlanden van geulen en platen wordt vaak beschreven aan de hand van cyclische ontwikkelingen. De basis voor deze cyclische modellen bestaat meestal uit een

bepaalde set aan meetdata, waardoor de kennis van de achterliggende processen en mechanismen beperkt is en vooral gebaseerd is op Expert Judgement. Terugkijkend hoeft dit geen probleem te zijn, de ontwikkeling is immers te zien in de data, maar dit geeft wel een hoge mate van onzekerheid naar de toekomst. Een mooi voorbeeld hiervan is de ontwikkeling van de Boschplaat. Op basis van metingen is hier door verschillende onderzoekers geconcludeerd dat er een herhaalde cyclische ontwikkeling optreedt. Toch zijn voorspellingen naar de toekomst aan de hand hiervan onzeker. Het is zaak dat we met de proces-gebaseerde modellen ontwikkelingen op dit soort tijd- en ruimteschalen beter kunnen begrijpen, volgen en voorspellen.

### 3.4 Samenvattende opsomming

Samenvattend is de stand van zaken met betrekking tot de systeemkennis van zeegaten als volgt:

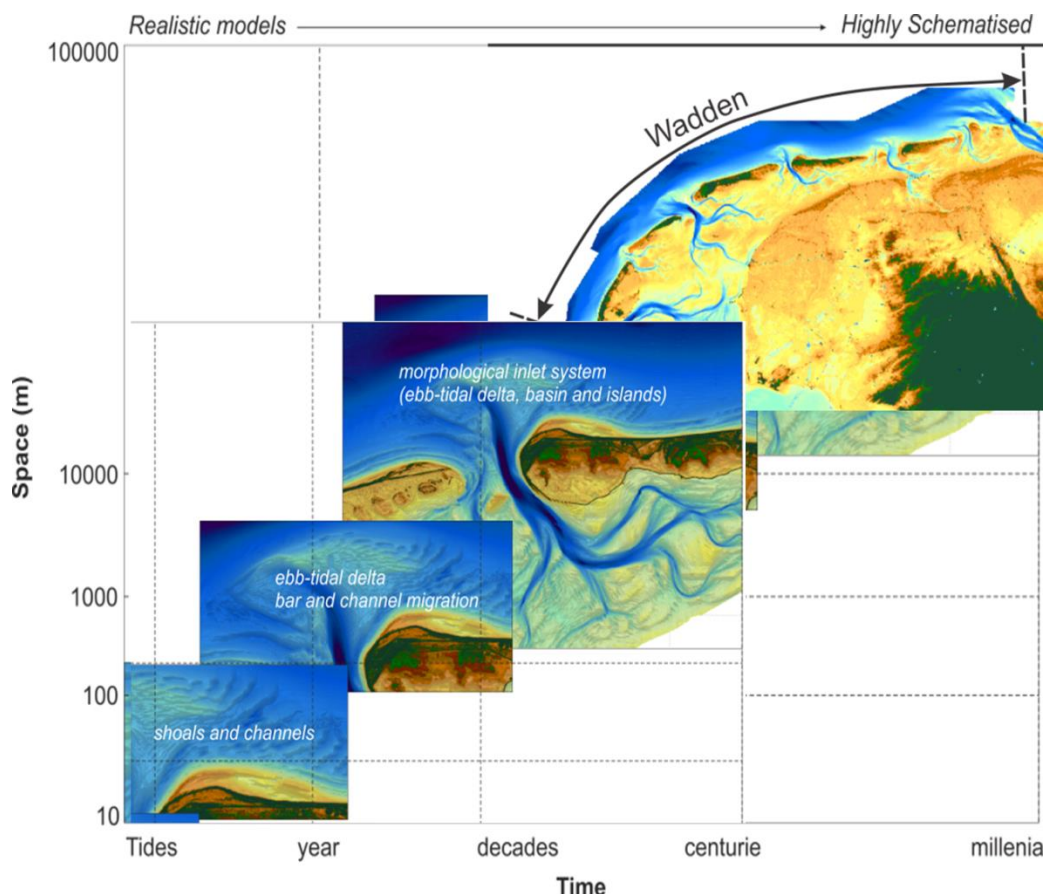
- De Hollandse Kust. De gestrekte Hollandse kust tussen Hoek van Holland en Callantsoog wordt sinds 1990 succesvol in stand gehouden met zandsuppleties. Het volume van de ondiepe kustzone is zelfs toegenomen. De pilot Zandmotor en het aanverwante onderzoek zal hier veel aanvullende kennis genereren van de processen, maar ook of het beheer middels dit soort suppleties beter kan. Kustgenese2 richt zich juist op de diepe onderwateroever, de zeewaartse begrenzing van het kustfundament.
- De Voordelta. Het afdammen van estuaria heeft voor grote morfologische veranderingen van de Voordelta gezorgd. Sediment is vooral landwaarts verplaat. De netto veranderingen in volume zeer beperkt, met een toename van 0.1 tot 0.2 miljoen m<sup>3</sup> per jaar van de Haringvliet en Grevelingen en een afname van ca. 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar voor de Oosterschelde en Westerschelde buitendelta's (Elias et al., 2016). Naarmate de effecten van de afsluitingen uitdempen, worden de voorspellingen van het morfologische gedrag lastiger aangezien de geobserveerde ontwikkelingen dan niet representatief zijn. Proces-gebaseerde modellen kunnen dan een hulpmiddel zijn om gefundeerde uitspraken te doen.
- De Waddenkust. De grootschalige veranderingen van de Waddenzee zijn samengavat door Elias et al, (2012). Hierin wordt geconcludeerd dat de grootschalige volumeveranderingen worden gedomineerd door de menselijke aanpassingen in het systeem waaronder de aanleg van de Zuiderzee, Lauwerszee, het vastleggen van de begrenzing van het systeem door dijken en het in stand houden van de eilandkusten. De volumeafname van de buitendelta's heeft gezorgd voor sedimentpuls richting de eilandkusten, het is echter de verwachting dat deze voeding afneemt met een verdere afname van het volume van de buitendelta's. Dit kan betekenen dat andere delen van het systeem meer sediment moeten leveren (zoals de eilandkusten) of dat de sediment import het bekken in afneemt. Erosie van de eilanden zal weer gecompenseerd moeten worden met suppleties. Met proces-gebaseerde modellen kan inzicht worden verkregen in de morfologische veranderingen op tijd en ruimteschalen van suppleties, en kan worden onderzocht hoe het suppletiebeleid er in de toekomst uit moet zien om de eilanden, zeegaten en estuaria te behouden.



## 4 Stand van zaken: modellering van zeegaten

### 4.1 Inleiding: modellering op verschillende tijd- en ruimteschalen

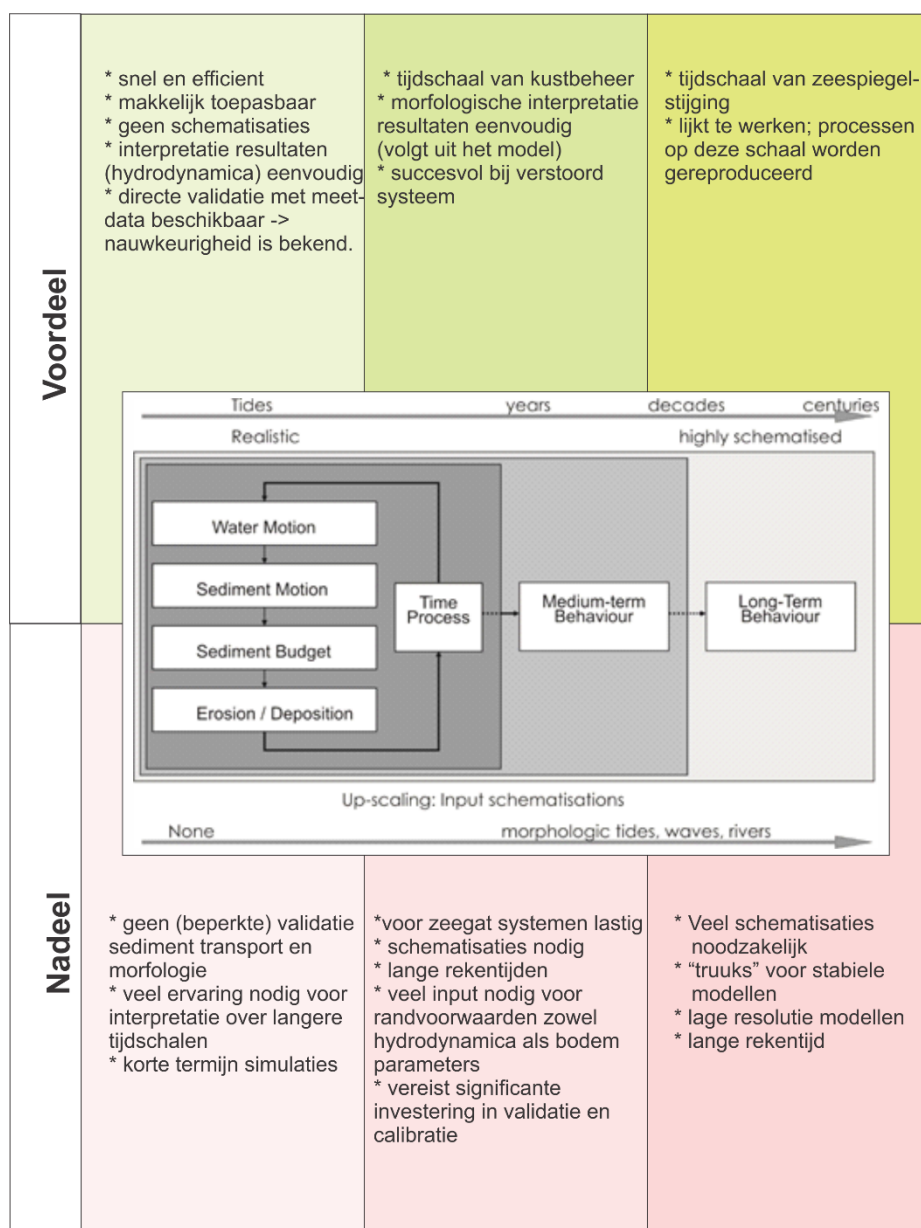
Om op de schaal van de gehele Waddenzee uitspraken te doen zijn eigenlijk empirische of semi-empirische modellen vereist. Echter, de data laat zien dat de in het verleden opgetreden verandering waarschijnlijk weinig representatief zal zijn voor de toekomst (zie Hoofdstuk 3). Proces-gebaseerde modellen, gebaseerd op de onderliggende fysica, hebben dit nadeel niet. Verschillende studies laten zien dat dit soort modellen zeker ingezet kunnen worden in deze complexe systemen en dat ze ons fundamenteel begrip kunnen vergroten (bijvoorbeeld e.g. Elias 2006; Lesser 2009; Van der Wegen 2009; Dastgheib 2012; Elias en Hansen 2012). Met behulp van de resultaten van proces-gebaseerde modellen kunnen de onzekerheden in empirische modellen verder worden verkleind, zodat voorspelling op de schaal van de gehele Waddenzee en op de tijdschaal van eeuwen (zeespiegelstijging) kunnen worden gemaakt.



Figuur 4.1 Voorbeeld van een "schaal cascade" voor het zeegat van Ameland.

Het is belangrijk zich te realiseren dat proces-gebaseerde modellen niet zomaar aangezet kunnen worden om de morfologische veranderingen over de (middel-)lange-termijn door te rekenen. De modellen gebruiken de laatste inzichten in de onderliggende processen. Sommige van deze processen worden nauwkeurig opgelost (hydrodynamica), in andere zitten nog vele aannamen en onzekerheden (sediment transport en morfologie). De eerder genoemde studies (Elias 2006; Lesser 2009; Van der Wegen 2009; Dastgheib 2012; Elias en Hansen 2012) zijn succesvol gebleken, omdat de onderzoekers het model op een specifieke

vraag, met een zorgvuldig uitgestippelde onderzoeksstrategie, met de juiste aannames en schematisaties hebben toegepast. In deze onderzoeksstrategie speelt aggregatie een duidelijke rol. Zoals De Vriend (1991) al aan gaf speelt er in kustgedrag een grote variëteit van tijd- en ruimteschalen. Van morfologische respons door bijv. turbulentie op de schaal van seconden, tot stormen op een tijdschaal van dagen en lange termijn kustgedrag door zeespiegelstijging op een tijdschaal van eeuwen. Niet elk proces is op elke tijdschaal belangrijk. Afhankelijk van de schaal van interesse zijn processen soms dominant, slechts ruis, of een randvoorwaarde. De “schaal cascade” (zie Figuur 4.1 voor een voorbeeld aan de hand van de Waddenzee) is geïntroduceerd om enigszins orde te scheppen in de complexiteit van morfologische systemen en vormt daardoor een belangrijk hulpmiddel, dat we ook in ons onderzoek toepassen.



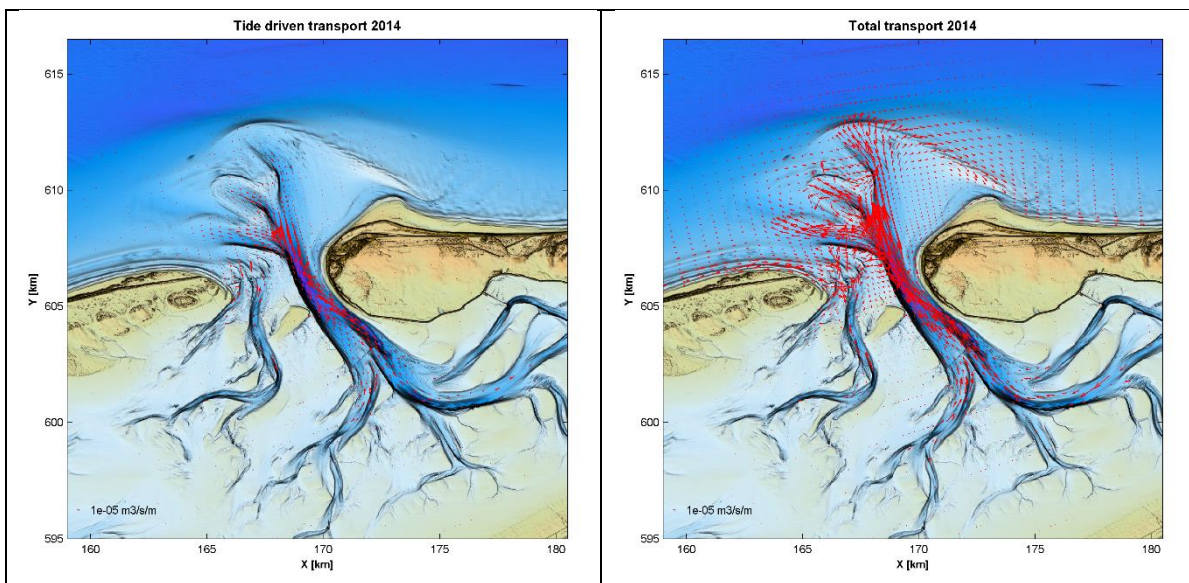
Figuur 4.2 Voorbeeld van een “schaal cascade” zoals gebruikt in proces-gebaseerd modelleren met de voor- en nadelen van de verschillende methoden.

Met behulp van modellen zoals Delft3D kunnen simulaties gedraaid worden op de verschillende tijd- en ruimteschalen waarin morfologisch gedrag optreedt (Figuur 4.2). In essentie gebruiken al deze modellen gelijke formuleringen voor de waterbeweging, sediment transport, bodemschematisatie en bodemverandering alleen worden er afhankelijk van de tijdschaal veel (lange-termijn gedrag) of weinig (korte termijn) schematisaties gebruikt. De proces-gebaseerde (Delft3D) modellen doen het vooral goed op de uiteinden van de schaal cascade. Zowel op de korte-termijn ('Realistic' of 'quasi-realtime' modellen, zie Elias 2006; Elias en Hansen 2012) en op de lange termijn (zie Hibma 2004, Van der Wegen 2009; Dastgheib 2012) lijken nuttige resultaten te worden verkregen. Op de middellange termijn zijn de uitkomsten van deze modellen nog discutabel. Lesser (2009) laat, na zeer uitvoerige kalibratie en validatie, door de overeenkomsten tussen gemodelleerd en gemeten morfologisch gedrag van Willapa Bay (WA) zien, dat de modellen ook de dominante processen op de middellange termijn kunnen reproduceren. Ook de studies van Luijendijk (2015) en Van Ormondt (2016) geven veelbelovende resultaten. De middellange termijn modellering van het Zeegat van Ameland (De Fockert 2008, Teske, 2013) was daarentegen minder succesvol. In de volgende paragrafen worden de 3 tijdschalen van modeltoepassingen verder uitgewerkt met als doel inzicht te verkrijgen in de sterke en zwakke punten van de huidige generatie modellen.

## 4.2 Lessons learned

### 4.2.1 Korte termijn (quasi-realtime) modellering

Studies zoals Elias (2006, 2012, 2015) laten zien dat proces-gebaseerde modellen (zoals Delft3D) door middel van korte-termijnsimulaties veel inzicht kunnen verschaffen in de werking van complexe systemen en de achterliggende processen. "Quasi-realtime" modellering gebruikt waar mogelijk gemeten tijdseries van waterstanden, golven, bodemsamenstelling met als doel het model zo realistisch mogelijk te forceren en valideren. Deze modellen worden beperkt in de tijd gerekend (dagen tot weken), maar wel met zeer hoge resolutie in de ruimte. De model resultaten geven een volledig dekkend beeld van de opgetreden processen, over het gehele domein. Dit opschalen van de velddata, en de mogelijkheid tot het aan en uitzetten van processen zoals wind en golven, kan veel inzicht verschaffen in de dominante mechanismen en forceringen. Deze methode geeft niet direct antwoorden op middellange termijn morfologisch gedrag, zoals bijvoorbeeld de effecten van suppleren, maar genereert wel de benodigde kennis van de onderliggende processen, welke essentieel is voor het maken van de aannames benodigd voor morfologische simulaties op de middellange termijn.



Figuur 4.3 Getijgemiddeld sedimenttransport voor het Zeegat van Ameland (2014 bodem) representatief voor alleen (morfologische) getijforcering (links) en voor getij inclusief een morfologische golfklimaat (rechts).

Uit de studies van Elias (2006), Elias en Gelfenbaum (2012), Elias en Hansen (2014) blijkt dat quasi-realttime Delft3D berekeningen, uitgevoerd met vrijwel default instellingen en met voldoende nauwkeurige randvoorwaarden, in staat zijn de meetdata te reproduceren. Essentieel hierbij is een voldoende nauwkeurige bodemschematisatie, in Nederland vrijwel altijd aanwezig door de hoge-resolutie Vaklodingen. In combinatie met goede getijrandvoorwaarden mag men er vanuit gaan dat de modelresultaten een acceptabele representatie van de hydrodynamica geven. Daarom is quasi-realttime modellering een waardevolle (en rekentechnisch efficiënte) methode om de kennis te vergroten, ook in gebieden waar meetdata ontbreekt voor een volledige afregeling van het model, of in kleinere projecten waar dit niet binnen de scope en budget valt.

Quasi real-time modelsimulaties met als doel de processen op de buitendelta's of in de zeegaten beter te begrijpen zijn tot nu toe slechts beperkt uitgevoerd. Alleen in het zeegat van Texel heeft een uitgebreide analyse plaatsgevonden (Elias, 2006). Er moet hierbij wel opgemerkt worden dat eigenlijk alleen de zeegaten van Texel en Ameland een voldoende dekking van (hydrodynamische) meetdata voor de benodigde validatie en kalibratie hebben. Voor quasi-realttime modellering van de andere zeegaten zijn aanvullende metingen nodig.

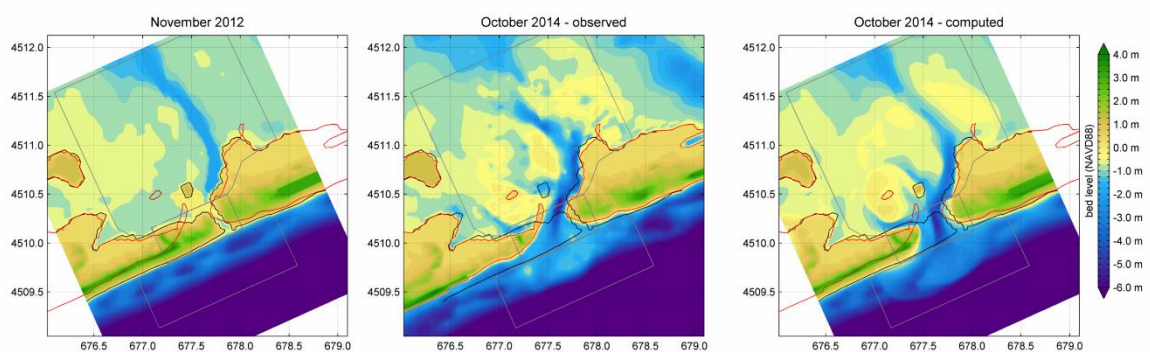
Een nadeel van de quasi-realttime aanpak is de beperkte validatie mogelijkheid van de sedimenttransporten. Directe metingen van de transporten, met voldoende dekking op de schaal van een zeegat, of metingen van korte-termijn morfologische veranderingen zijn niet beschikbaar. Ook is het verkrijgen van deze data geen triviale taak. Transportmetingen zijn meestal onnauwkeurig, terwijl op korte termijn de gemeten bodemveranderingen vaak in de een gelijke orde van grootte liggen als de meetnauwkeurigheid en de modelfouten.

#### 4.2.2 Mesoschaal modellering

Voor middellange termijn modellering is het rekentechnisch eigenlijk niet meer mogelijk om te werken met gemeten tijdseries voor de forcering van de modellen. 'Brute-force' (realistisch) doorrekenen van voldoende gedetailleerde modellen gebeurt typisch op een tijdschaal van stormen tot enkele springtij – doortij cycli. Simulaties op een tijdschaal van jaren (1-25 jaar)

zijn eigenlijk alleen mogelijk door gebruik te maken van geschematiseerde randvoorwaarden en relatief lage-resolutie rekgids. Schematisatietechnieken worden vaak gebruikt om een morfologisch getij- en golfklimaat af te leiden (zie Lesser 2009 voor details). Voor het getij wordt hierin een enkel morfologisch getij afgeleid dat de respons (in transport of bodemverandering) weergeeft van de gehele springtij – doottij cyclus (zie Latteux, 1995 voor de basis). Het morfologisch representatieve wind- en golfklimaat bestaat meestal uit orde 5 tot 10 condities representatief voor de lange-termijn datareeksen. Lesser (2009) demonstreert aan de hand van de modellering van Willapa Bay (WA, USA) dat middellange termijn modellen in staat zijn de belangrijkste processen te reproduceren. De patronen van sedimentatie-erosie zijn vergelijkbaar, maar er zijn wel verschillen in de exacte ligging en de grootte van deze veranderingen. Lesser laat zien goed dat doordachte schematisaties vrijwel identieke resultaten aan 'brute force' simulaties geven en concludeert dan ook dat deze verschillen niet aan de schematisatietechnieken liggen, maar waarschijnlijk aan de initiële condities (met name die van de bodemligging en -samenstelling) of missende processen. Een cruciaal element in de studie van Lesser zijn de 'brute force' simulaties. Deze worden vaak niet gemaakt omdat ze tijdsintensief zijn, maar lijken wel noodzakelijk om fouten en onzekerheden in de schematisaties te vermijden. 'Brute-force' vergen meer rekentijd (orde van weken), maar zijn niet complexer om op te zetten dan andere simulaties en daardoor in de praktijk prima realiseerbaar.

Ook in recente modellering van de Zandmotor (Luijendijk, 2015) worden de gemeten morfologische veranderingen, direct na aanleg, goed gereproduceerd. De morfologische veranderingen direct na aanleg worden in deze studie 'brute force' doorgerekend. Zowel hydrodynamica als de morfologische veranderingen worden hierbij gereproduceerd. Uit deze studie blijkt dat de sediment transport formule (Van Rijn 2007), de specificatie van de 'dry cell erosion factor' (beïnvloedt de erosie van de kustlijn), en het nauwkeurig oplossen van de golf- energieverdeling langs de kust essentieel zijn om goede resultaten te verkrijgen. Luijendijk laat tevens zien dat deze 'brute-force' simulaties op een tijdschaal van 1 jaar nog mogelijk zijn.



Figuur 4.4 Gemeten en berekende bodems voor de Wilderness Breach (Fire Island, NY) over de periode November 2012 – Oktober 2014 (Van Ormondt, 2016).

Het onderzoek van Ormondt (2016) richt zich op het reproduceren van de vorming en instandhouding van een doorbraak door een eiland (Wilderness Breach, Fire Island, NY). Door gebruik te maken van een hybride model (gekoppeld Delft3D – Xbeach model) kunnen de morfologische veranderingen worden gereproduceerd (zie Figuur 4.4). De hybride aanpak is hier essentieel omdat het Delft3D model de erosie van het eiland onder storm condities niet kan voorspellen. Het XBeach model doet het hier een stuk beter, maar blijkt de ontwikkelingen onder kalme condities niet juist te reproduceren. Deze studie laat zien dat

door gebruik te maken van meerdere, gekoppelde modelsystemen essentiële processen kunnen worden toegevoegd en er nauwkeurigere voorspellingen te maken zijn.

Recentelijk zijn diverse middellange termijn modelleringsstudies voor het zeegat van Ameland uitgevoerd (de Fockert, 2008; Jiao, 2014 en Teske, 2013). De studies van de Fockert en Jiao richten zich op tijdschalen van 5 tot 10 jaar, terwijl Teske (2013) met een identiek model simulaties over een tijdschaal tot 100 jaar heeft gemaakt. De simulaties van de Fockert (2008) en Jiao (2014) lijken beperkt in staat de opgetreden sedimentatie-erosie te reproduceren. Over het algemeen geeft het model een verdieping van de geulen waardoor er een onrealistische sedimentatie op de buitendelta optreedt. De daarbij geobserveerde patronen zijn slechts beperkt vergelijkbaar met de werkelijkheid. De studie van Teske (2013), samengevat in Elias et al. (2015), geeft ons wel inzicht in de redenen van deze afwijking: in alle modelsimulaties (zonder ruwheidsvoorspeller en zonder gegradeerd sediment) vindt er vooral initieel een sterke aanpassing van de bodem plaats. De beginbodem in het model lijkt uit evenwicht met de toegepaste forcering. Deze aanpassing is dominant in de geulen, deze worden over het algemeen dieper. Dit sediment wordt op de buitendelta afgezet, waardoor ook deze een onrealistische verandering vertoont. In korte termijn simulaties domineert het 'inspelen' van de bodem de ontwikkeling (de Fockert en Jiao). In de lange-termijn simulaties van Teske zien we dat initieel (de eerste decennia) de bodem redelijk behouden blijft. Kleine veranderingen blijven wel zichtbaar en op de lange termijn gaat het model wel afwijken van werkelijk opgetreden veranderingen. Dit komt door de feedback van de morfologie met de waterbeweging. Ook kleine veranderingen beïnvloeden de waterbeweging en dat resulteert dan weer in daaraan gekoppelde bodemveranderingen. Er is hier geen onderscheid meer te maken tussen fysisch realistische aanpassingen of het numerieke inspelen van het model. Teske (2013) laat wel zien dat door toevoeging van meer fysische processen (zoals de bodemruwheidsvoorspeller) en de nieuwste sedimenttransportformules de resultaten en verbeteren en de geulen zich realistischer ontwikkelen en minder diep worden. Door het toepassen van gegradeerd sediment (meerdere fracties) kunnen de resultaten verder verbeteren.

Een belangrijke les die uit bovenstaand geleerd kan worden is dat de modellen goed in staat zijn veranderingen te reproduceren voor systemen die ver uit evenwicht zijn (Luijendijk, van Ormondt), maar systemen, die gedomineerd worden door subtiele processen zoals het evenwicht in buitendelta's, kunnen nog niet voldoende accuraat worden gereproduceerd (de Fockert, Jiao). De voorspellingen kunnen wel worden verbeterd door gebruik te maken van de nieuwste formuleringen (Luijendijk, Teske) of het toevoegen van essentiële processen door hydride modellering (van Ormondt). Ook is meetdata (stroming, golven en eventueel concentraties en transporten) essentieel, want dit stelt ons in staat de modellen en schematisaties te toetsen (Lesser, 2009). Schematisaties genereren niet per definitie fouten, maar de schematisaties moeten wel door 'brute force' simulaties worden getoetst. Dit vergt een significante, maar haalbare inspanning (Lesser, 2009).

#### 4.2.3 Macro- tot Megaschaal modellering

Met behulp van zorgvuldig bepaalde schematisaties, zijn simulaties op de tijdschaal van decaden of eeuwen mogelijk (Hibma 2004, Dastgheib, 2012; Dissanayaka 2012). Van der Wegen (2009) berekent zelfs de morfologische veranderingen in estuaria over een tijdschaal van millennia. Hibma en Van der Wegen laten zien dat er vanuit een vlakke bodem en met een geometrie van de Westerschelde, er representatieve plaat-geul patronen gevormd worden. Ook komen de modelresultaten overeen met empirisch verkregen evenwichtsvergelijkingen tussen het getijprisma en doorsnede-oppervlakte. Hierbij word ook

opgemerkt dat een evenwichtsbodem nooit bereikt word. In het geval van de Westerschelde duurt het millennia voordat een “bijna-evenwicht” word bereikt.

Dastgheib (2012) concludeert op basis voor simulaties voor de Westelijke Waddenzee dat de model resultaten over een tijdschaal van 2500 jaar een representatieve bodem van de Westelijke Waddenzee produceren. Gemodelleerde model parameters zoals het oppervlakte, volume en hoogte van het intergetijdegebied volgen bekende empirische, evenwichtsrelaties. Deze studie toont ook de potentie van proces-gebaseerde modellen aan om de impact van grootschalig menselijk ingrijpen in getijbekkens kwalitatief in te schatten. Het model is bijvoorbeeld in staat om het veranderde getijtransport en de resulterende morfodynamische ontwikkelingen te reproduceren als gevolg van extreem ingrijpen zoals het afsluiten van de Zuiderzee. De sedimentsamenstelling van de bodem is geïdentificeerd als belangrijke parameter voor de morfologische ontwikkeling. Het gebruik van een vooraf bepaalde sedimentverdeling, in evenwicht met de model hydrodynamica, verbeterd de modelresultaten en reduceert de noodzaak van het gebruik van onrealistische waarden voor coëfficiënten zoals hellingseffecten. Simulaties op kortere tijdschalen (20 – 60 jaar) geven een verschillende uitkomst. Resultaten op basis van een vereenvoudigde modelbodem, gerekend over een tijdschaal van 20 jaar, laten zien dat bestaande conceptuele modellen van buitendeltagedrag numeriek kunnen worden gereproduceerd: getij-gedomineerde systemen geven, afhankelijk van het getijprisma, een sterk zeewaarts uitgebouwde buitendelta, golf-gedomineerde systemen worden juist richting de kust gedrukt en cyclische plaat-geul interacties kunnen voorkomen. Hoewel deze resultaten moeilijk te vergelijken zijn met de werkelijkheid, geven ze wel aan dat de basisprocessen en fysica wel degelijk in de modelformuleringen zit. Soortgelijke simulaties maar nu op een realistische bodem, met geschematiseerde randvoorwaarden, geven wel stabiele zeegatsystemen, maar de gemodelleerde bodems komen strikt genomen (volgens zogenaamde ‘skill scores’) maar weinig overeen met de werkelijkheid. Op de schaal van het gehele systeem, kijkende naar de volumes of geaggregeerde parameters zijn de resultaten goed, maar het detailniveau van individuele geulen en platen kan slechts beperkt worden gereproduceerd. Deze resultaten zijn vergelijkbaar met die van De Fockert en Jiao.

#### 4.2.4 Discussie en conclusies

Vanuit deze recente studies kunnen we een goede inschatting maken van de sterke en zwakke punten van het proces-gebaseerd modelleren. Een interessante constatering is dat de modelresultaten op juist de twee eindpunten van de schaal cascade het meest succesvol zijn ingezet. Op basis van de korte termijn modellering concluderen we dat de modellen goed in staat zijn hydrodynamische processen in detail te beschrijven, alleen kunnen deze modellen lastig gevalideerd worden op sediment transport en morfologische verandering, hiervoor is meetdata niet beschikbaar. Op de lange termijn, lijken de geaggregeerde parameters van de zeegat systemen (zoals plaatoppervlak, plaatgeul verhoudingen) en conceptuele modellen van buitendelta gedrag (morfologische response tussen getij versus golf dominantie) goed te worden voorspeld. Een conclusie die hier getrokken kan worden is dat zowel bij de korte-termijn en de lange-termijn, de gridschematisatie (resolutie) voldoende is om de dominante processen te reproduceren. Op korte termijn gebruiken we immers rekengrids met hoge resolutie en een direct vergelijk met meetdata laat zien dat de dominante hydrodynamische processen in detail kunnen worden gereproduceerd. Op de lange-termijn worden grids met lage resolutie gebruikt. Deze rekengrids lossen niet alle processen in detail op, maar zijn blijkbaar wel in staat de transportprocessen maatgevend voor grootschalige processen (zoals residueel transport) te reproduceren. De voorspelkracht van middellange termijn modellen is voor zeegatsystemen beperkt. Het is goed mogelijk dat gridresolutie hier al een belangrijke rol speelt. Ook om middellange-termijn gedrag op te

lossen moeten we vanuit rekentechnisch oogpunt, grids met lage resolutie gebruiken. Het is goed mogelijk dat de detailprocessen benodigd om kleinschalige fenomenen te reproduceren (individuele banken en geulen) dan gewoon niet goed kunnen worden gemodelleerd.

Een duidelijk probleem in de huidige modellering is de initiële morfologische respons, waarbij het model tracht een numeriek evenwicht te bereiken op basis van de gegeven input dat niet gelijk is aan de opgelegde bodem. Dit is vooral een probleem in situaties waarin de gemeten bodem rond een dynamisch evenwicht beweegt. De veranderingen door het numerieke inspelen van de bodem zijn dan in dezelfde orde van grootte als de geobserveerde veranderingen. In gevallen waarin de geobserveerde bodem sterk verstoord is (zoals de Zandmotor) speelt dit probleem veel minder. Hier is een dominant (fysisch) proces aanwezig dat de morfologie domineert in zowel meting als modelresultaat. Een bijkomend probleem in de zeegaten is dat het inspelen van het model zich het sterk manifesteert in de geulen en er vervolgens een niet lineaire respons optreedt waardoor het gehele systeem zich gaat aanpassen door geul-plaat interacties. Het numerieke inspelen gaat over in een morfologisch realistische respons, waardoor het model zich nog verder van de beginbodem ontwikkelt. Dit maakt het lastig om de respons van kleinschalige elementen (individuele platen en geulen) te modelleren of onderscheiden in de modelresultaten. Dit numeriek inspelen van de bodem kan zeker samenhangen met de vaak grove invoer van de initiële bodemsamenstelling. Uit het werk van Dastgheib (2013) komt naar voren dat de initiële bodemsamenstelling een belangrijke invoerparameter vormt. Meetgegevens met voldoende informatie van de ruimtelijke verdeling van bodemsamenstelling zijn echter maar beperkt beschikbaar.

Zowel Lesser (2009) als Dastgheib (2013) concluderen dat schematisaties van de getij en golven niet per definitie leiden tot grote afwijkingen in vergelijking met een 'brute force simulatie'. Het afleiden van de representatieve condities moet echter wel zeer zorgvuldig gebeuren dus op basis van brute-force simulaties welke goed afgeregeld zijn met meetdata. Het gebruik van meer fysica (de meest recente sedimenttransportformuleringen) heeft een grote invloed op de resultaten. Door gebruik te maken van de Van Rijn 2007 in plaats van de 1993 transportformulering kan de geulerosie al sterk worden beperkt. Dit heeft waarschijnlijk gedeeltelijk te maken met de numerieke implementatie van deze formulering in Delft3D aangezien de formuleringen zonder ruwheidsvoorspeller niet significant anders zijn. Door gebruik te maken van de ruwheidsvoorspeller wordt geulerosie verder beperkt. Ook analyses van de stromingen en waterstanden binnen het SBW onderzoek geven aan dat de ruwheidsvoorspeller essentieel is voor nauwkeurige voorspellingen van het ruimtelijke stroomveld. Tot op heden is de validatie en kalibratie van de ruwheidsvoorspeller slechts beperkt uitgevoerd. Een punt van aandacht vormt de geldigheid van de aannames voor de berekende bodemvormen. Deze zijn slechts beperkt getoetst voor getijsystemen.

Een belangrijke conclusie is ook dat in vrijwel alle uitgevoerde simulaties de kalibratie-coëfficiënten voor de sedimenttransporten significant lager zijn dan de originele waarde van 1. Voor de golf-gerelateerde suspensie en bodemtransporten suspensie transporten worden waarden tot 0.2 gebruikt, waarin een motivatie kan zijn dat 2Dh simulaties de dwarstransporten door het ontbreken van de retourstroming richting niet goed representeren. (zeewaarts transport is daardoor te laag zodat ook het kustwaarts transport moet worden terug geschaald om tot realistische netto dwarstransporten te komen). Ook de stromings-gerelateerde suspensie- en bodemtransporten worden vaak teruggeschaald (calibratiefactoren van 0.4-0.5 zijn geen uitzondering). Het dient zeker de aanbeveling verder te onderzoeken of de transporten overschat worden. Is dit een gevolg van de transportformulering? Worden misschien de suspensietransporten door de Van Rijn sedimenttransport formulering in hoog energieke omgevingen overschat? Of worden de



transporten wel goed berekend, maar is het juist de uitwisseling met de bodem (morfologische verandering) die overschat wordt.

Aanvullende aandachtspunten voor verbeteringen zijn dwarstransport processen. In de meeste studies vertoont het kustprofiel een onrealistische vervorming. Gedeeltelijk kan dit te maken hebben met het gebruik van 2Dh simulaties welke niet voldoende fysica bevatten om de dwarstransporten nauwkeurig op te lossen. Gedeeltelijk heeft dit te maken met de overgang tussen nat en droog waarin er slechts een eenvoudige koppeling plaatsvindt (het overzetten van de transporten in de eerste natte cel naar de eerste droge cel). Een meer realistische 'droog' of intergetijde strand uitwisseling (inclusief wind gedreven transport) lijkt essentieel. Het werk van Van Ormondt laat zien dat door gebruik te maken van XBeach (lange golf processen) er een aanzienlijk verbetering van de voorspelling van de eilanderosie kan worden bereikt.

#### 4.3 Verbeterpunten binnen de huidige modelkennis en formuleringen

Op basis van de bovenstaande studies en de gesprekken met modelexperts bij Deltares komen 5 duidelijke gebieden naar voren waarin modelontwikkeling noodzakelijk en mogelijk zijn. Deze 5 categorieën zijn:

- Verbetering van de hydrodynamica en sediment transporten in de brandingzone;
- Uitwisseling sediment tussen nat en droog (inclusief morfologie droge strand);
- Estuarine processen;
- Geulstabiliteit (sedimentsortering, hellingseffecten en avalanching);
- Numerieke aspecten.

Verbetering van de hydrodynamica en sediment transporten in de branding.

De ontwikkeling van het natte kustprofiel is binnen het huidige Delft3D model nog een probleem. Zo wordt bankgedrag niet goed gemodelleerd (banken worden platgeslagen). Het volledig (netjes) oplossen van de processen die spelen in de surfzone vereist een significante verbetering in de formuleringen. Hierbij moet gedacht worden aan:

- het aangrijpen van golfkrachten;
- golf-geïnduceerde turbulentie;
- verticale verdeling van golfgedreven langstroming en de retourstroming;
- massaflux;
- lange golven;
- effecten van golf asymmetrie en skweness op onshore transport.

Uitwisseling tussen nat en droog.

Stranderosie wordt binnen Delft3D eigenlijk niet opgelost. Met behulp van een 'dry cell erosion' factor kan wel een gedeelte van het berekende transport in de eerste natte cel naar de droge cel worden overgeheveld. Deze implementatie is echter ontoereikend voor het gedetailleerd modelleren van de strand en duinerosie. Het is onwaarschijnlijk dat aanlanding en verheven van buitendeltabanken met de kustlijn op deze manier goed kunnen worden gereproduceerd.

Estuarine processen

Met estuarine processen vatten we hier even alle verbeterpunten samen die van belang zijn voor het bekken. De belangrijkste hierin zijn:

- plaat-geul interacties;
- zand-slib interacties;
- Effecten van vegetatie en ecologie

Geulstabiliteit (sedimentsortering, hellingseffecen en avalanching).

Geul erosie wordt binnen Delft3D over het algemeen overschat. Door het opschroeven van de hellingseffecten wordt dit voorkomen. Modelverbeteringen die hier noodzakelijk zijn:

- verbeterde implementatie van hellingseffecten;
- toevoeging van mechanismen zoals avalanching en slumping;
- het juist meenemen van sedimentsortering en hiding en exposure effecten.

#### Numerieke Aspecten

Naast verbeteringen in de fysische formuleringen is ook een optimalisatie van de numerieke schema's binnen Delft3D van belang. Verbeterde numerieke schema's zouden een aanzienlijke versnelling van de simulaties kunnen opleveren. Initieel zouden de volgende aspecten moeten worden verbeterd.

- algoritmes voor sedimenttransport en morfologie ;
- toepassen van hardware specifieke (ge-optimaliseerde) instellingen bij het compileren zou een aanmerkelijke tijdwinst moeten kunnen opleveren;
- verbeteren van de golfkoppeling en het gebruik van binaire hotstart files zou enige tijdwinst moeten opleveren.

NB aanschaf van nieuwe rekenservers lijkt vooralsnog geen oplossing aangezien de nieuwste generatie processoren vooral gericht is op parallellisatie en niet zozeer veel hogere kloksnelheden hebben. Overklokken van processoren zou een verbetering van rektijden moeten betekenen, maar gaat ten koste van de betrouwbaarheid en het energiegebruik van de processoren. Op langere termijn is het verbeteren van de schaalbaarheid/parallellisatie van Delft3D en DFLOW-FM in FLOW-WAVE-SED/MOR berekeningen essentieel, alleen dan kunnen we de huidige en toekomstige generatie hardware optimaal benutten. Met de komst van het nieuwe Delft3D FM model zijn al aanzienlijke verbeteringen in parallellisatie behaalt. Het doel wat we hier stellen is de rektijd van de huidige modellen met een factor 2 tot 4 te versnellen.

Naast optimalisatie van rektijd is er ook een controle\optimalisatie van het toegepaste numerieke schema voor de berekening van bodemverandering wenselijk. Worden de resultaten beïnvloedt (uitdempen van bodemvormen) door het toegepaste numerieke schema? Het schema voor bodemverandering is vrij diffuus. Dit heeft als voordeel dat instabiliteiten uitdempen, maar als nadeel dat kleinschalige interacties (zoals bijv. benodigd voor de vorming van zandgolven) maar moeilijk gemodelleerd kunnen worden. Een toetsing op de nauwkeurigheid van het numerieke schema is gewenst.

#### 4.4 Samenvattende opsomming

Samenvattend is de stand van zaken met betrekking tot de proces-gebaseerde morfologische modellering van zeegaten als volgt:

- Proces-gebaseerde morfologische modellen presteren redelijk op korte (dagen tot maanden) en zeer lange tijdschalen (eeuwen), maar minder op de middellange termijn (jaren).
- Korte termijn simulaties (dagen tot maanden) met een hoge resolutie en nauwkeurige randvoorwaarden zijn in staat meetdata te reproduceren en kunnen inzicht verschaffen in de werking van complexe systemen en achterliggende processen
- Zorgvuldige lange-termijn (eeuwen) simulaties reproduceren empirische relaties en conceptuele modellen voor zeegaten. De sedimentsamenstelling van de bodem blijkt

belangrijk voor de morfologische ontwikkeling op deze tijdschaal. Grootschalige volumes en geaggregeerde parameters kunnen worden gereproduceerd, details op kleinere schaal zoals het individuele gedrag van geulen en platen niet

- Bij middellange termijn modellering (jaren) moet, om de rekentijd te beperken, gebruik worden gemaakt van schematisatie van randvoorwaarden. Goed doordachte schematisatietechnieken kunnen goede resultaten geven, mits getoetst aan 'brute-force' simulaties. Middellange termijn simulaties worden gedomineerd door een snelle initiële aanpassingen van de bodem, vooral in de geulen. Het gebruik van recente transportformuleringen, ruwheidsvoorspellers en gegradeerd sediment verbetert de morfologische voorspelling. Morfologische voorspellingen zijn goed mogelijk voor systemen die ver uit evenwicht zijn, voor de modellering van systemen die gedomineerd worden door subtiele processen is verdere verbetering van de modelformuleringen (inclusief validatie aan nieuwe metingen) en eventueel een hybride (gekoppelde) modelaanpak nodig.
- Vanuit de experts zijn er duidelijke aanwijzingen waar nog verbeteringen in de modelformuleringen nodig en mogelijk zijn. Deze verbeteringen zijn onder te verdelen in verbetering van: (1) de hydrodynamica en sediment transporten in de brandingszone, (2) de uitwisseling van sediment tussen nat en droog, (3) estuarine processen, en (4) geulstabiliteit en bodemsamenstelling. Daarnaast is het mogelijk de rekentijd te verkleinen en de nauwkeurigheid te vergroten door verbeteringen in het numerieke schema te realiseren.



## 5 Aanpak verbetering modelinstrumentarium in relatie tot Kustgenese2

### 5.1 Inleiding

Op basis van de recente modelstudies (H4) en de Expert Judgement van Deltares modelleers (Bijlage D) kan een goed inzicht verkregen worden in de huidige status van Delft3D. Ook zijn er concrete verbeterpunten geïdentificeerd. In dit hoofdstuk wordt verder uitgewerkt hoe dit binnen Kustgenese2 zou kunnen worden aangepakt. Dit hoofdstuk bevat de ideeën van vele experts. Het is onmogelijk om alle wensen en verbeteringen binnen de beschikbare tijd op te lossen.

Als uitgangspunt is hier geredeneerd vanuit het zandige kuststelsel. De focus ligt op:

- (1) de modellering van de buitendelta's en de uitwisseling met het zeegat.
- (2) de schaal van suppletie's; de modellen moeten op de tijd en ruimteschaal van suppleties in staat zijn de morfologische veranderingen te reproduceren.
- (3) het bekken is een belangrijke randvoorwaarde, maar hoeft niet per definitie volledig in detail te worden opgelost.

Voor de laatste aanname is een mogelijk punt van discussie. Willen we binnen Kustgenese2 het gedrag van het bekken volledig oplossen? Zo ja, dan vereist dit namelijk rekengrids met hoge resolutie in zowel de bekkens als de kustzone. Op dit moment wordt er op de universiteiten al veel onderzoek verricht naar bijv. plaat-geul interacties. Het gedrag van het bekken zou met behulp van deze kennis geaggregeerd kunnen worden opgelegd. Sedimentvraag kan worden afgeleid uit de data of met behulp van modellen als Asmita. Daarnaast kunnen geïdealiseerde modelconcepten worden gebruikt om herverdeling van sediment over het bekken te bepalen.

Onder bovenstaande aannames wordt in dit hoofdstuk wordt een eerste inventarisatie gegeven van de mogelijke modelverbeteringen die kunnen worden doorgevoerd binnen de huidige generatie modellen, zodat we binnen Kustgenese2 een aantoonbare verbetering in voorspelkracht bereiken. Dit hoofdstuk is onverdeeld in 4 onderdelen: (1) modelaanpak, (2) modelontwikkeling, (3) modelvalidatie en (4) modeltoepassing.

De invulling zoals hier gepresenteerd is vormt een startpunt voor de discussie richting een volledig plan van aanpak voor de modelverbetering en modellering binnen Kustgenese2.

### 5.2 Modelaanpak en –toepassing: 3-stappenplan

Een individuele suppletie heeft lokaal een grote invloed, maar zal op het totale gedrag van een zeegat nauwelijks effect uit oefenen. Pas over lange termijn, als deze suppletie's frequent herhaald worden zal dit ook op de grote schaal merkbaar worden. Dit is een belangrijk uitgangspunt achter het 3-stappen plan voor modelverbetering binnen Kustgenese2 (zie Figuur 5.1).



Figuur 5.1 Overzicht van de voorgestelde modelaanpak binnen Kustgenese2

Als eerste stap stellen we korte-termijn simulaties voor, gericht op model- en kennisontwikkeling. Geïdentificeerde tekortkomingen in de huidige modelformuleringen kunnen hier al gedeeltelijk worden opgelost (zie paragraaf 5.3) en het is de verwachting dat hierdoor al een significante verbetering in de betrouwbaarheid van de morfologische modellering op een middellange tijdschaal (5-jaar) kan plaatsvinden (Stap 2). Om de overstap van Stap 1 naar Stap 2 te maken zal het nodig zijn processen (beperkt) te schematiseren en geparametriseerd op te leggen. Hiervoor moeten we de processen wel goed begrijpen. Een doel van de realistische simulaties is dan ook de proceskennis van kleinschalige dynamiek binnen zeegaten te vergroten. Bijvoorbeeld in Ameland, is het waarschijnlijk dat de eilandstaarten (zoals Boschplaat) gevormd worden door een subtiel evenwicht tussen getijstroming door het zeegat en de langstransporten. Het zand accumuleert in (kleine) banken, de groei en verplaatsing van deze banken beïnvloedt subtiel de getijstroming in het zeegat, en die beïnvloedt dan weer de gehele morfologische ontwikkeling. Met groei van de banken kan dan periodiek het gehele systeem veranderen waardoor de Boschplaat weer aangroeit naar de oorspronkelijke grootte. De modellen kunnen dit soort subtiele interacties nog niet reproduceren. Dit komt niet alleen door een gebrek aan modelkennis, maar ook beginnen we eigenlijk net de achterliggende processen te doorgronden. Door realistische simulaties (gecombineerd/gevalideerd met veldmetingen) kunnen we een grote stap maken in de kennisontwikkeling om dit soort processen te begrijpen en vragen te beantwoorden zoals:

- Hoe ziet de hydrodynamica op een buitendelta er nu in detail uit?
- Welk gedeelte van de buitendelta is getij- versus golfgedomineerd?
- Wat zijn de bijbehorende sedimenttransporten en kleinschalige dynamiek van individuele platen en geulen?
- Hoe belangrijk zijn golven voor sedimentuitwisseling met het bekken?

Dit soort kennis, beantwoording van deze vragen, is essentieel als we proberen de modellen op te schalen van Stap 1 naar Stap 2 en 3.

Zowel in Stap 1 als Stap 2 kan nog de aanname gemaakt worden dat de buitendelta in een dynamisch evenwicht verkeerd met een vrijwel stabiel volume van de grootschalige elementen en vaste ligging van het dominante platen en geulenstelsel. We richten ons hier op de veranderingen van kleinschalige elementen zoals individuele platen en geulen (kleinschalig in deze context is bijvoorbeeld de vervorming en migratie van een Bornrif, of de aanleg en verspreiding van een suppletie). Het opschalen van de modellen naar langere

tijdschalen (Stap 3) vereist misschien niet direct een verdere verbetering van de modelformuleringen, maar vooral een verbetering van modelschematisaties en -concepten. Op de tijdschaal van 5 tot 25 jaar is de werking van het gehele zeegat van belang. De systeemkennis verkregen binnen Stap 1 en Stap 2 is hierbij cruciaal. Alleen met voldoende kennis van de processen binnen zeegatsystemen kunnen deze nauwkeurig worden opgelegd.

In theorie zouden we ook in omgedraaide volgorde kunnen werken. Dus vanuit de succesvolle lange-termijn modellen terug te werken, door nauwkeuriger en in meer detail te rekenen. Een groot probleem van deze 'downscaling' aanpak is dat het lastig is onderscheid te maken tussen fouten door missende of niet voldoende nauwkeurig geïmplementeerde processen en fouten gemaakt in de langetermijn schematisaties. Bij langetermijn schematisaties ligt de focus op het correct representeren van de netto transporten. Het is mogelijk dat op kleinere schaal (de banken, suppleties) juist de bruto transporten maatgevend zijn voor het in gang zetten van een bepaald gedrag. Door te werken vanuit de korte termijn naar de langere termijn nemen we dit in ieder geval mee. Het bijkomende voordeel van deze methode is dat hiaten in kennis hier door aanvullende metingen kunnen worden opgelost

### 5.3 Modelverbeteringen

In Hoofdstuk 4 zijn diverse verbeterpunten gegeven m.b.t. de modelformuleringen. Het zal onmogelijk zijn alle knelpunten op te lossen. Kustgenese2 biedt echter wel een goede kans om een significante verbetering door te voeren. In deze paragraaf worden de verbeterpunten herhaald, is er aangegeven waarom dit relevant is voor Kunstgenese2 en hoe we dit denken aan te pakken.

#### 5.3.1 Hydrodynamica en sedimenttransporten in de branding

De ontwikkeling van het natte kustprofiel is binnen het huidige Delft3D model nog een probleem. Zo wordt bankgedrag niet goed gemodelleerd (banken worden platgeslagen). Een behoud van het kustprofiel is echter wel essentieel binnen de zeegatmodellering. Ten eerste, vormt de buitendelta een balans tussen de golf- en getijgedreven langstransporten vanaf de aanliggende kust en de (voornamelijk) getijgedreven transporten door het zeegat. Een onrealistische vervorming van de eilandkusten zorgt ervoor dat de langstransporten worden verstoord. Dit maakt het onwaarschijnlijk dat de buitendelta op grote schaal ook in evenwicht blijft. Ten tweede, de brandingsprocessen spelen ook op de individuele banken van de buitendelta. Voor een goed gedrag en morfologische ontwikkeling van deze banken is het essentieel de brandingsprocessen in voldoende detail op te lossen.

Modellen zoals Unibest TC of CROSMOR presteren op dit punt al beter. Het lijkt daarom een logische keuze om als eerste stap te beginnen met het actualiseren van de Delft3D formuleringen zodat deze een vergelijkbare oplossing tonen. Een zelfde verbetering kan worden behaald m.b.t. lange golven aangezien deze in bijvoorbeeld XBeach al netjes berekend worden.

Een belangrijk punt zijn hier ook 3D processen. Om de processen in de brandingszone goed te modelleren zijn 3D simulaties benodigd. Het is echter onwaarschijnlijk dat volledige 3D simulaties van een zeegat over de middellange termijn rekentechnisch haalbaar zijn. Een essentieel deel van dit onderzoek zal dan waarschijnlijk ook zijn om de processen zodanig te parametriseren/implementatie zodat ook in 2DH simulaties een stabiel kustprofiel ontstaat.

### 5.3.2 Uitwisseling nat en droog

Het droge strand vormt eigenlijk een integraal onderdeel van het kustprofiel. Verbeteringen in het natte gedeelte van dit profiel zijn in voorgaande paragraaf beschreven. Op dit moment zijn er wel al mogelijkheden om de strand erosie in meer detail mee te nemen dan alleen de 'dry-cell erosion' factor. Zo is er een mogelijkheid om het gehele strandprofiel mee te bewegen in plaats van alleen de eerste natte cel. Ook kan onrealistische erosie (vorming van te steile profielen) worden verminderd door een maximale helling op te geven. Door een koppeling met modellen zoals XBeach kan duinerosie in detail worden meegenomen. Een gedetailleerd onderzoek naar de effectiviteit van deze oplossingen voor de zeegaten is nog niet uitgevoerd. Het is mogelijk dat dit, eventueel met kleine aanpassingen, al de benodigde verbetering oplevert.

Op een wat langere termijn kan er gedacht worden aan de implementatie van processen zoals swash processen en lange golven, maar ook wind-gedreven transporten op het droge strand. Lange golven en de effecten op duinerosie worden met modellen zoals XBeach al goed opgelost. Processen zoals turbulentie door golven in de swash zone en uitsmeren van zand door runup worden namelijk al redelijk succesvol gemodelleerd met UNIBEST-TC en CROSMOR. Ook windgedreven transporten spelen hier zeker een rol. Windgedreven transporten worden uitvoerig bestudeerd in het kader van de Zandmotor.

Het is wel de vraag of Kustgenese2 bij uitstek geschikt is om de processen van droge strand erosie te verbeteren. Het merendeel van de zeegaten en de maatgevende processen bevindt zich toch onder water. Binnen Kustgenese2 is heeft het dan ook de voorkeur het droge strand geparametriseerd op te leggen en vooral aan te haken bij het Zandmotor onderzoek dat zeker een verbetering in de processen gaat brengen.

### 5.3.3 Geulstabiliteit (sedimentsortering, hellingseffecten en avalanching)

Een concrete verbetering in formulering met betrekking tot geulstabiliteit kan op dit moment nog niet worden gegeven. Het gebruik van bijvoorbeeld de ruwheidsvoorspellers en gegradeerd sediment laat zeker al een verbetering van het geulgedrag zien. Wat hier vooral mist zijn geschikte datasets voor modelvalidatie in zeegatsystemen. Gegevens over bijvoorbeeld sedimentsortering zijn met uitzondering van de sedimentatlas niet bekend.

Het voorstel hier is om een gedegen validatiestudie uit te voeren naar de optimale instellingen van de hellingseffecten en de effecten van bijvoorbeeld de bodemsortering en sediment transport formules hierop.

### 5.3.4 Estuarine Processen

Met estuarine processen vatten we hier even alle verbeterpunten samen die van belang zijn voor het bekken. De belangrijkste hierin zijn:

- plaat-geul interacties
- zand-slib interacties
- effecten van vegetatie en ecologie

Een groot voordeel van het voorgestelde 3-stappen plan is dat met name in stap 1 en 2 de estuarine processen niet direct gemodelleerd hoeven te worden. Plaat-geul interacties, effecten van vegetatie en sediment uitwisseling van zand-slib systemen zijn allen van belang voor een juiste weergave van de ontwikkeling in het bekken. In de kustzone is het merendeel van het sediment zand met slechts een geringe rol van het slib. Hier kan misschien initieel worden volstaan met de verbetering van de zandtransporten. In stap 3 zal de invloed van het



bekken wel mee genomen moeten worden, maar dit kan misschien ook door koppeling aan andere modellen (zoals Asmita).

De vraag die hier speelt is of we binnen Kustgenese2 het gedrag van het bekken volledig correct willen (en kunnen) oplossen. Het volledig oplossen van de estuarine processen vereist rekengrids met hoge resolutie in de bekkens. Het is onwaarschijnlijk dat op korte termijn simulaties op een tijdschaal van 5 tot 25 jaar mogelijk zijn met modellen waarin zowel de kustzone als het estuarium in hoge resolutie opgelost worden. Op dit moment worden er op de universiteiten al vele onderzoeken verricht naar plaat-geul interacties. Binnen Kustgenese2 zou de focus kunnen zijn op de kustzone (gedomineerd door zand) en uitwisseling met het zeegat. Het gedrag van het bekken kan dan geaggregeerd worden opgelegd. Sedimentvraag kan worden afgeleid uit de data of met behulp van modellen als Asmita. Daarnaast kunnen geïdealiseerde modelconcepten worden gebruikt om herverdeling van sediment over het bekken te bepalen.

Een belangrijk onderzoekspunt binnen Kustgenese2 zal wel moeten zijn hoe we de processen van het bekken kunnen schematiseren (Stap 3). Het geaggregeerd opleggen van bekkenprocessen heeft als voordelen dat (1) de grootte van de rekenroosters significant afneemt omdat het bekken niet in detail wordt doorgerekend, (2) we ongewenst gedrag voorkomen waarbij, doordat het bekken afwijkt van de werkelijkheid, ook het kuststelsel wordt beïnvloedt.

#### 5.4 Modelvalidatie

Modelvalidatie is een belangrijk aspect binnen Kustgenese2. Modellen worden vaak beperkt afgeregeld, zijn vaak te grof in resolutie en schematisatie. Een belangrijke reden hierin is doorlooptijd van de projecten, maar ook zijn er slechts een beperkt aantal datasets beschikbaar. Binnen Kustgenese2 ligt er een uitgesproken kans om de modelvalidatie grondig aan te pakken. Met de huidige versie van Delft3D kan hierdoor waarschijnlijk al een aanzienlijke verbetering van de resultaten worden behaald. De modelaanpak zoals beschreven in Hoofdstuk 5.2 is hier dan ook op ingericht.

Validatie richt zich in Stap 1 als eerste op een toetsing van de hydrodynamische processen hiervoor zullen geschikte datareeksen in het zeegat benodigd zijn. Als eerste toetsing kunnen de SBW metingen gebruikt worden. Deze zijn vooral geschikt om de golven te valideren. Missende data zal opgenomen moeten worden. In principe zijn dit relatief eenvoudig uit te voeren. Door het plaatsen van een aantal meetframes kunnen simultaan stroomsnelheden, waterstanden en golven worden bepaald. Het direct meten van sediment transport is lastig. Indien niet mogelijk kan dit misschien worden afgeschat door het meten van kleinschalig morfologisch gedrag zoals de migratie van bodemvormen.

Een essentiële meting is ook het verkrijgen van inzicht van de sedimentsortering over de buitendelta. Een dekkende meting van de korreldiameter verdeling over de buitendelta kan relatief eenvoudig verkregen worden door bijvoorbeeld het gebruik van een 'Flying eyeball' camera. Idealerweise zou deze meting een aantal keer herhaald moeten worden om variabiliteit in sedimentsortering en invloed van stormen en seizoenen hierop in kaart te brengen.

Naast de algemene validatie van Delft3D en de uitgevoerde schematisaties, kunnen ook een aantal specifieke processen worden geïdentificeerd. Deze processen zijn:

- de Van Rijn transportformuleringen voor zeegatsystemen.
- de Van Rijn ruwheidsvoorspellers
- Golf – stroom interacties op verschillende schaalniveaus.

Deze 3 punten worden in hieronder verder uitgewerkt.

#### 5.4.1.1 *De Van Rijn transportformuleringen voor zeegatsystemen.*

De Van Rijn formuleringen zijn afgeleid en uitvoerig gevalideerd en gekalibreerd op basis van verschillende datareeksen. Toch moet er goed gekeken worden of de sedimenttransporten in zeegaten wel juist berekend worden. Modelkalibratie op basis van de sedimentatie-erosie patronen laat vrijwel altijd zien dat de transporten lager afgeregeld moeten worden. Het is goed mogelijk dat dit samenhangt met bijvoorbeeld tekortkomingen in de representatie van de bodemsamenstelling of geulprocessen, maar om uit te sluiten dat dit aan de transportformulering zelf ligt zal hier naar moeten worden gekeken. Deze validatie is misschien wel mogelijk met beschikbare datasets voor andere systemen.

Een tweede actiepoint zou zijn het afleiden van optimalisatie parameterinstellingen voor zeegatsystemen. Hiervoor zijn geschikte datasets nodig van significante korte-termijn morfologische veranderingen.

#### 5.4.1.2 *De Van Rijn ruwheidsvoorspellers*

Met behulp van de Van Rijn bodemruwheidsvoorspellers lijken zowel de hydrodynamica als de morfologische veranderingen in zeegatsystemen beter te worden voorspeldt. De ruwheidsvoorspellers zijn echter afgeregeld op uni-directionele stroming (rivieren) en slechts beperkt geschikt gemaakt (door een lag effect) voor getijsystemen waarin de stroming sterk varieert in grootte en richting. Een gedegen validatie en kalibratie (en eventueel verbetering) van de ruwheidsvoorspellers voor zeegaten is wenselijk. Datasets voor zo'n kalibratie zijn slechts beperkt beschikbaar. Ook hier is het de verwachting dat aangetakt kan worden aan parallel onderzoek.

#### 5.4.1.3 *Golf – stroom interacties op verschillende schaalniveaus.*

Golf-stroom interactie wordt meestal geassocieerd met de lokale beïnvloeding van de golven op de stroming (en visa versa). Dit geeft in de verticaal een andere verdeling van de stroming. In een zeegat kunnen deze interacties sterk verschillen over de buitendelta. Validatie van de stroming, met voldoende ruimtelijke dekking is daarom van groot belang. Golf- stroom interactie kan ook wat ruimer worden geïnterpreteerd. Buitendelta's zijn bij uitstek gebieden waar de balans tussen golf- en getijgedomineerde transporten en stroming van belang zijn. Toch zijn metingen van deze stromingen slechts zeer beschikbaar. De constatering dat eigenlijk alle modellen de geulen verdiepen en de buitendelta's juist zeewaarts uitbouwen roept de vraag op of deze stromingen en interacties wel juist gemodelleerd worden. Een validatie van de golf-stroom op de lokale schaal en op de schaal van de buitendelta lijkt hierbij cruciaal en kan inzicht verschaffen of de onderliggende hydrodynamica in deze hoog energieke systemen wel juist gemodelleerd word. Een toegespitste meetcampagne zou deze datasets kunnen verschaffen.

## 5.5 Samenvattende opsomming

### 5.5.1 Modelling

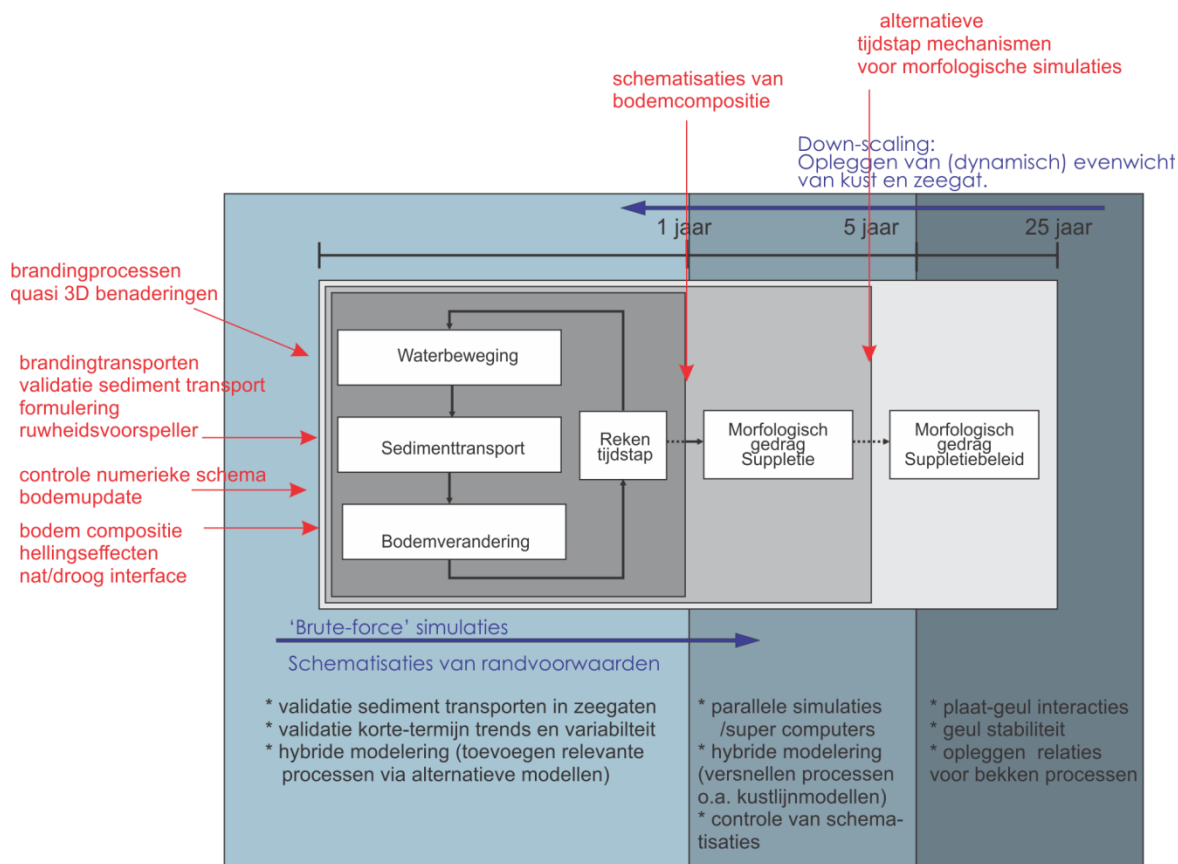
De modellering is er op gericht het gedrag van suppleties binnen een zeegat systeem te kunnen voorspellen. Als uitgangspunt is geredeneerd vanuit het zandige kuststelsel. Het

bekken is hierbij een belangrijke randvoorwaarde. Dit betekent dat niet alle processen binnen het totale systeem volledig in detail berekend moeten worden, waar mogelijk zal bijv. bekken gedrag, of bijvoorbeeld de uitwisseling van sediment met de eilanden geschematiseerd of geparameteriseerd worden opgelegd.

De voorgestelde aanpak bestaat uit 3 stappen van modelontwikkeling. Stap 1 is gericht op korte-termijn simulaties (1 jaar) gericht op het gedetailleerd oplossen van lokale processen zoals bijvoorbeeld de vervorming van een Bornrif, de invloed van stormen op sedimenttransporten. Deze stap maakt het mogelijk modelverbeteringen door te voeren en te toetsen. Daarnaast is deze stap essentieel voor kennisontwikkeling van de processen in zeegaten. Deze kennis is essentieel voor het opschalen naar het voorspellen van morfologische veranderingen op de schaal van een suppletie (Stap 2) of op de schaal van een suppletie-strategie (Stap 3). Binnen Stap 1 en 2 is het niet het doel de processen van het volledige zeegatsysteem op te lossen. Het zeegat vormt een randvoorwaarde. In een stabiel zeegatsysteem proberen we kleinschalige platen en geulen die lokaal een groot effect hebben, maar niet wezenlijk het gedrag van het zeegat veranderen op te lossen. De effecten van een cumulatief aantal van deze veranderingen, bijvoorbeeld het effect van een reeks van suppleties op het totaal gedrag van het zeegat is het doel van Stap 3. Essentieel in deze benadering is dat we het gedrag van het zeegat kunnen opleggen zonder het volledig proces-gebaseerd op te lossen. Dit vereist een nieuwe aanpak in onze modelconcepten zoals bijvoorbeeld een koppeling naar modellen zoals Asmita.

Verbetering van de voorspelkracht van de modellen kan worden bereikt (1) een uitgebreide validatie van Delft3D voor zeegatsystemen, (2) het implementeren of verbeteren van bestaande kennis in Delft3D, en (3) het toevoegen van missende processen. Hierbij wordt vooral gedacht aan verbetering van de brandingtransporten, parametrisatie van processen die we niet voldoende beheersen of op kunnen lossen (2Dh benadering), en uitgebreide validatie van golf-stroominteractie, de Van Rijn transportformuleringen en bodemruwheidsvoorspeller. In eerste instantie is het niet de bedoeling 'nieuwe' processen te implementeren. Waar mogelijk optimaliseren we de formuleringen met kennis uit andere modellen (bijv. uit Unibest en Xbeach). Het is de verwachting dat met het actualiseren en optimaliseren van de processen binnen het bestaande Delft3D model al op korte termijn (3-jaar) een verbetering van de voorspelkracht wordt bereikt. Een verdere verbetering van de voorspelkracht kan worden bereikt door aan te takken bij lopend onderzoek (bijv. Zandmotor). Deze ontwikkelingen zijn meer realistisch op de langere termijn (6 jaar)

Figuur 5.2 vat de modelaanpak en voorgestelde modelverbeteringen samen.



Figuur 5.2 Overzicht modelverbeteringen over de 3 stappen uit de voorgestelde modelaanpak

## 5.5.2 Metingen

In deze rapportage wordt op een aantal plaatsen gerefereerd naar de essentie van metingen. Kustgenese2 biedt de mogelijkheid om geschikte metingen. Dit rapport heeft niet als doel de beoogde meetcampagnes in detail te beschrijven, maar wel kunnen we hiervoor vanuit de modellering aanbevelingen doen.

Met betrekking tot meetcampagnes kunnen de volgende opmerkingen worden geplaatst:

- Nederland heeft unieke meetdata in de vorm van langetermijn morfologie op de grotere tijdschaal (Vaklodingen, Jarkus). Echter recente meetdata met hoge resolutie in zeegaten is, misschien met uitzondering van het Zeegat van Texel, vrijwel niet meer aanwezig of wordt niet gedocumenteerd. Kustgenese2 biedt een unieke kans om dit soort data te verkrijgen.
- Het is niet mogelijk om alle processen, in detail te meten. Hiervoor is de variabiliteit van de zeegaten in tijd en ruimte gewoon te groot. Daarnaast is er een vrijwel oneindige lijst van wensen te definiëren. Niet alle benodigde meetdata hoeft ook daadwerkelijk in Ameland gemeten te worden. Meetdata benodigd voor validatie van processen kan ook verkregen worden door te kijken naar vergelijkbare systemen en aan te takken bij bestaand onderzoek (e.g Zandmotor, USGS, TUDelft).
- Binnen Kustgenese2 is het zaak, juist die metingen uit te voeren die uniek zijn voor het systeem Ameland en essentieel voor de daar uit te voeren model validatie. Een voldoende gevalideerd model kan zelf weer als data- en kennisbron fungeren door realistische simulaties uit te voeren.
- Het zeegat van Ameland heeft als voordeel dat het in kader van SBW al uitvoerig bemeten is. Een inventarisatie van de beschikbare meetdata en toetsing van de

modellen hieraan zal al een eerste grote bijdrage aan de modelontwikkeling en validatie geven.

- Voor de hydrodynamica zijn een aantal basis datasets noodzakelijk. Essentieel zijn datasets van het getijsprisma, waterstanden, golven en stroomsnelheden. Gezien de grote invloed van het getijsprisma op de hydrodynamica en morphodynamica in het zeegat is het essentieel dat dit voldoende gevalideerd kan worden. Er zal minimaal 1 meting het getijsprisma door de keel plaats moeten vinden (13-uursmeting). Idealerweise, is er tijdens deze meting ook een stromingsmeter geplaatst die de stromingen in het centrale deel van de geul over een langere periode (1 maand) registreert. De combinatie van deze 2 dataseries is onmisbaar voor modelvalidatie. Alle aanvullende data (zie bullet hieronder), die liefst coherent gemeten wordt, draagt bij aan de validatie.
- Stromingsinformatie in de hoofd- en bijgeulen op de buitendeltas kan bijdragen tot verdere validatie van het model. Ideaal worden stroming, golven en waterstanden simultaan in de geulen opgenomen over een representatieve periode (2-4 weken).
- Waterstanden en stromingen in het bekken. De wantijden in het bekken worden vaak gezien als scheiding tussen de bekkens. Puur op getij is deze indeling waarschijnlijk wel correct. Tijdens stormen vind er echter zeker transport (water en sediment) over deze wantijden plaats. Metingen van waterstanden (verhang) en stromingen kunnen bijdragen tot betere schematisering van de bekkensranden.
- Datareeksen van sedimenttransport in zeegaten zijn uniek. Echter het is de vraag of deze ook voldoende nauwkeurig kunnen worden opgenomen. Sedimenttransporten kunnen ook worden afgeleid door te kijken naar frequent opgenomen kleinschalige morfologie. Analyse van bijvoorbeeld de migratie van bodemvormen kan inzicht verschaffen in de bodemtransporten. Vertrouwen in de gemodelleerde sedimenttransporten is essentieel als we lange-termijn morfologische simulaties willen maken.

Tabel 5.1 Overzicht mogelijke metingen binnen het Kustgenese2 voorstel gericht op modelverbetering

Metingen	Omschrijving	Essentieel	Opmerkingen
<b>Hydrodynamica</b>			
13-uurs meting keel	Getijsprisma keel zeegat	Ja	Minimaal een 13-uurs meting
Snelheidsmeting keel	ADCP (meetframe)	Ja	2-4 weken in combinatie met 13-uurs meting. Geeft ons aanvullende informatie over de spring-doodtij cyclus.
Snelheidsmeting buitendelta	Meetframes in hoofd-geulen	Nee	Wenselijk voor een juiste afregeling van het model. Ideaal een meetframe met instrumenten voor snelheid, waterstand en golfmetingen
Waterstanden	Meetframes op buiten-delta en bekken	Ja	Waterstandsverhang binnen-buiten, en verhang over het bekken zijn belangrijk voor afregeling model. Transport/flux over de wantijden blijft altijd een vraag.
Golven	Locatie Noordzee Buiten delta Bekken	Ja Nee Nee	Coherente datasets van golven, stroming en waterstand geven de mogelijkheid tot volledige afregeling hydrodynamisch model. Golfkalibratie kan door SBW metingen.
X-band radar	Ameland	Nee	Kan inzicht verschaffen in de ruimtelijke snelheidsvelden
<b>Sediment transport</b>			
bodemvormen	Hoge-resolutie (Swath Multi Beam) bathymetry	Ja	Verplaatsing bodemvormen geeft inzicht in transporten. Als onderdeel van 'Vaklodingen'. Hoofdgeulen meerdere keren opnemen.
	Multibeam in vaste	Nee	Verplaatsing bodemvormen geeft inzicht in

	opstelling in de keel van het zeegat.		transporten. Unieke tijdreeksen. Zeer wenselijk, technische haalbaarheid onbekend.
<b>Morfologie</b>			
Vaklodingen	Jaarlijkse vaklodingen Verdichte Vaklodingen	Ja Ja	Geeft inzicht in seizoen variabiliteit Beperkte locatie, maar in hoge resolutie (tijd en ruimte). Geeft morfologische verandering voor model afregeling.
Detail metingen	Rond banken en geulen met interessant gedrag	Nee	Geeft afregel mogelijkheid morfologie. Afleiden van transporten. Storm respons indien voor/na storm gemeten
Bodemsamenstelling	Bepaling korrelgrootte verdeling over buitendelta	Ja	Korrelverdeling vormt een onbekende parameter (allen beschikbaar uit Sediment atlas). M.b.v. 'Flying EyeBall is zeer snel een hoge-resolutie korrelverdeling op te nemen.
	Variabiliteit korrelverdeling buitendelta op 1 locatie	nee	In combinatie met morfologie, geeft inzicht in verstoring door storm en herstel erna.
<b>Sediment transport</b>	Validatie van de sediment transporten in keel van het zeegat	Ja	De vraag is of dit wel nauwkeurig te meten is of moet dit uit de morfologie worden afgeleid. DISCUSSIE.
<b>Gerichte meetcampagnes</b>	Bijv. lokale processen rond een Bornrif. Golf-stroom interacties Uitwisseling bekken-buitendelta	Nee	Gerichte meetcampagnes in combinatie met onderzoeken Universiteiten. Kustgenese2 biedt misschien een unieke kans dit uit te voeren.

## 6 Conclusies

Dit rapport beschrijft de stand van zaken met betrekking tot de morfologische kennis en modellering van zeegaten op tijdschalen van jaren tot decennia en geeft een overzicht van verbeterpunten in de morfologische modellering. Dit overzicht dient als basis voor een nog op te stellen onderzoeksplan waarmee binnen Kustgenese2 de hiaten in bestaande proceskennis kunnen worden ingevuld en een modelinstrumentarium kan worden ontwikkeld dat de midden-lange-termijn ontwikkeling van zeegaten en buitendelta's en het effect van toekomstige ingrepen hierop kan voorspellen. Dit rapport geeft een verdere verdieping van het onderdeel proces-gebaseerde modellering in de modellenmemo (Tonnon en Elias, 2015), waarin vanuit KPP B&O Kust een aanzet is gegeven voor het lange-termijn ontwikkel pad voor de modellering van zeegatsystemen.

Een belangrijk uitgangspunt voor dit rapport is dat we redeneren vanuit de huidige onderhoudsstrategie van de kust. De zandvolumes van de kust worden op peil gehouden door zandsuppleties. Deze suppleties vinden plaats langs de kust en niet in de bekkens. Wat is er aan modelverbetering nodig om deze strategie beter te kunnen onderbouwen? Nu maar ook in de toekomst. Kunnen we dan met de verbeterde modellen een schatting doen van het benodigde toekomstige beheer? De focus van de proces-gebaseerde modellering ligt dan ook op (1) de modellering van de buitendeltas en de uitwisseling met het zeegat en (2) de tijd- en ruimteschaal van suppleties; de modellen moeten op deze tijd en ruimteschaal in staat zijn de morfologische veranderingen te reproduceren. Het bekken is een belangrijke randvoorwaarde, maar hoeft niet per definitie volledig in detail te worden opgelost.

Als basis van dit document is de kennis gebruikt opgedaan binnen KPP B&O kust en een inventarisatie van de modelknelpunten bij de verschillende experts binnen Deltares. Deze inventarisatie laat zien dat de voorspelkracht voor zeegatsystemen op middellange termijn (5-25 jaar) beperkt is. Op grote schaal lijken de modellen geaggregeerde parameters (zoals geulvolumes) wel te reproduceren, maar kleinschalig plaat- en geulgedrag wordt dan niet gemodelleerd. Het is goed mogelijk dat gridresolutie hier al een belangrijke rol speelt. Ook om middellange-termijn gedrag op te lossen moeten we vanuit rekentechnisch oogpunt, grids met lage resolutie gebruiken. Het is goed mogelijk dat de detailprocessen benodigd om kleinschalige fenomenen te reproduceren (individuele banken en geulen) dan gewoon niet goed kunnen worden gemodelleerd. Recente model ontwikkelingen zoals de toepassing van bijv. gegradeerd sediment of het toepassen van de ruweheidsvoorspellers laten een duidelijke verbetering van de modelresultaten zien, ook zijn er duidelijke aanknopingspunten waar modelverbeteringen nodig zijn, zoals verbeteringen in: (1) de hydrodynamica en sediment transporten in de branding, (2) de uitwisseling van sediment tussen nat en droog, (3) de estuarine processen, en (4) de geulstabiliteit en bodemsamenstelling. Daarnaast is het mogelijk door de rekentijd te verkleinen en nauwkeurigheid te vergroten door verbeteringen in het numerieke schema.

Voor een aantoonbare verbetering van de middellange modelvoorspellingen binnen Kustgenese2 wordt een 3 stappen plan voorgesteld. Stap 1 is gericht op korte-termijn simulaties (1 jaar) gericht op het gedetailleerd oplossen van lokale processen zoals bijvoorbeeld de vervorming van een Bornrif, de invloed van stormen op sedimenttransporten. Deze stap maakt het mogelijk modelverbeteringen door te voeren en te toetsen. Modelverbeteringen richten zich in eerste instantie (jaar 1 tot 3 van Kustgenese2) op het verbeteren/aanvullen van de huidige formuleringen met bestaande kennis beschikbaar vanuit

andere modellen zoals UNIBEST en XBEACH. Het is de verwachting dat met relatief kleine aanpassingen er al een wezenlijke verbetering in de modellen kan worden gemaakt. Deze verbeteringen en de kennis opgedaan in de realistische modellering (en aanverwante metingen) is essentieel voor het opschalen naar het voorspellen van morfologische veranderingen op de schaal van een suppletie (Stap 2) of op de schaal van een suppletie strategie (Stap 3).

Binnen Stap 1 en 2 is het niet het doel de processen van het volledige zeegatsysteem op te lossen. Het zeegat vormt een randvoorwaarde. In een stabiel zeegatsysteem proberen we kleinschalige platen en geulen die lokaal een groot effect hebben, maar niet wezenlijk het gedrag van het zeegat veranderen op te lossen. De effecten van een cumulatief aantal van deze veranderingen, bijvoorbeeld het effect van een reeks van suppleties op het totaal gedrag van het zeegat is het doel van Stap 3. Essentieel in deze benadering is dat we het gedrag van het zeegat kunnen opleggen zonder het volledig proces-gebaseerd op te lossen. Dit vereist een nieuwe aanpak in onze modelconcepten zoals bijvoorbeeld een koppeling naar modellen zoals ASMITA. Het is de verwachting dat stap 1 en 2 in de eerste fase (3-jaar) van Kustgenese2 kunnen worden afgerond. Stap 3 zal in de tweede fase (3 tot 6 jaar) plaatsvinden. In deze tweede fase worden ook de modelverbeteringen aangebracht waarvoor nieuwe kennis of inzichten nodig zijn, of die volgen uit de samenwerking met andere onderzoeksprojecten.

Vanuit de voorgestelde modelontwikkeling is er ook een beknopt overzicht gegeven van de benodigde en gewenste metingen. Essentieel zijn coherente tijdseries van hydrodynamica en kleinschalige morfologie in het zeegat. Alleen door voldoende kalibratie en validatie kan het model wezenlijk worden verbeterd en zijn ze cruciaal om de modelnauwkeurigheid (of onzekerheden) te kwantificeren. Waar mogelijk zal worden aangetakt bij lopende onderzoeken en bestaande datareeksen om onzekerheden in formuleringen te testen, toetsen en verbeteren.



## 7 Literatuur

Bruens, A., 2014. Check op hypothesen KPP-B&OKust (februari 2014). Memo 129381-000-ZKS-0006, 28 februari 2014.

Dastgheib, A. (2012). Long-term process-based morphological modelling of large tidal basins, Ph.D. Thesis, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.

De Fockert, A. (2008). Impact of relative sea level rise on the Ameland inlet Morphology, Master thesis, Delft University, Delft, The Netherlands.

De Vriend, H.J. (1991). Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour. Part 1: Physical processes, Journal of Hydraulic Research, Vol 29-6, 727-740.

Dissanayake, D.M.P.K, 2011. Modelling Morphological Response of Large Tidal Basins to Sea Level Rise. UNESCO-IHE / TU Delft. Ph.D. Thesis, CRC Pres.

Elias, E.P.L., 2006. Morphodynamics of Texel Inlet. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences (Delft): 261 pp.

Elias, E.P.L., 2015. Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Bollen van de Ooster. Deltares rapport 1220040-000-ZKS-0005, Delft.

Elias E.P.L., Gelfenbaum G., Van der Westhuysen A.J., 2012. Validation of a coupled wave-flow model in a high-energy setting: the mouth of the Columbia River. J. Geophys Res., Vol 117, C09011. doi:10.1029/2012JC008105.

Elias, E.P.L. and Hansen, J. (2012). "Understanding processes controlling sediment transports at the mouth of a highly energetic inlet system (San Francisco Bay, CA)," Marine Geology, 345, 207-220.

Elias, E.P.L., Teske, R., Van der Spek, A., Lazar, M., Modeling tidal inlet morphodynamics on medium time scales, Proceedings of Coastal Sediments 2015, San Diego, USA.

Elias, E.P.L., van der Spek A.J.F., Wang Z.B. and de Ronde J., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences (Geologie en Mijnbouw), 91 – 3, 293 – 310.

Elias, E.P.L, van der Spek, A.J.F., Lazar, M. 2016. The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal delta's in the SW Netherlands; Large-scale morphological changes and sediment budget 1965-2013; Impacts of large-scale engineering. Accepted for publication Netherlands Journal of Geosciences)

Hibma, A., 2004. Morphodynamic modeling of channel-shoal systems, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, vol. 04-3, Delft University of Technology, Delft, 122p

Jiao, J., 2014. Morphodynamics of Ameland Inlet. Medium-term Delft3D modelling. MSc thesis Delft University of Technology. 10 September 2014.

Latteux, B., 1995. Techniques for long-term morphological modeling under tidal action. *Marine Geology*, 126, 129-141.

Luiendijk, A.P., Ranasinge R., Huisman, B., de Schiooer, M., Swinkels, C.M., Walstra, D.J.R., Stive, M.J.F., 2015. The initial morphological response of the Sand Engine: A process-based modelling study. *Proceedings of Coastal Sediments 2015*, San Diego, USA.

Lesser, G.R., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional model. *Coastal Engineering* 51: 883–915.

Teske, R., 2013. Tidal inlet channel stability in long term process based modelling. MSc traineeship report, thesis University of Utrecht, July 2013.

Van der Spek, A.J.F. & Lodder, Q., 2015. A new sediment budget for the Netherlands; the effects of 15 years of nourishing (1991-2005). *Proceedings of Coastal Sediments 2015*, San Diego, USA

van der Spek & Lodder, 2014, *Sedimentbalans Nederlandse kust 1990-2005*. KPP Beheer en Onderhoud Kust - Werking Kustfundament en Herverdeling Suppletiezand - Volumes Kustcellen. Rapport 220040-007, Deltares, Delft.

Van der Wegen, M., 2010; *Modeling morphodynamic evolution in alluvial estuaries*. UNESCO-IHE / TU Delft. Ph.D. Thesis, CRC Pres.

Van Ormondt, M., Neson, T., 2016. Morphodynamic modelling of the Wilderness Breach at Fire Island, Poster AGU Ocean Sciences Conference (MG14A-98), New Orleans, USA.

Vermaas, T., Elias, J.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2015. Relocating Krabbegat channel; A tale of two developments. *Proceedings of Coastal Sediments 2015*, San Diego, USA.

## A Overzicht hypothesen KPP B&O Kust

Bij de start van het programma KPP B&O kust, eind 2010, is een aantal hypothesen opgesteld. Doel is om met het bestaande onderzoeksprogramma op den duur de hypothesen vast te stellen dan wel te wijzigen. Begin 2014 is er een check op de hypothesen uitgevoerd (Bruens, 2014)

### A.1 Werken met hypothesen

De aanpak van KPP-B&O kust is een cyclisch proces (zie Figuur): Rijkswaterstaat baseert keuzes over suppleties op bestaande kennis van het kuststelsel (blauwe lijnen). Als er sprake is van kennisleemten worden hiervoor hypothesen gebruikt. Het toetsen van deze hypothesen en beantwoorden van de onderzoeksvragen die daarbij naar voren komen, wordt opgepakt in het project B&O Kust (rode lijnen). Als daar nieuwe inzichten uit naar voren komen, kan dat leiden tot aanpassing van de hypothese en suppletie strategie.



Figuur A.1 Aanpak KPP B&O Kust. Uitvoering (blauwe pijlen): Op basis van bestaande kennis wordt de huidige uitvoering van suppleties door RWS vastgesteld. Als er sprake is van kennisleemten worden hiervoor hypothesen gebruikt. Door onderzoek (rode pijlen) aan kennisleemtes worden de hypothesen getoetst en indien nodig aangepast. Het resultaat is een toename van kennis dat leidt tot aanpassen van hypothesen en/of het aanpassen van de uitvoering

Door het werken met de hypothesen zorgen we voor:

- een focus in het onderzoek
- die relevant is voor beheer & beleid
- en een directe link heeft met de keuzes in beheer & beleid

Deze werkwijze heeft de voorkeur boven het werken met een (oneindig) aantal kennisvragen waarvan de link met beheer & beleid praktijk minder duidelijk is (of voor meerdere interpretaties vatbaar).

## A.2 Hypothesen

### A.2.1 Basislaag – werking kustfundament

- Suppletiezand wordt vanuit brekerzone verdeeld over het gehele kustprofiel.
- Het zand van een strandsuppletie wordt verdeeld over het gehele kustprofiel.
- Over de 20m-contour vindt geen netto transport plaats op een tijdschaal van 50 tot 200 jaar.
- Er stuift geen zand voorbij de gesloten zeereep. De duinen groeien dus niet actief mee ten gevolge van het zeereepbeheer. In 2014 vervangen door:
  - Er stuift geen zand naar de duinmassieven achter de actieve duinzone.
  - De netto zandimport over de Belgische grens en de netto zandexport over de Duitse grens heffen elkaar op.
- Het zand dat wordt afgevoerd uit een suppletievak komt ten goede aan de aangrenzende kust.
- Het kuststelsel is een gesloten, zanddelend systeem. Tekorten in dit gesloten systeem ontstaan door de gevolgen van zeespiegelstijging en morfologische aanpassingen aan ingrepen. In 2014 vervangen door:
  - Het kuststelsel is een gesloten, zanddelend systeem. Tekorten in dit gesloten systeem ontstaan door de gevolgen van relatieve zeespiegelstijging en sedimentonttrekking.
  - Het kustfundament is onderdeel van het kuststelsel. Het kustfundament is geen gesloten zanddelend systeem. Tekorten in het kustfundament ontstaan door a) sedimentverlies aan de bekkens als gevolg van de morfologische aanpassingen aan ingrepen en b) de gevolgen van relatieve zeespiegelstijging.

### A.2.2 Basislaag – sedimentuitwisseling kustfundament en getijbekkens

- Suppletiezand wordt verdeeld over het gehele kuststelsel.
- De Waddenzee onttrekt zand aan het kustfundament. Het onttrokken volume wordt bepaald door oppervlak Waddenzee, relatieve zeespiegelstijging (dus inclusief bodemdaling door mijnbouw) en morfologische aanpassingen afsluitingen. In 2014 vervangen door:
  - De Waddenzee onttrekt sediment aan het kustfundament.
  - Het volume dat op lange termijn wordt onttrokken, wordt bepaald door oppervlak Waddenzee, relatieve zeespiegelstijging (dus inclusief bodemdaling door mijnbouw) en morfologische aanpassingen afsluitingen.
  - De snelheid waarmee sediment aan het kustfundament wordt onttrokken wordt bepaald door de netto transportcapaciteit in de zeegaten.
- De Westerschelde onttrekt zand aan het kustfundament. Het onttrokken volume wordt bepaald door oppervlak Westerschelde, relatieve zeespiegelstijging en morfologische aanpassingen vaarwegverdieping.
- Er is géén significant sedimenttransport door de Oosterscheldekering.
- Suppleren in de kustzone verhoogt de grootte van het netto zandtransport naar de Waddenzee niet.

- De ontwikkeling van eilandkusten wordt gestuurd door ontwikkelingen op de aangrenzende buitendelta's. In 2014 vervangen door:
  - De ontwikkeling van eilandkoppen wordt gestuurd door ontwikkelingen op de aangrenzende buitendelta's.

#### A.2.3 Basislaag – Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust (onderdeel KPP Kustbeleid 2013)

- De actuele relatieve zeespiegelstijging is gelijk aan het gemiddelde over de afgelopen eeuw (1,8 tot 2 mm/jr).

#### A.2.4 Netwerklaag – Toestand van de kust

- Handhaven van het kustfundament en de BKL draagt bij aan veiligheid door zeewaartse verplaatsing van het afslagpunt. In 2014 vervangen door:
  - Handhaven van het kustfundament en de BKL voorkomt een toename van de doorbraakkans van de duinen.
- Als gevolg van de uitgevoerde suppletiestrategie treedt er (op termijn) een positieve trendwijziging op in alle indicatoren in dwarsprofiel.

#### A.2.5 Netwerklaag – Relatie kustlijnzorg & kustveiligheid (KPP-Kustbeleid)

- KLZ zorgt voor een significante afname van het overstromingsrisico in de dijkringen langs de NL kust
- De systematiek van KLZ is niet te verenigen met de systematiek van de toetsing van de (duin)waterkering. In 2014 vervangen door:
  - De systematiek van KLZ kan de systematiek van de toetsing van de (duin)waterkering niet vervangen.
- KLZ kan niet voorkomen dat op termijn (ca. 20-50 jaar) nieuwe 'zwakke schakels' ontstaan en investeringen in het HWBP nodig zijn. In 2014 vervangen door:
  - KLZ kan niet altijd voorkomen dat op termijn (ca. 20-50 jaar) nieuwe 'zwakke schakels' ontstaan en investeringen in het HWBP nodig zijn.
- KLZ zorgt voor een significante afname van het overstromingsrisico in de buitendijkse gebieden langs de Nederlandse kust. In 2014 vervangen door:
  - KLZ zorgt voor een significante afname van het overstromingsrisico in de huidige buitendijkse gebieden langs de Nederlandse kust



## B Overzicht producten KPP B&O Kust, deelproject ‘Zeegaten’

### B.1 Inleiding

Deze bijlage geeft een overzicht van de producten van KPP B&O Kust met betrekking tot zeegaten. Dit overzicht bevat niet alleen de producten van het deelproject Uitwisselinggetijdebekkens en morfodynamiek van eilandkoppen (Zeegaten), maar bevat ook gerelateerde producten uit andere KPP B&O Kust deelprojecten met bijdragen vanuit het deelproject “Zeegaten”. Dit overzicht is gebaseerd op de requirements KPP B&O Kust 2011 tot en met 2015 en het overzicht op <https://publicwiki.deltares.nl/display/KPP/Producten>

### B.2 Producten 2011

#### B.2.1 Producten 2011 deelproject “Zeegaten”

Z.B. Wang and A.P. Oost, 2010. Morphological development of the rif and the Engelsmanplaat, an intertidal flat complex in the frisian inlet, Dutch Wadden Sea, Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China, 2010.

H.J., De Vriend, Wang, Z.B., Ysebaert, T., Herman, P.M.J., Ding O., 2011. Eco-Morphological Problems in the Yangtze Estuary and the Western Scheldt. Society of Wetland Scientists 231: 1033–1042, 2011.

Wang, Z.B., Vroom, J., Van Prooijen, B.C., Labeur, R., Stive, M.J.F., Jansen, M.H.P., 2011. Development of tidal watersheds in the Wadden Sea, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM2011.

Wang, Z.B., Hoekstra, P., Burchard, H., Ridderinkhof, H., De Swarte, H.E., Stive, M.J.F. Stive, 2012. Morphodynamics of the Wadden Sea and its barrier island system. Ocean & Coastal management 68, pag. 39-57. Special issue on the Wadden Sea.

B.2.2 Producten 2011 vanuit overige deelprojecten, met bijdragen vanuit deelproject “Zeegaten”

Van der Werf, J.J., Giardino, A. en Santinelli, G., 2011. Aanzanding en onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Sardijngeul Deltares rapport 7 maart 2011, definitief (Project 1204421-004)

### B.3 Producten 2012

#### B.3.1 Producten 2012 deelproject “Zeegaten”

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F, Wang, Z.B. and De Ronde, J., 2012. Morphodynamic development and sediment Budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences (Geologie en Mijnbouw), 91 – 3, pag. 293 – 310, 2012.

Elias, E.P.L. en Bruens, A., 2012. Morfologische Analyse Boschplaat (Terschelling). Quicksan. Deltares rapport 1206171-001-ZKS-0001, 2 februari 2012, definitief.

Elias, E.P.L. en Bruens, A., 2012. Een quickscan van de morfologische ontwikkelingen op de buitendelta van het Vlie en Noordoost Vlieland Deltares rapport 1206171-001-ZKS-0002, 26 april 2012, definitief.

Deltares en Bureau Landwijzer, 2012. Buitendelta's: samenvatting bestaande kennis en opties voor zandsuppleties-pilots. 23 mei 2012, concept.

Vroom, J., Elias, E., Lescinski, E., and Wang, Z.B., 2012. Assessment of the effects of the Zuider Sea closure on the hydrodynamics of the Wadden Sea inlets. Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering, Santander, Spain  
B.3.2 Producten 2012 vanuit overige deelprojecten, met bijdragen vanuit deelproject "Zeegaten"

Van der Werf, J.J., 2012. Advies geulwandsuppletie Onrustpolder. Deltares memo 1206171-004-ZKS-0003, 25 juli 2012.

## B.4 Producten 2013

### B.4.1 Producten 2013 deelproject "Zeegaten"

Quickscan Eierlandse gat

Elias, E.P.L. en Bruens, A., 2014. Een Quickscan van de morfologische ontwikkelingen van het Eierlandse Gat. Deltares rapport 1206171-001-ZKS-0003, 20 december 2013, definitief

Stagerapport Ameland modellering

Teske, R., 2013. Tidal inlet channel stability in long term process based modelling. MSc traineeship report thesis University of Utrecht, July 2013.

Conferentiepaper

Van der Spek, A.J.F., Elias, E.P.L., 2013. The effects of nourishments on autonomous coastal behaviour. Proceedings of Coastal Dynamics 2013, Bordeaux, France.

Studentrapport morfologie van Ameland

Willemsen, P., 2013. Morfologische veranderingen Amelanders zeegat; een methodische aanpak. BSc thesis University of Twente, 12 July 2013.

### B.4.2 Producten 2013 vanuit overige deelprojecten, met bijdragen vanuit deelproject "Zeegaten"

Ontwikkeling suppletie tussen Den Helder en Julianadorp 2007

Elias, E.P.L., Vonhögen-Peeters, L., Bruens, A., 2013. Ontwikkeling suppletie tussen Den Helder en Julianadorp 2007. Deltares rapport, april 2013 (project 1206171-000).

Ontwikkeling gefaseerde suppletie Ameland 2010-2011

Elias, E.P.L., Vonhögen-Peeters, L., Bruens, A., 2013. Ontwikkeling gefaseerde suppletie Ameland 2010-2011. Deltares rapport 1207724-002-ZKS-0010, 5 december 2013, definitief.

Beheerbibliotheek Schouwen



Cleveringa, J., 2013. Beheerbibliotheek Schouwen; Morfologie en ingrepen. Arcadis rapport C03041.003080, 29 augustus 2013, definitief.

Beheerbibliotheek Schiermonnikoog

Oost, A. en Bruens, A., 2013. Beheerbibliotheek Schiermonnikoog. Feiten en cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004-ZKS-0017, 1 november 2013, definitief.

Beheerbibliotheek Ameland

Elias, E.P.L. en Bruens, A., 2013. Beheerbibliotheek Ameland. Feiten en cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004-ZKS-0015, 1 november 2013, definitief

Beheerbibliotheek Noord-Holland

Elias, E.P.L. en Bruens, A., 2013. Beheerbibliotheek Noord-Holland. Feiten en cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004-ZKS-0016, 1 november 2013, definitief.

Beheerbibliotheek Walcheren,

Vermaas, T., en Bruens, A., 2013. Beheerbibliotheek Walcheren. Feiten en cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004-ZKS-0014, 1 november 2013, definitief.

## **B.5 Producten 2014**

### **B.5.1 Producten 2014 deelproject “Zeegaten”**

Voordelta rapport

Elias, E.P.L. en Van der Spek, A.J.F., 2014. Grootschalige morfologische veranderingen in de Voordelta. 1964-2013. Deltares werkdocument, 30 juni 2014.

Afstudeerrapport Ameland modellering

Jiao, J., 2014. Morphodynamics of Ameland Inlet. Medium-term Delft3D modelling. MSc thesis Delft University of Technology. 10 September 2014.

### **B.5.2 Producten 2014 vanuit overige deelprojecten, met bijdragen vanuit deelproject “Zeegaten”**

Beheerbibliotheek Texel

Elias, E.P.L., van Oeveren, C., Bruens, A., 2014. Beheerbibliotheek Texel. Feiten en cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1209381-007-ZKS-0006, 1 oktober 2014, definitief.

Beheerbibliotheek Voorne en Goeree

De Ronde, J. en Van Oeveren, C., 2014. Beheerbibliotheek Voorne en Goeree. Feiten en cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1209381-007-ZKS-0002, 1 oktober 2014, definitief.

Evaluatie verlegging Krabbengat

Vermaas, T. en Elias, E.P.L., 2014. Evaluatie verlegging Krabbengat 1987/1991/1996. Deltares rapport 1209381-008-ZKS-0005, 15 augustus 2014, definitief.

Vermaas, T., 2014. Analyse ontwikkeling diepe vooroever Grevelingen. Deltares memo 20 november 2014.

#### Rottumeroog en Rottumerplaat

Van Rooijen, A.A., Oost, A.P., 2014. Morfologische veranderingen Rottumeroog en Rottumerplaat, voor de periode 1983-2014. Deltares memo 1209381-008-ZKS-0007, 24 oktober.

#### Ameland Noord-West

Van Rooijen, A.A., Oost, A.P., 2014. Regionale advisering Ameland Noord-West. Deltares memo 1209381-0008-ZKS-0008, 18 december 2014.

Daamen, J., 2014. Coastal erosion processes in tidal channel Oostgat. MSc thesis University of Twente, 9 Oktober 2014.

De Winter, W., 2014. Morphological development of the Haringvliet ebb tidal delta since 1970; A study based on the morphological development of individual morphological units. MSc traineeship report University of Utrecht, 31 Jan 2014.

## B.6 Producten 2015

### B.6.1 Producten 2015 deelproject "Zeegaten"

#### Presentatie Actualisatie data 2015

Vermaas, T., 2015. Actualisatie data 2015. MS Powerpoint presentatie

#### Conceptpaper Voordelta

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Lazar, M. 2015. The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal delta's in the SW Netherlands; Large-scale morphological changes and sediment budget 1965-2013; Impacts of large-scale engineering. Manuscript in preparation)

#### Basisdocument analyse Terschelling.

Elias, E.P.L., Vermaas, T., Quataert, E., 2015. Morfologie van Terschelling. Deltares rapport 1220040-006-ZKS-0005, 14 december 2015, definitief

#### Conceptpaper Texel

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., 2015. Understanding ebb-delta-coastline interactions; a field case study of Texel inlet (Wadden Sea, The Netherlands) (Manuscript in preparation)

#### Rapportage Analyse Ameland

Vermaas, T. en Marques, V., 2015. Detailanalyse volumeveranderingen rondom Ameland. Deltares rapport 1220040-006-ZKS-0004, 13 aug 2015, definitief.

#### Afstudeerrapport sediment tracers

De Vries., S. 2016. Modeling sediment pathways in the mopath of the Scheldt estuary. MSc thesis University of Twente, Civil Engineering and Management. 20 January 2016.

## Werkdocument sediment processen Ameland

Elias, E.P.L., 2015. Stroming en sedimenttransport op het Bornrif (Ameland). Deltares werkdocument (opgenomen in Nederhoff et al., 2016. Erosie op Ameland Noordwest. Modelstudie: simulaties met Delft3D en XBeach)

Elias, E.P.L., 2015. Sediment tracers Ameland case MS Powerpoint presentatie

## Modellenmemo

Tonnon, P.K., Wang, Z.B., Elias, E.P.L., 2015. Development strategy for hydrodynamic modelling of tidal inlets. Deltares memo 1220040-006-ZKS-0003, 29 mei 2015.

## Conceptpaper Ameland modellering Yunwei Wang

Yunwei Wang, Qian Yu, Jian Jiao, Zheng Bing Wang, Pieter Koen Tonnon, Shu Gao., 2015. Coupling bedform roughness and sediment grain-size sorting in modelling of tidal inlet incision (submitted for publication)

## conferentiepaper sediment budget

Van der Spek, A.J.F. en Lodder, Q., 2015. A new sediment budget for the netherlands; the effects of 15 years of nourishing (1991-2005). Proceedings of Coastal Sediments 2015, San Diego, USA.

## conferentiepaper Ameland modellering

Elias, J.P.L., Teske, R., Van der Spek, A.J.F. and Lazar, M., 2015. Modelling tidal-inlet morphodynamics on medium time scales. Proceedings of Coastal Sediments 2015, San Diego, USA.

## conferentiepaper Krabbegat

Vermaas, T., Elias, J.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2015. Relocating Krabbegat channel; A tale of two developments. Proceedings of Coastal Sediments 2015, San Diego, USA.

## B.6.2 Producten 2015 vanuit overige deelprojecten, met bijdragen vanuit deelproject "Zeegaten"

## Bollen van de Ooster

Elias, E.P.L., 2015. Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Bollen van de Ooster. Deltares rapport 1220040-000-ZKS-0005, 21 oktober 2015, definitief.

## Beheerbibliotheek Terschelling

Elias, E.P.L., Vergouwen, S., van Oeveren, C., 2015. Beheerbibliotheek Terschelling. Beschrijving van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Deltares rapport 1220040-002-ZKS-0010, 29 september 2015, definitief

## Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen Concept

Kuijper, K., Nederhoff, C.M., Vergouwen, S., 2015. Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen. Beschrijving van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Deltares rapport 1220040-002-ZKS-0002, 30 juli 2015, concept.

## Beheerbibliotheek Noord-Beveland

Dijkstra, J. en Vergouwen, S., 2015. Beheerbibliotheek Noord-Beveland. Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen. Beschrijving van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Deltares rapport 1220040-002-ZKS-0009, 22 juli 2015, definitief.

conferentiepapier Krabbengat

Vermaas, T., Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2015, Relocating Krabbengat channel; a tale of two developments. Proceedings of Coastal Sediments 2015, San Diego, USA.

Rapportage Westgat, fase 1

Oost, A.P., Vermaas, T., Vonhögen - Peeters, L.M., 2015. Morfologische beschouwing ontwikkeling vaarweg buitendelta Zoutkamperlaag. Deltares rapport 1220040-002-ZKS-0015, 27 november 2015, definitief.

Conceptrapportage Westgat fase 2

Vermaas, T., Oost, A.P. en Vonhögen - Peeters, L., 2015. Westgat fase 2. Deltares rapport 1220040-002-ZKS-0014, 30 oktober 2015, concept

Ameland Noordwest 1

Nederhoff, C.M., Oost, A.P., Vermaas, T., 2015. Erosie op Ameland Noordwest. Evaluatie morfologische ontwikkelingen. Deltares rapport 1220040-001-ZKS-0003, 27 november 2015, definitief.

Brochure wadden eilanden

Deltares, 2015. De ontwikkeling van de kust van de Waddeneilanden. (Samenvatting van Giardino et al., 2015. The state of the coast –Toestand van de Kust-. Case study: Wadden Islands)

Toestand van de kust, Wadden eilanden

Giardino, A., Santinelli, G., Den Heijer, K., 2015. The state of the coast –Toestand van de Kust-. Case study: Wadden Islands. Deltares report 1220040-004-ZKS-0001, 7 September 2015, final.

Schrijvershof, R.A., 2015. Morphological modelling of a nourishment at the Brouwersdam beach. MSc thesis University of Utrecht. 10 April 2016, final.

## **B.7 Producten 2016**

Ameland Noordwest modelstudie

Nederhoff, C.M., Elias, E.P.L. en Vermaas, T., 2016. Erosie op Ameland Noordwest. Modelstudie: simulaties met Delft3D en XBeach. Deltares rapport 15030080, 28 januari 2016, concept.

## C Overzicht gerelateerde onderzoeksprojecten

### C.1 NEMO

NEMO (Nearshore Monitoring and Modelling; Inter-scale Coastal Behavior) is een onderzoekprogramma van de TUD, gefinancierd vanuit de ERC Advanced Grant zoals toegekend aan prof. Marcel Stive. Middels een combinatie van innovatieve remote sensing technieken en in-situ metingen langs de Delflandse kust wordt inzicht verkregen in- en worden modellen opgesteld van- het lange-termijn, grootschalig kustgedrag. Binnen het onderzoek zijn 3 PhD studenten en 3 postdoctoraal onderzoekers actief.

In vergelijking met het KPP B&O Deelproject “Uitwisseling getijdenbekkens & Morfodynamiek eilandkoppen” (Zeegaten), richt NEMO zich meer op het verklaren en modelleren van de processen achter het langjarige, grootschalige gedrag van de Delflandse kust dan op systeemkennis en modellering van het gedrag van zeegaten. Er zijn enkele raakvlakken met met Kustgenese2, met name met betrekking tot hydrodynamische en morfologische modellering met Delft3D en het belang en de sortering van gegradeerd sediment.

- PhD1: Bas Hoonhout Strand en aeolisch transport
- PhD2: Bas Huisman Brandingszone en morfologie
- PhD3: Saulo Meirelles Onderwateroever en hydrodynamica
- Postdoc1: Martijn Henriques Coordinatie
- Postdoc2: ?
- Postdoc3: ?

Bas Huisman (TUD/Deltares) richt zich op de effecten van de Zandmotor op de korrelverdeling en op het lange-termijn gedrag van (mega)suppleties.

Saulo Meirelles (TUD) richt zich op het beschrijven van de hydrodynamica en bodemvormen buiten de brandingszone, waaronder het effect van de uitstroom van de zoetwaterpluim op de stroming.

### C.2 EMERGO

EMERGO (Eco-morphological functioning and management of tidal flats) is een onderzoeksprogramma van de TU Delft, en het NIOZ dt zich richt op het morfologisch en ecologisch functioneren van getijdeplate in de Ooster- en Westerschelde. Binnen het onderzoek zijn 2 PhD studenten en 1 postdoctoraal onderzoeker actief.

In vergelijking met het KPP B&O Deelproject “Uitwisseling getijdenbekkens & Morfodynamiek eilandkoppen” (Zeegaten), richt EMERGO zich meer op het beschrijven en verklaren van de processen achter de ontwikkeling van platen en het intergetijdegebied en niet op het grootschalig gedrag van zeegaten. Er zijn enkele raakvlakken met Kustgenese2, met name met betrekking tot hydrodynamische en morfologische modellering met Delft3D en het belang en de sortering van gegradeerd sediment.

- PhD1: Lodewijk de Vet morfologie van getijplaten
- PhD2: Oliver Jewell ecologie van getijplaten

- Postdoc1: Brenda Walles integratie

Lodewijk de Vet (TUD/Deltares) richt zich op data analyse en de ontwikkeling van platen in de Ooster- en Westerschelde, op de hydrodynamica van/rondom de Roggeplaat en op hydrodynamische, morfologische en ecologische veldcampagnes en proces-gebaseerde detailmodellering daarvan. De modellering is ondersteunend aan de het systeembegrip en ontwikkeling van kennis van het gedrag van platen.

### C.3 STW NatureCoast

STW NatureCoast is een vijfjarig onderzoekprogramma van vijf universiteiten (TUD, VU, WUR, UU, UT) en het NIOZ dat zich richt op het verbeteren van de voorspelcapaciteit voor natuur-aangedreven (mega)suppleties teneinde deze technologie wereldwijd te kunnen exporteren. Binnen het onderzoek zijn 12 PhD studenten en 3 Postdoctoraal onderzoekers actief. Het onderzoek wordt gefinancierd vanuit het programma "STW – Perspectief voor de Topsectoren".

In vergelijking met het KPP B&O Deelproject "Uitwissling getijdenbekkens & Morfodynamiek eilandkoppen" (Zeegaten), richt STW NatureCoast zich meer op begrip van processen op kortere tijdschalen dan op systeemkennis en modellering van het gedrag van zeegaten. Er zijn enkele raakvlakken met Kustgenese2, met name met betrekking tot hydrodynamische en morfologische processen en -modellering met Delft3D

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| • PhD1: Max Rademacher (TUD)       | Hydrodynamica van de Zandmotor                   |
| • PhD2: Jantien Rutten (UU)        | Lange-termijn morfologie van de Zandmotor        |
| • PhD3: Isaac Williams             | zandtransport tussen strand en duin              |
| • PhD4: Corjan Nolet (WUR)         | Biogeomorfologie van duinvorming                 |
| • PhD5: Simeon Moons (NIOZ)        | Bodemleven in ondiep water                       |
| • PhD6: Marjolein post (WUR)       | Voedselketen in ondiep water                     |
| • PhD7: Marinka van Puijenbroek    | Duinvegetatie                                    |
| • PhD8: Emily van Egmond (VU)      |  |
| • PhD9: Sebastiaan Huizer (UU)     | Hydrologie van suppleties                        |
| • PhD10: Iris Pit (UU)             | Geochemie van suppletiezand                      |
| • PhD11: Ewert Aukes (UT)          | Ecosystem services                               |
| • PhD12: Lotte Bontje (TUD)        | Storylines                                       |
| • Postdoc1: Arjen Luijendijk (TUD) | korte-termijn morfologie van de Zandmotor        |
| • Postdoc2: wie?                   | ecosysteemdiensten van megasuppleties            |
| • Postdoc3: Vera Vikolainen (UT)   | beleidsmatige levensvatbaarheid van de Zandmotor |

Max Rademacher (TUD) richt zich op de hydrodynamica rondom de Zandmotor inclusief zwemveiligheid en het ontstaan en loslaten van neren. Daarnaast werkt hij aan het tellen van badgasten met behulp van Argus video beelden.

Jantien Rutten (UU) richt zich op het beschrijven van het gedrag van brekerbanken middels remote sensing technieken (Argus en radar) en het modelleren van lange-termijn gedrag van megasuppleties met geïdealiseerde modellen.

Arjen Luijendijk (TUD/Deltares) richt zich op de procesgebaseerde morfologische modellering van de Zandmotor, inclusief het effect van stormen en het effect van schematisatie van randvoorwaarden. Zijn uiteindelijke doel is het koppelen van modellen voor onderwatermorfologie, duinvorming en duinafslag en het in kaart brengen van bandbreedtes in morfologische voorspellingen.

#### C.4 CoCoChannel

CoCoChannel (Co-designing Coasts using natural Channel-shoal dynamics ) is een vijfjarig onderzoeksprogramma(2014-2019) van de Universiteit Twente, UNESCO-IHE, TU Delft, IMARES en Deltares dat zich richt op kennis en tools voor innovatieve oplossingen voor kusterosie onder invloed van zeegaten. Binnen het onderzoek zijn 3 PhD studenten actief. Het onderzoek wordt gefinancierd vanuit het programma “NWO – Building with Nature” in samenwerking met het TKI Deltatechnologie (topsector water).

In vergelijking met het KPP B&O Deelproject “Uitwisseling getijdenbekkens & Morfodynamiek eilandkoppen” (Zeegaten), richt CoCoChannel zich waarschijnlijk iets meer op afzonderlijke processen. Er zijn veel raakvlakken met Kustgenese2, met name met betrekking tot de hydrodynamische en morfologische modellering van zeegaten en de uitwisseling met de aanliggende kusten.

- PhD1: Hau Wang (UNESCO-IHE/TUD)                      plaat-geul interactie
- PhD2: Filipe Galiforni Silva (UT)                        strand-duin interactie
- PhD3: Floortje d’Hondt (TUD)                            beleid

Hau Wang (UNESCO-IHE) richt zich op het koppelen van een procesgebaseerd 2DH XBeach model met een kustlijn model en het modelleren van het effect van suppleties in zeegaten met Delft3D.

##### C.2.5 NWO-STW Aeolus meets Poseidon

Aeolus meets Poseidon is een vijfjarig onderzoeksprogramma (2014-2019) van de Universiteit Utrecht dat zich richt op windgedreven zandtransport op golf-gedomineerde stranden. Het onderzoek staat onder leiding van Prof. dr. Gerben Ruessink en wordt middels de aan hem toegekende Vici beurs gefinancierd door NWO-STW. Binnen het onderzoek zijn 3 PhD studenten en is 1 postdoctoraal onderzoeker actief.

In vergelijking met het KPP B&O Deelproject “Uitwisseling getijdenbekkens & Morfodynamiek eilandkoppen” (Zeegaten), richt Aeolus meets Poseidon zich meer op de proceskennis van aeolisch zandtransport en het modelleren van duinvorming dan op systeemkennis en modellering van het gedrag van zeegaten. Er zijn nauwelijks tot geen raakvlakken met Kustgenese2.

- PhD1: Yvonne Smit    Vochtgehalte aan het oppervlak
- PhD2: Pam Hage    Variatie in zandaanbod
- PhD3: Winnie de Winter                                    Transport van zand door wind
- Postdoc1: Jasper Donker                                 Model ontwikkeling

## C.5 STW SEAWAD

STW SEAWAD (SEdiment supply At the WAdden Sea ebb-tidal Delta - from system knowledge to mega-nourishments) is een onderzoeksprogramma van de TUD, UU en UT dat zich richt op kennis en tools om de morfologische en ecologische effecten van suppleties in zeegat systemen te kunnen begrijpen en voorspellen. Het onderzoek wordt gefinancierd door STW. Binnen het onderzoek zijn 4 PhD studenten actief.

In vergelijking met het KPP B&O Deelproject "Uitwisseling getijdenbekkens & Morfodynamiek eilandkoppen" (Zeegaten), richt STW SEAWAD zich in meer detail op begrip van processen dan op systeemkennis en grootschalige modellering van het gedrag van zeegaten. Het onderzoeksprogramma is complementair aan Kustgenese2 en er zijn dan ook zeer veel raakvlakken, onder meer met betrekking tot hydrodynamische en morfologische modellering van zeegaten met procesgebaseerde modellen zoals Delft3D.

- PhD1: golf-stroom interactie en zandtransport
- PhD2: bodemvormen en zandtransport
- PhD3: korrelverdeling en transportpaden
- PhD4: sortering, bodemdierleven en ecodynamisch ontwerpen van suppleties



## D Interviews

### D.1 Maarten van Ormondt

Ir. Maarten van Ormondt is expert modelleur en modelontwikkelaar in internationale advies en onderzoeksprojecten en werkt daarnaast aan zijn promotie bij UNESCO-IHE en de TU Delft.

Maarten geeft aan dat er voor een betrouwbare morfologische voorspelling op midden-lange termijn nog een aantal fysische processen moeten worden toegevoegd of worden verbeterd. Hij constateert ondermeer dat het met Delft3D nog niet mogelijk is een evenwichtsprofiel en/of bankgedrag te reproduceren en denkt dat dit ook de morfologische voorspelling van het gedrag van zeegaten kan beïnvloeden. Verbeterpunten betreffen hier oa hydrodynamica van branding- en swash zone, inclusief golf-stroom interactie zoals het aangrijpen van golfkrachten, golf-geïnduceerde turbulentie en de verticale verdeling van golfgedreven langstroming en de retourstroming en massaflux. Ook het effect van lange golven is belangrijk. Ook is verdere verbetering en validatie van ruwheidsvoorspellers en formuleringen voor hellingseffecten noodzakelijk.

Resumerend denkt Maarten dat er nog een aantal fysische processen ontbreken of onvoldoende worden meegenomen in de modellering. Het gaat dan met name om subtiele hydrodynamische processen, zoals het aangrijpen van golfkrachten, golf-geïnduceerde turbulentie en de verticale verdeling van de golfgedreven langstroming, retourstroming en massaflux. Ook swash zone processen moeten volgens Maarten worden meegenomen. Daarnaast is een verdere verbetering en validatie van de ruwheidsvoorspellers noodzakelijk en dienen deze mogelijk richtingsafhankelijk te worden gemaakt. Tot slot worden hellingseffecten waarschijnlijk onderschat in Delft3D.

### D.2 Arjen Luijendijk

Ir. Arjen Luijendijk is als projectleider en modelleur betrokken bij een aantal grote internationale modelstudies en werkt binnen het onderzoeksprogramma STW NatureCoast aan zijn promotie.

Arjen is voorstander van een seriële, gekoppelde modelaanpak waarin gebruik wordt gemaakt van al dan niet gecomprimeerde golftijdseries in plaats van een morfologisch golfklimaat en waarin periodiek ook stormen worden doorgerekend met een apart model. Hij vermoedt dat met de zogenaamde mormerge aanpak de morfologische ontwikkeling teveel wordt bepaald door de netto transporten terwijl bruto transporten en het effect stormen vaak essentieel zijn om te komen tot een goede morfologische voorspelling. Zijn ervaring met onder meer het project Sterkte en Belasting Waterkering (SBW) waarin de waterbeweging en golfdoordringing in het Amelander zeegat en de Waddenzee centraal stonden hebben hem geleerd dat het toepassen van ruwheidsvoorspellers en golfstroom-interactie noodzakelijk zijn voor een goede voorspelling van de hydrodynamica in een zeegat.

Hij is van mening dat er vaak te grof en teveel geschematiseerd wordt gerekend als gevolg van beperkingen in de rekencapaciteit. Een belangrijk verbeterpunt zit volgens hem dan ook in het verbeteren van de reketijden en het rekenen op ongestructureerde of adaptieve roosters. Ook SWAN is in zijn ogen een te zwaar en neemt een te groot deel van de reketijd in van een morfologische berekening. Als aandachtspunt noemt hij het sorteringseffecten en

het uitvlakken van brekerbanken in delft3D waardoor langstransporten en kustlijn ontwikkelingen niet juist worden voorspeld.

Samenvattend is Arjen van mening dat de meeste fysica al redelijk tot goed in de modellen zit, maar dat er vaak te grof en te sterk geschematiseerd wordt gerekend als gevolg van beperkingen in de reken capaciteit. De belangrijkste verbeterpunten zijn volgens Arjen de rekestijden en parallelisatie, ongestructureerd en/of adaptief rekenen en sorteringseffecten.

### D.3 Jebbe van der Werff

Dr. ir. Jebbe van der Werf is als projectleider en modelleur betrokken bij een aantal grote modelstudies rondom de Wester- en Oosterschelde.

In een vraaggesprek geeft hij aan dat hij voorstander is van een hybride modelaanpak met specifieke modellen voor specifieke vragen of fysica op verschillende tijd en ruimteschalen. Een relatief zwaar 3D zand-slib model van de Westerscheldemonding presteert vrij goed voor wat betreft waterbeweging en baggervolumes op tijdschalen tot ongeveer een jaar, maar kan gezien de lange rekestijden niet worden ingezet voor lange-termijn morfologische vraagstukken. Met een grover, meer geschematiseerd lange-termijnmodel is het mogelijk redelijke voorspelling te doen van erosie-sedimentatie patronen voor periode van 40 jaar, maar is het nog niet mogelijk om goede kwantitatieve scores te behalen.

Jebbe geeft aan dat procesgebaseerde modellen zoals Delft3D de waterbeweging over het algemeen goed kunnen voorspellen (waterstanden in de orde van cm's, stroomsnelheden in de orde van procenten). Hij noemt 3D effecten, waaronder bochtstroming en verticale menging als aandachtspunten voor verbetering. Ook golf-stroominteractie, erosie van de waterlijn en verbeteren van de rekestijden zijn belangrijk om te komen tot betere lange-termijn morfologische voorspellingen. Daarnaast geeft hij aan dat veel aandacht voor het opzetten en afregelen van op specifieke vragen toegesneden modellen belangrijk is.

Al met al denkt hij dat de meeste fysica al redelijk tot goed in de modellen zit, maar dat Er verbeteringen mogelijk zijn voor wat betreft 3D effecten, golven en golf-stroom interactie in combinatie met het verbeteren van rekestijden.