

**Sedimentperspectief op de  
Zuidwestelijke Delta**





## **Sedimentperspectief op de Zuidwestelijke Delta**

dr. J.P.M. Mulder  
dr. J. Cleveringa (ARCADIS)  
ir. M.D. Taal  
dr. B.K. van Wesenbeeck  
dr. F. Klijn

1203404-000



**Titel**  
Sedimentperspectief op de Zuidwestelijke Delta

**Opdrachtgever**  
RWS Zeeland

**Project**  
1203404-000

**Kenmerk**  
1203404-000-VEB-0005

**Trefwoorden**

Sedimentbalans, ZW Delta, zeespiegelstijging, klimaatbestendigheid, inrichting

**Samenvatting**

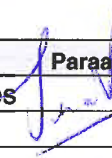


Bij de inrichting van de ZW Delta op lange termijn is het nodig om de samenhang te beschouwen tussen deltawateren, voordelta en kust(fundament). Hetzelfde geldt voor de samenhang tussen de verschillende randvoorwaarden, die vanuit de basislaag worden geboden aan de lange termijnontwikkeling. Tot op heden is met name de aandacht gericht op de randvoorwaarden vanuit een waterperspectief: de zoetwaterbalans en de waterstoffenbalans. Randvoorwaarden vanuit een sedimentperspectief, de sedimentbalans zijn daarbij onderbelicht.

Om zowel de samenhang tussen de verschillende deelsystemen van de ZW Delta, als het belang van een sedimentperspectief te illustreren, is het voorliggende rapport opgesteld. Een eerste beeld van de gebruiksperspectieven is tot stand gebracht op een ontwerpatelier in Goes op 11 en 12 november.

De nadruk in het voorliggende rapport ligt op sediment, en dan vooral op zand. Waar opportuun wordt de rol van slib vermeld. Om het begrip te vergroten, is getracht een grootschalig beeld te schetsen zonder (al te veel) in te gaan op detail processen. Vanuit het beeld "sediment als drager van functies", worden (in kwalitatieve zin) de gevolgen en de potenties voor verschillende functies geschetst. Gebaseerd op de systeembeschrijvingen en een aantal potentiële oplossingsrichtingen voor een klimaatbestendige inrichting van de Zw Delta, wordt tot slot een aanzet gegeven tot het formuleren van een aantal kennisvragen.

**Referenties**

Type hier de referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	jan. 2011	Dr. J.P.M. Mulder		Drs. I. de Vries		Ir. I. Ritsema	
		Dr. J. Cleveringa					
		Ir. M.D. Taal					
		Dr. B.K. van Weesenbeek					
		Dr. F. Klijn					



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>1</b>
1.1	Deltaprogramma .....	1
1.2	Lagenbenadering .....	1
1.3	Lange termijn ontwikkeling van kustgebieden .....	1
1.4	Sedimentperspectief. ....	2
1.5	Oplossingsruimte voor klimaatbestendige inrichting. ....	2
<b>2</b>	<b>Sedimentperspectief en klimaatbestendig ontwerpen .....</b>	<b>3</b>
2.1	Nederlands kustgebied vanuit sedimentperspectief.....	3
2.1.1	Morfologisch passief kustgebied. ....	3
2.1.2	Morfologisch actieve kustzone. ....	4
2.2	Opgaven voor klimaatbestendige inrichting en –ontwerp.....	4
2.2.1	Sedimentbalans bepaalt potenties voor functies.....	4
2.2.2	Sedimentverdeling bepaalt waarde voor functies .....	5
2.2.3	Conditionerende ontwerpen .....	5
<b>3</b>	<b>Nederlands kustbeleid: eerste uitwerking van sedimentperspectief .....</b>	<b>7</b>
3.1	Systeembegrenzing en suppletieomvang (HOEVEEL?) .....	7
3.2	Suppletieverdeling (WIE, WANNEER, WAAR en HOE).....	8
3.2.1	Wie? .....	8
3.2.2	Wanneer? .....	8
3.2.3	Waar? .....	8
3.2.4	Hoe? .....	9
3.3	Klimaatbestendige inrichting .....	9
<b>4</b>	<b>Sedimentbalans ZW Delta .....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Voordelta en Westerscheldemonding.....</b>	<b>15</b>
5.1	Inleiding.....	15
5.2	Sedimentuitwisseling en –balans van deelsystemen .....	15
5.3	Interne sedimentherverdeling en vormveranderingen.....	16
<b>6</b>	<b>Grevelingen en Volkerak-Zoommeer .....</b>	<b>23</b>
6.1	Historische ontwikkeling.....	23
6.2	Toekomstige ontwikkelingen.....	24
6.3	Toepassing beheersmaatregelen Grevelingen-Volkerak .....	25
<b>7</b>	<b>Haringvliet en Hollandsch Diep .....</b>	<b>27</b>
7.1	Vraagstelling .....	27
7.2	Historische ontwikkeling.....	27
7.3	Zand .....	28
7.4	Slib .....	29
7.5	Alles bijeen.....	30
7.6	Meegroeien met de zeespiegel?.....	31
<b>8</b>	<b>Oosterschelde .....</b>	<b>33</b>
8.1	Historische ontwikkeling.....	33
8.2	Toepassing op ontwerp beheersmaatregelen Oosterschelde.....	34

<b>9</b>	<b>Westerschelde estuarium .....</b>	<b>37</b>
9.1	De tijdschaal van reactie op huidige menselijk ingrepen .....	38
9.2	De tijdschaal van klimaatverandering en zeespiegelstijging.....	38
9.3	Belangrijke kennisvraagstukken.....	39
<b>10</b>	<b>Oplossingsrichtingen vanuit sedimentperspectief .....</b>	<b>41</b>
10.1	Inleiding.....	41
10.2	Effecten van (gedeeltelijk) herstel van verbindingen op sedimenthuishouding .....	41
10.3	Klimaatbestendig ontwerpen vanuit sedimentperspectief .....	44
<b>11</b>	<b>Kennisvragen.....</b>	<b>49</b>
11.1	Meer Jaren Kader Onderzoek (MJKO) kustlijn­zorg en kust­beleid .....	49
11.2	Specifieke kennisvragen voor ZW Delta .....	51
<b>12</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>53</b>

## Vooraf

### Achtergrond

Bij de inrichting van de ZW Delta op lange termijn is het nodig om de samenhang te beschouwen tussen deltawateren, voordelta en kust(fundament). Hetzelfde geldt voor de samenhang tussen de verschillende randvoorwaarden, die vanuit de basislaag worden geboden aan de lange termijnontwikkeling. Tot op heden is met name de aandacht gericht op de randvoorwaarden vanuit een waterperspectief: de zoetwaterbalans en de waterstoffenbalans. Randvoorwaarden vanuit een sedimentperspectief, de sedimentbalans zijn daarbij onderbelicht.

Om zowel de samenhang tussen de verschillende deelsystemen van de ZW Delta, als het belang van een sedimentperspectief te illustreren, is het voorliggende rapport opgesteld. Een eerste beeld van de gebruiksperspectieven is tot stand gebracht op een ontwerpatelier in Goes op 11 en 12 november.

### Focus

De nadruk in het voorliggende rapport ligt op sediment, en dan vooral op zand. Waar opportuun wordt de rol van slib vermeld. Om het begrip te vergroten, is getracht een grootschalig beeld te schetsen zonder (al te veel) in te gaan op detail processen. Vanuit het beeld "sediment als drager van functies", worden (in kwalitatieve zin) de gevolgen en de potenties voor verschillende functies geschetst. Gebaseerd op de systeembeschrijvingen en een aantal potentiële oplossingsrichtingen voor een klimaatbestendige inrichting van de Zw Delta, wordt tot slot een aanzet gegeven tot het formuleren van een aantal kennisvragen.

### Verantwoording

Hoofdstuk 5 is een bijdrage van J. Cleveringa, hoofdstuk 6 van B. van Wesenbeeck en hoofdstuk 7 van F. Klijn met kritische kanttekeningen door W. ten Brinke. Hoofdstuk 8 is eerder verschenen als onderdeel van een notitie door J. Mulder en S. van Heteren; hoofdstuk 9 is een bijdrage van M. Taal. Paragraaf 11.1 bevat bijdragen van A. Bruens, A. van der Spek, Z.B. Wang, J. de Ronde en J. Mulder. Alle overige hoofdstukken en de eindredactie was de verantwoordelijkheid van J. Mulder



## 1 Inleiding

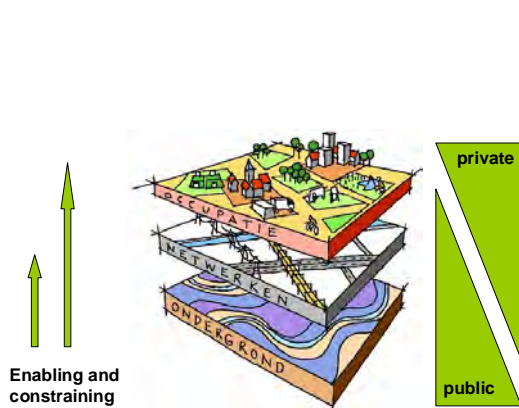
### 1.1 Deltaprogramma

De lange termijn veiligheid en zoetwatervoorziening van ons land in samenhang met natuur en ruimtelijke kwaliteit. Daar gaat het over in het Deltaprogramma. En dit alles in het licht van klimaatverandering. Het gaat om de klimaatbestendige inrichting van ons land.

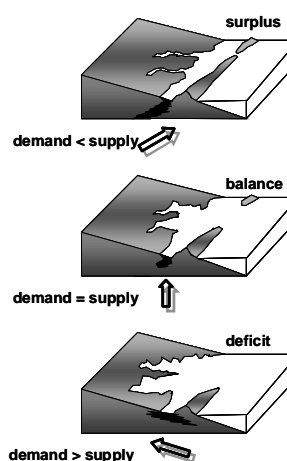
### 1.2 Lagenbenadering

Nuttig hulpmiddel hierbij is de Lagenbenadering uit de Nota Ruimte (2006), die onderscheid maakt in een basis-, een netwerk- en een occupatielaag (Figuur 1.1).

In deze benadering wordt de ondergrond (of basislaag) bestaande uit water en bodem beschouwd als ruimtelijke drager voor achtereenvolgens de netwerklaag en de occupatielaag. Mogelijkheden en beperkingen van de onderliggende laag bepalen wat er in een bovenliggende laag kan worden gedaan.



Figuur 1.1 Drie planningslagen: basis-, netwerk- en occupatielaag



Figuur 1.2 Kustontwikkeling gestuurd door balans tussen vraag en aanbod van sediment (Nicholls, 1989)

De basislaag wordt gekenmerkt door een trage dynamiek; veranderingen voltrekken zich langzaam op een tijdschaal van >100 jaar. Als zodanig is de basislaag bij uitstek de laag waarop trage processen ingrijpen, zoals klimaatverandering. Een klimaatbestendige inrichting wordt dan ook gekenmerkt door het inspelen op de trends in de basislaag.

### 1.3 Lange termijn ontwikkeling van kustgebieden

Een duidelijk voorbeeld van de afhankelijkheid van trage ontwikkelingen in de basislaag op de ontwikkelingsmogelijkheden van een gebied, levert de geologische ontwikkeling van (sedimentaire) kustgebieden.

De lange termijn ontwikkeling van kustgebieden wordt bepaald door de balans tussen vraag en aanbod van sediment (2).

Het aanbod van sediment wordt bepaald door de beschikbaarheid van sedimentbronnen en door de transportcapaciteit van stroming, golven en wind. De sedimentvraag is afhankelijk van de bergingsruimte voor sediment. Aangezien de bulk van geologische afzettingen plaats

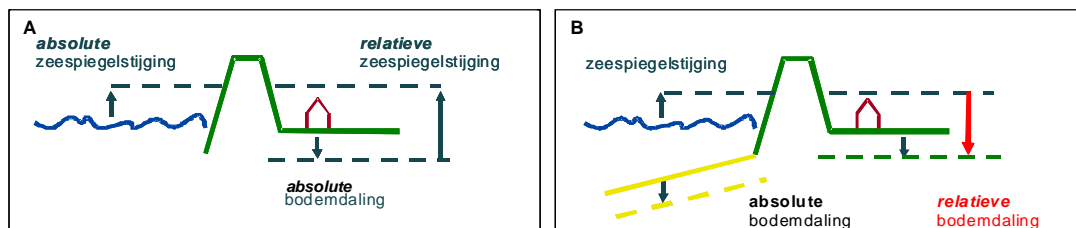
heeft in water, wordt de bergingsruimte (in hoofdzaak) bepaald door de waterdiepte. Een verandering in waterdiepte, betekent een wijziging in bergingsruimte en dus in sedimentvraag. Stijging van de zeespiegel en/of daling van de bodem doen de sedimentvraag toenemen.

## 1.4 Sedimentperspectief.

De sedimentbalans van een kustgebied is bepalend voor zijn (fysisch en ecologische) ontwikkeling op langere termijn. Het bepaalt daarmee de mogelijkheden (randvoorwaarden) voor een klimaatbestendige inrichting (van netwerk- en occupatielaag). Niet voor niets spreekt de Nota Ruimte over “zand als drager van alle functies in de kustzone”.

Bij het zoeken naar adaptatiemogelijkheden voor klimaatverandering, is dan ook een gerechtvaardigde vraag: in hoeverre kunnen we de sedimentbalans dusdanig beïnvloeden dat het bijdraagt aan een klimaatbestendige inrichting?

We hanteren een sedimentperspectief op de problematiek van zeespiegelstijging en zoeken naar sedimentoplossingen. Een omkering van (en aanvulling op) het traditionele waterperspectief dat zoekt naar water(kerings)oplossingen (Figuur 1.3).

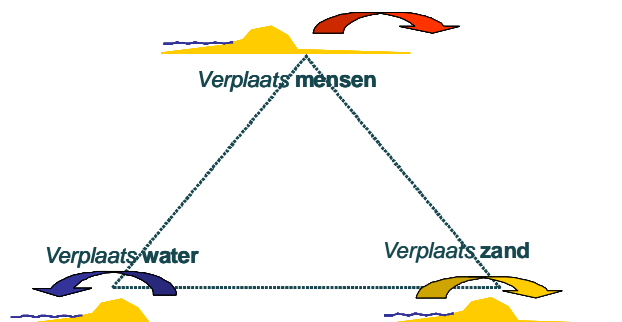


Figuur 1.3 Twee perspectieven op hetzelfde probleem: (A) relatieve zeespiegelstijging vanuit waterperspectief (vgl. ref. 5) tegenover (B) relatieve bodemdaling vanuit sediment perspectief.

## 1.5 Oplossingsruimte voor klimaatbestendige inrichting.

Door het toevoegen van een sedimentperspectief wordt de oplossingsruimte voor klimaatadaptatie verruimd. Aan de bestaande perspectieven vanuit water (waterbeheer) en vanuit de mens (ruimtelijke ordening) wordt een derde toegevoegd (Figuur 1.4).

Een optimale klimaatbestendige inrichting zal altijd zijn gebaseerd op een mix van deze oplossingsrichtingen. Voor verschillende (deel)gebieden kan daarbij het accent verschillen. De Deltacommissie (2008) geeft daarvan een treffend voorbeeld; terwijl het overall accent (gelijk aan de titel van het advies) ligt op “Samen werken met Water”, is de voorgestelde oplossingsrichting voor de kust: voeg sediment toe. “Samen werken met Sediment” dus.



Figuur 1.4 Oplossingsruimte voor adaptatie opties

## 2 Sedimentperspectief en klimaatbestendig ontwerpen

### 2.1 Nederlands kustgebied vanuit sedimentperspectief.

De geschiedenis van het Nederlandse kustgebied begint zo'n 10.000 jaar geleden bij het eindigen van de laatste ijstijd. De Noordzee bodem ligt droog en vormt een gigantisch reservoir van sedimenten (hoofdzakelijk zand) welke hier aan het front van de ijstongen zijn afgezet. De stijgende zeespiegel heeft vanaf dat moment (in samenwerking tussen golven en getij,) voortdurend sediment van de zandige Noordzeebodem landwaarts getransporteerd. Op deze wijze is zo'n 80% van Laag Nederland (Figuur 2.1) opgebouwd. De overige 20% is aangevoerd door rivieren.



Figuur 2.1 Grootschalige deelsystemen van Nederland

Gedurende het grootste deel van de afgelopen 10.000 jaar was het gemiddelde aanbod van sediment vanuit zee en de rivieren, groter dan de sedimentvraag door de stijgende zeespiegel. Laag Nederland kon uitbouwen.

In deze situatie is de afgelopen paar duizend jaar verandering gekomen.

Grotendeels gebeurde dat geleidelijk; bij het verder stijgen van de zeespiegel kwam een steeds groter deel van de Noordzeebodem buiten bereik van de golven te liggen. Het sedimentaanbod vanuit zee nam geleidelijk af tot een verwaarloosbaar niveau.

Soms gebeurde dat abrupt, wanneer door een stormvloed (lokaal of over groter gebied) de balans tussen vraag en aanbod van sediment werd verstoord. Vanaf het begin van onze jaartelling wordt het aantal abrupte verstoringen sterk vergroot door toedoen van de mens. Aanvankelijk alleen incidenteel, bijvoorbeeld door onoordeelkundig landgebruik leidend tot inbraken van de zee. Later meer structureel door het aanleggen van dijken en dammen, waardoor grote stukken land worden buitengesloten van de invloed van water, maar daardoor tevens van de aanvoer van sediment.

#### 2.1.1 Morfologisch passief kustgebied.

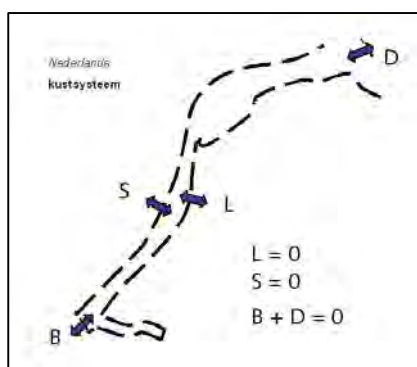
Voor het bedijkte en door dammen afgesloten deel van Laag Nederland heeft dat geleid tot de volgende situatie. Het sedimentaanbod is nul, terwijl door zeespiegelstijging en door bodemdaling als gevolg van ontwatering, de sedimentvraag voortdurend groeit. Omdat hier geen mogelijkheid meer is van een natuurlijke, actieve sedimentaanvoer, spreken we hier van een *passieve* sedimentvraag.

Voor Laag Nederland als geheel is de historisch opgebouwde *passieve* sedimentvraag geschat op totaal 13 miljard m<sup>3</sup> (overeenkomend met twee maal de inhoud van het IJsselmeer); een hoeveelheid welke bij de huidige zeespiegelstijgsnelheid nog jaarlijks toeneemt met zo'n 30 Mm<sup>3</sup> (van dezelfde grootte orde als de huidige jaarlijkse zandwinning ten behoeve van ophoogwerken) ( naar: van der Meulen et al., 2007).

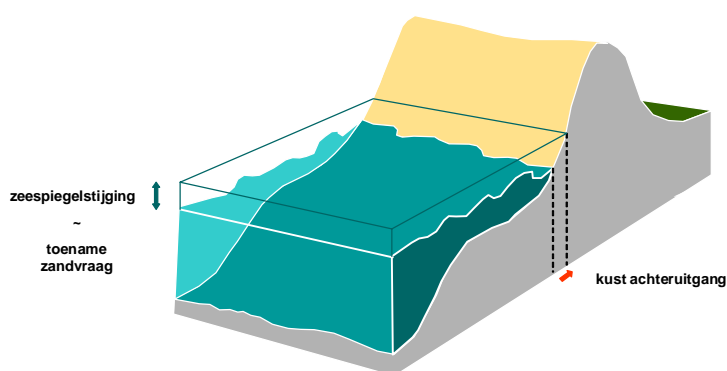
## 2.1.2 Morfologisch actieve kustzone.

Voor het niet bedijkte deel van onze kustzone – de actieve zone genoemd, omdat hier nog actief natuurlijk, sedimenttransport optreedt –, geldt eveneens dat het sedimentaanbod vrijwel gelijk is aan nul. De natuurlijke aanvoer vanaf de zeebodem is verwaarloosbaar, als gevolg van alle menselijke rivieringrepen leveren de rivieren geen sediment meer en de aanvoer via een noordelijke reststroming vanuit het Belgische kustgebied is van dezelfde orde als de afvoer naar het Duitse kustgebied (Figuur 2.2). Tegelijkertijd zorgt de zeespiegelstijging voor een permanente toename van de bergingsruimte. In het actieve systeem betekent dit een *actieve* sedimentvraag welke zonder sedimentaanbod leidt tot een teruggang van de kust (Figuur 2.2).

De actieve sedimentvraag – de sedimentvraag van het morfologisch actieve deel van de kustzone – bedraagt zo'n 7 Mm<sup>3</sup> per mm zeespiegelstijging per jaar. Bij de huidige zeespiegelsnelheid van 2 mm/jaar betekent dat 14 Mm<sup>3</sup>/jaar.



Figuur 2.2 Gesloten sedimentbalans van actief Nederlands kuststelsel



Figuur 2.3 Toename bergingsruimte door zeespiegelstijging. Zonder sedimentaanbod betekent dit kustachteruitgang

## 2.2 Opgaven voor klimaatbestendige inrichting en –ontwerp.

Welke opgaven komen in beeld voor klimaatbestendige inrichting en –ontwerp, wanneer we een sedimentperspectief hanteren?

Het gaat dan om de vraag of en hoe we de balans van vraag-en-aanbod gunstig kunnen beïnvloeden. We beschouwen daarbij zand als drager van alle functies in de kustzone.

### 2.2.1 Sedimentbalans bepaalt potenties voor functies

Een negatieve balans tussen vraag-en-aanbod van sediment betekent een afname van de *potenties* voor de functies. In het morfologische passieve deel van de kustzone uit deze afname van de potenties zich o.a. in een toename van waterveiligheidsproblemen, van

wateroverlast en van verzilting. In het morfologisch actieve deel komt de afname tot uiting in een structurele erosie van de kust, welke alle functies bedreigt.

De vraag is dan:

Kan het toevoegen van sediment bijdragen aan een duurzame, lange termijn oplossing van deze problemen?

Voor het actieve kuststelsel is met het instellen van het suppletiebeleid in 1990, deze vraag positief beantwoord (zie H. 3). Op natuurlijke wijze meegroeien met de zeespiegelstijging is bij de huidige sedimentbalans van het actieve kuststelsel, niet mogelijk. Klimaatbestendig handhaven van de kustfuncties kan alleen door kunstmatig zand aan het systeem toe te voegen.

Het blijft vooralsnog een open vraag of deze aanpak ook iets kan betekenen voor het morfologisch passieve deel van de kustzone.

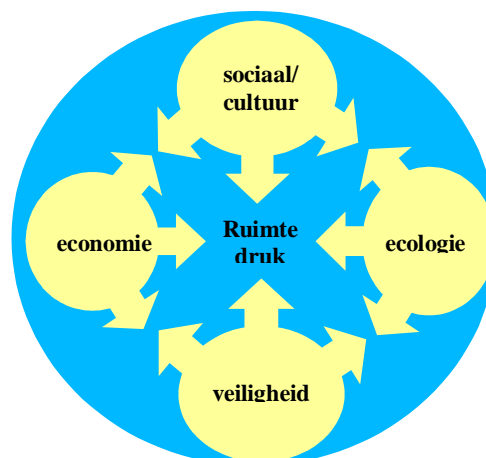
### 2.2.2 Sedimentverdeling bepaalt waarde voor functies

Terwijl een neutrale of positieve zandbalans zorgt voor het handhaven of verbeteren van de *potenties* voor verschillende functies, is de verdeling van het zand (hoeveel ligt waar, op welk tijdstip?) bepalend voor de *actuele waarde* van een specifieke functie. Een cruciale vervolgvraag op het toevoegen van sediment is dan:

Hoe kan ik het sediment verdelen (waar en wanneer?) zodat op kortere termijn de functies optimaal worden bediend?

### 2.2.3 Conditionerende ontwerpen

Voor het ontwerp is van belang of wordt gekozen voor een integrale aanpak waarbij alle functies integraal worden meegewogen (Figuur 2.4), dan wel voor een aanpak waarbij het scheppen van veiligheid tegen overstromen als primaire functie wordt meegenomen, randvoorwaarden stellend voor de overige functies.



Figuur 2.4 Ruimtedruk als gevolg van ruimtelijke functies

Naast beantwoorden van vragen hoe dit alles technisch, ecologisch, financieel-economisch en procedureel kan worden gerealiseerd, is het van belang dat een ontwerp zich baseert op de blijvende dynamiek van het systeem. Deze dynamiek kent twee hoofdaspecten:

Enerzijds is er de zeespiegelstijging als een blijvend fenomeen waarvan de snelheid in de tijd kan variëren, terwijl deze in de toekomst naar alle waarschijnlijkheid alleen maar zal toenemen. Deze variatie in stijgsnelheid van de zeespiegel bepaalt de sedimentbalans van

het systeem, de potenties voor de kustfuncties en daarmee de benodigde omvang van zandsuppleties om deze potenties te handhaven dan wel te vergroten (zie H 3).

Anderzijds is er de interne herverdeling van sediment – de voortdurende verplaatsing van sediment binnen het systeem in reactie op de stijgende zeespiegel, maar evenzeer zo niet sterker in reactie op menselijke ingrepen zoals inpolderingen en afsluiting van zeegaten (zie H 4).

Deze dynamiek en de onzekerheid daarin (vergelijk de bandbreedtes in de voorspellingen van de zeespiegelstijging), is niet te verenigen met deterministische ontwerpen. Klimaatbestendigheid vraagt om een conditionerend ontwerp dat randvoorwaarden schept voor een flexibele adaptatie in de toekomst.

De navolgende hoofdstukken schetsen een beeld van de samenhangende sedimentdynamiek in verschillende deelsystemen van de ZW Delta. Gezamenlijk vormt deze dynamiek de basis voor een conditionerend ontwerp voor een klimaatbestendige inrichting.

### 3 Nederlands kustbeleid: eerste uitwerking van sedimentperspectief

Het kustbeleid zoals dat in 1990 vorm heeft gekregen onder de naam Dynamisch Handhaven, is feitelijk een eerste voorbeeld van een beleidsuitwerking vanuit sedimentperspectief. Het probleem van structurele erosie van de kustlijn wordt (h)erkend als een probleem van sedimenttekort. Deze structurele erosie bedreigt een duurzame handhaving van de veiligheid en van de functies in het duingebied. De oplossing: het suppleren van zand met als doel de kustlijn te handhaven. In 2000 is hier een tweede doelstelling aan toegevoegd: handhaven en verbeteren van het kustfundament. Het jaarlijks suppletievolume wordt daartoe opgevoerd van 6 naar 12 Mm<sup>3</sup> per jaar.

#### 3.1 Systeembegrenzing en suppletieomvang (HOEVEEL?)

De omvang van het suppletievolume is afgestemd op het jaargemiddelde tekort dat optreedt in het actieve kuststelsel. Als zeewaartse grens van het actieve kuststelsel is gekozen voor de -20 m dieptelijn<sup>1</sup>; de diepte waar, gezien op een tijdschaal van 50 – 200 jaar, bij benadering geen zanduitwisseling meer plaatsvindt tussen zeebodem en kuststelsel. De landwaartse grens is de binnenduinrand; opnieuw de plek waar zanduitwisseling met het aangrenzende deelsysteem (in dit geval Laag Nederland) gelijk nul is. Als zuidelijke resp. noordelijke grens is om pragmatische redenen gekozen voor de grenzen met België en Duitsland.

Op grond van de overwegingen gegeven in par. 2.1, Figuur 2.2, is het jaargemiddelde tekort in het actieve kuststelsel als gevolg van zeespiegelstijging: 7 Mm<sup>3</sup> per mm stijging per jaar.

Een jaargemiddeld suppletievolume van 12 Mm<sup>3</sup> is dus voldoende om mee te groeien met een zeespiegelstijging van 1.8 mm/jaar.

Gaan we uit van een zeespiegelstijgsnelheid van 2 mm/jaar, dan stijgt het benodigde suppletievolume evenredig naar 14 Mm<sup>3</sup>/jaar.

Recent is echter vastgesteld dat zandwinning<sup>2</sup>, vaargeulonderhoud en bodemdaling door gaswinning nog eens een jaarlijks tekort in het actieve kuststelsel creëren van ca. 3,5 Mm<sup>3</sup> (de Ronde, 2008). Dat brengt de totale hoeveelheid suppletiezand om het gehele actieve kuststelsel op peil te houden op zo'n 17,5 Mm<sup>3</sup> per jaar.

Dan is belangrijk dat er binnen het actieve kuststelsel nog een aanzienlijk interne herverdeling van sediment plaats heeft: als na-ijlend gevolg van de afsluiting van Zuiderzee en Lauwerszee wordt op jaarbasis gemiddeld 3 Mm<sup>3</sup> zand uit het kustfundament onttrokken door de Waddenzee.

Omdat de beleidsdoelstelling betrekking heeft op het handhaven van het kustfundament, en niet op handhaving van het kuststelsel, dient strikt genomen ook deze verliespost voor het kustfundament te worden aangevuld. Voor handhaving van het kustfundament betekent dit bij een zeespiegelstijging van 2 mm/jaar, de noodzaak voor een jaargemiddeld suppletievolume van totaal 20 Mm<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> In de Nota Ruimte (2006) is deze gedefinieerd als de 'doorgetrokken 20m dieptelijn'; een modificatie van de fysieke 20 m dieptelijn.

<sup>2</sup> Het huidige beleid is er op gericht om met ingang van 2013 alle zandwinning binnen het actieve kuststelsel te stoppen.

### 3.2 Suppletieverdeling (WIE, WANNEER, WAAR en HOE)

Bij een integrale benadering zou de vraag over de verdeling van het suppletiezand aan de orde komen in een afweging van de verschillende functies.

In de huidige uitvoeringspraktijk is daarvan in beperkte mate sprake. Dat komt tot uiting wanneer we bekijken hoe invulling is en wordt gegeven aan de beantwoording van de vragen WIE, WANNEER, WAAR en HOE.

#### 3.2.1 Wie?

Naast het suppletiebeleid (gericht op *duurzame* handhaving van veiligheid en functies) kennen we een afzonderlijk, sectoraal waterveiligheidsbeleid (gericht op het handhaven van de *momentane* veiligheid); het eerstgenoemde richt zich op de middellange en lange termijn, het laatstgenoemde op de korte termijn. De benaderingen op deze twee schalen zouden beter geïntegreerd kunnen worden. Suppletiezand dat beschikbaar is voor het meegroeiën met de zeespiegel kan dan optimaler worden ingezet voor de korte termijn.

#### 3.2.2 Wanneer?

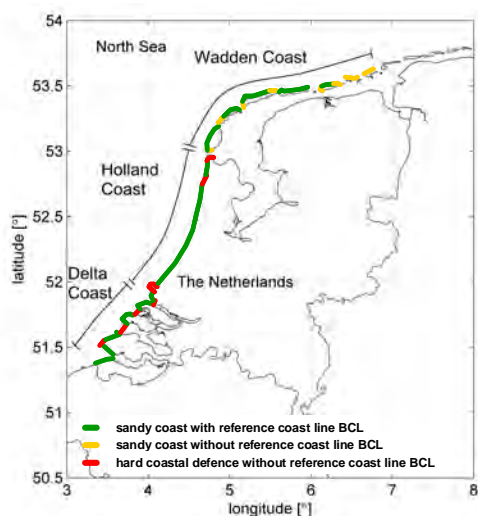
Om praktische (budgettaire en begrotingstechnische) redenen is de opdracht voor het uitvoeren van het kustonderhoud vastgelegd in een SLA van 12 Mm<sup>3</sup> per jaar. De flexibele verdeling van suppletiezand in de tijd wordt hierdoor bemoeilijkt.

#### 3.2.3 Waar?

Bij de verdeling in de ruimte wordt als primaire maatstaf gebruikt de overschrijding van de BasisKustLijn BKL. Omdat niet overal een BKL is gedefinieerd (Figuur 3.1) leidt dit tot een scheve verdeling.

Het strategische doel waarop handhaving van de BasisKustLijn zich richt, is het duurzaam handhaven van veiligheid en functies in het duingebied<sup>3</sup>. Impliciet is de toedeling van zand aan verschillende functies daarmee vervat in de definitie en de handhaving van de BKL.

Een duidelijke verdelingsmaatstaf over de deelsystemen van het kustfundament ontbreekt. De zandtekorten in de verschillende deelsystemen Wadden, Holland en Delta zijn als gevolg hiervan in het verleden niet evenredig gecompenseerd.



Figuur 3.1 Definitie van BKL langs de Nederlandse kust

<sup>3</sup> NB Dit is de doelformulering volgens de eerste Kustnota. 1990. In de praktijk wordt "duingebied" ruim geïnterpreteerd: het betreft alle functies in het duingebied, dus naast natuur, recreatie en drinkwaterwinning, evenzeer beheer in kustplaatsen.

### 3.2.4 Hoe?

Bij de uitvoering van suppleties wordt sinds het einde van de jaren negentig als vuistregel gebruikt; “waar het moet op het strand, waar het kan onder water”. Dit heeft in de praktijk geleid tot een groot aandeel van onderwatersuppleties. Omdat de vorm waarin suppleties worden uitgevoerd in belangrijke mate bepalend is voor het korte termijn effect op functies, valt er vanuit integrale optiek winst te behalen door bij de keuze voor de suppletievorm hiermee expliciet rekening te houden. Een kritische beschouwing over de mogelijke baten, afgezet tegen de kosten van onderwater suppleren (goedkoper per m<sup>3</sup>, maar extra m<sup>3</sup> nodig) of op het strand (duurder per m<sup>3</sup>, maar minder m<sup>3</sup> nodig), is hier op zijn plaats.

Een ander aspect van huidig beleid en uitvoeringspraktijk vormt het feit dat voor de kunstmatige verdeling van suppletiezanden (vrijwel) alleen gebruik kan worden gemaakt van zand dat wordt gewonnen buiten het kustfundament. Voor de aanvulling van de tekorten als gevolg van zeespiegelstijging is dat begrijpelijk. Vanuit het oogpunt van de belangen van verschillende functies, is het echter de vraag in hoeverre kunstmatige herverdeling van zand afkomstig van binnen het kustfundament – winnen en storten van zand binnen het kustfundament – kan bijdragen aan optimalisatie van die functies.

### 3.3 Klimaatbestendige inrichting

Een klimaatbestendige inrichting is gebaat bij een integrale afweging van functies. Een aanpak die uitgaat van een sedimentperspectief op de kustzone biedt die mogelijkheid door dit centraal te stellen bij de verdeling van het sediment dat nodig is om mee te groeien met de zeespiegel. Om aansluiting te vinden bij het huidige kustbeleid is het gewenst dat de daarin gangbare verdeelsleutels kritisch worden beschouwd.



## 4 Sedimentbalans ZW Delta

*Naar: Gulzige geulen, slinkende slikken, Mulder en van Heeteren, 2009*

Allereerst beschouwen we het ZW Deltagebied in zijn totaliteit: het hele gebied tussen de -20 m dieptelijn in het Westen en de Brabantse hoge gronden in het Oosten, en tussen de grens met België in het Zuiden en de Nieuwe Waterweg in het Noorden.

Bij deze grote ruimteschaal past een beschouwing op een grote tijdschaal: de lange-termijn ontwikkeling van het ZW Deltagebied als geheel, wordt in hoofdzaak gestuurd door de relatieve zeespiegelstijging. De vraag is dan: hoe beïnvloedt deze stijging de vraag en het aanbod van sediment?



De sedimentvraag neemt toe met de relatieve stijging van de waterspiegel: de potentiële extra bergingsruimte voor sediment. Binnen de huidige configuratie van zeeweringen in de ZW Delta moeten we dan onderscheid maken tussen:

- *Actieve*, potentiële bergingsruimte in gebieden waar actief marien sedimenttransport mogelijk is; i.e het buitendijkse gebied van Westerschelde en de Voordelta; en
- *Passieve*, potentiële bergingsruimte in gebieden waar geen actief marien sedimenttransport meer mogelijk is, maar welke wel gelegen zijn onder zeeniveau; i.e de afgedamde zeegaten<sup>4</sup> en het bedijkte poldergebied.

<sup>4</sup> Belangrijk hierbij is te beseffen dat binnen de afgedamde zeegaten zelf wel degelijk een actieve sedimentvraag aanwezig is; denk aan de zandhonger van de Oosterschelde. Deze uit zich echter alleen binnen het bekken zelf en niet op het niveau van het ZW delta systeem als geheel. Op hoger niveau is de actieve sedimentvraag binnen de bekkens, dan ook passief.

De *passieve* sedimentvraag binnen de Zw Delta als geheel, wordt bij de huidige zeespiegelstijging geschat op 5,5 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. De *actieve* sedimentvraag als gevolg van zeespiegelstijging is in de huidige situatie naar schatting 3 miljoen m<sup>3</sup> per jaar.

Zandwinning, kan de actieve sedimentvraag nog vergroten. Tot 2014 is er nog zandwinning in de Westerschelde, waarbij in de periode 2011-2014 totaal 4.000.000 m<sup>3</sup> voor de handel, 900.000 m<sup>3</sup> voor de Nederlandse Overheid en 900.000 m<sup>3</sup> voor de Vlaamse Overheid zal worden onttrokken. Na 2014 vindt er alleen nog zandwinning plaats in de Belgische Zeeschelde met een omvang van naar schatting 1 Mm<sup>3</sup> per jaar.

Het sedimentaanbod van buiten het aandachtsgebied aan gebieden met een *passieve* sedimentvraag, is voor de afgedamde bekkens in de huidige configuratie, beperkt tot mogelijke sedimentaanvoer door rivieren (hoofdzakelijk via het Hollandsch Diep), en door de mens (storten van baggerspecie van buiten het gebied en ophogen van bouwterreinen). Vooral het laatste is van belang en bedraagt gemiddeld enkele miljoenen m<sup>3</sup> per jaar<sup>5</sup>; de bijdrage vanuit de rivieren aan het Hollandsch Diep blijkt op zijn hoogst jaarlijks zo'n 300.000 m<sup>3</sup> zand en 1 miljoen m<sup>3</sup> slib te zijn ( zie H.7).

Per definitie is er geen koppeling tussen het *sedimentaanbod* in de Voordelta en de *passieve* sedimentvraag in de afgedamde bekkens Grevelingen, Haringvliet, Hollandsch Diep en Volkerak. Ook de stormvloedkering in de Oosterschelde blijkt een effectieve barrière voor sediment, zodat vanuit het perspectief van de sedimenthuishouding de Oosterschelde een 'afgedamd bekken' is. Voor toekomstplannen in de zuidwestelijke Delta is het voor de sedimentvraag belangrijk om te weten in hoeverre deze plannen actief verbinding leggen (geredeneerd vanuit het sediment en niet alleen vanuit het water) tussen de afgedamde bekkens en de Voordelta. Een actieve verbinding van bekken naar Voordelta betekent namelijk dat de *passieve* potentiële bergingsruimte in deze bekkens verandert in een *actieve* potentiële bergingsruimte.

Voor het sedimentaanbod aan gebieden met een *actieve* sedimentvraag ( te weten de Voordelta en Westerschelde) is de natuurlijke sedimentaanvoer vanuit rivieren (Haringvliet, Schelde) verwaarloosbaar (zie ook H. 7). Potentieel wel van belang is de sedimentuitwisseling langs de kust met enerzijds het Belgische deel en anderzijds de Maasgeul. Bij een netto noordwaarts zandtransport langs de kust, wordt vooralsnog aangenomen dat beide transportfluxen elkaar opheffen. De natuurlijke aanvoer van sediment vanaf de zeebodem (over de 20 m dieptelijn) is gedaald tot een verwaarloosbaar niveau. Tegenover een natuurlijk sedimentaanbod dat netto gelijk is aan nul, staat sinds 1990 een menselijke aanvoer van gemiddeld zo'n 2,5 miljoen m<sup>3</sup> suppletiezand per jaar.

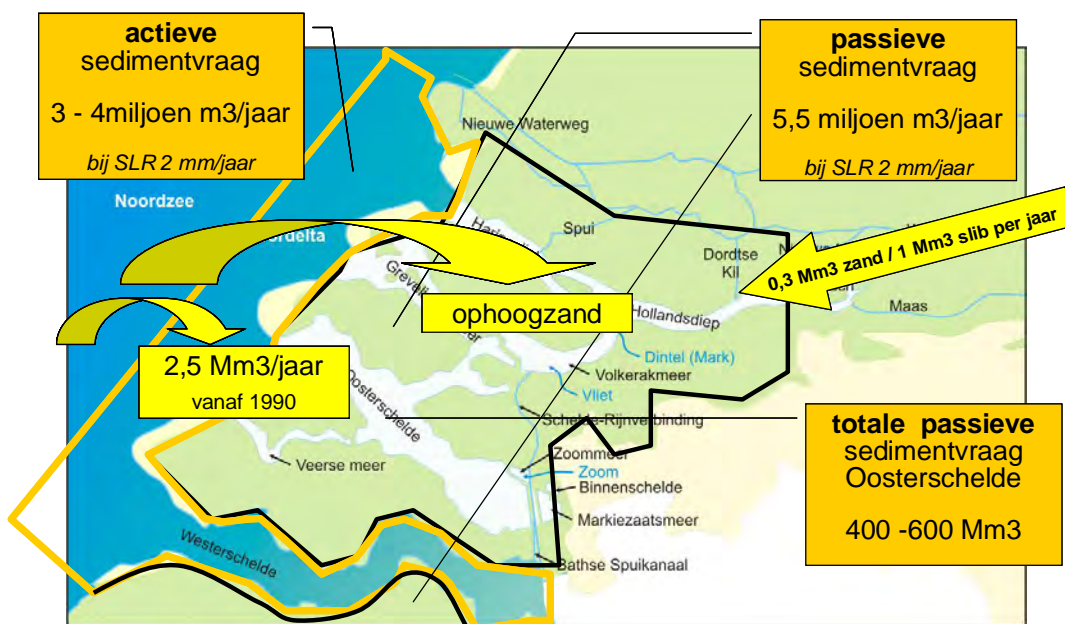
Samenvattend (zie Figuur 4.1): het natuurlijke *sedimentaanbod* in gebieden met een *actieve* sedimentvraag (Voordelta en Westerschelde) is in de huidige situatie gelijk aan nul. Gevoegd bij een jaarlijkse sedimentvraag van 3 Mm<sup>3</sup> door de huidige zeespiegelstijging en (vanaf 2014) nog eens 1 Mm<sup>3</sup> door zandwinning, betekent dit dat het actieve deel van het ZW Deltagebied als geheel zand verliest. Op de lange termijn zouden hierdoor – zonder menselijk ingrijpen – de functies van het gehele gebied worden ondermijnd. Om dit tegen te gaan, zijn zandsuppleties nodig met een omvang die minimaal gelijk is aan het optredende tekort op de zandbalans. Gegeven een totale sedimentvraag van 3-4 Mm<sup>3</sup> per jaar, lijkt een

---

<sup>5</sup> Het gebruik aan ophoogzand varieert in de tijd afhankelijk van de omvang en het aantal bouwprojecten. In de periode 2001-2002, een tijd met een relatief grote bouwactiviteit, bedroeg de netto import van ophoogzand zo'n 5 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. (Dumoulin, 2004).

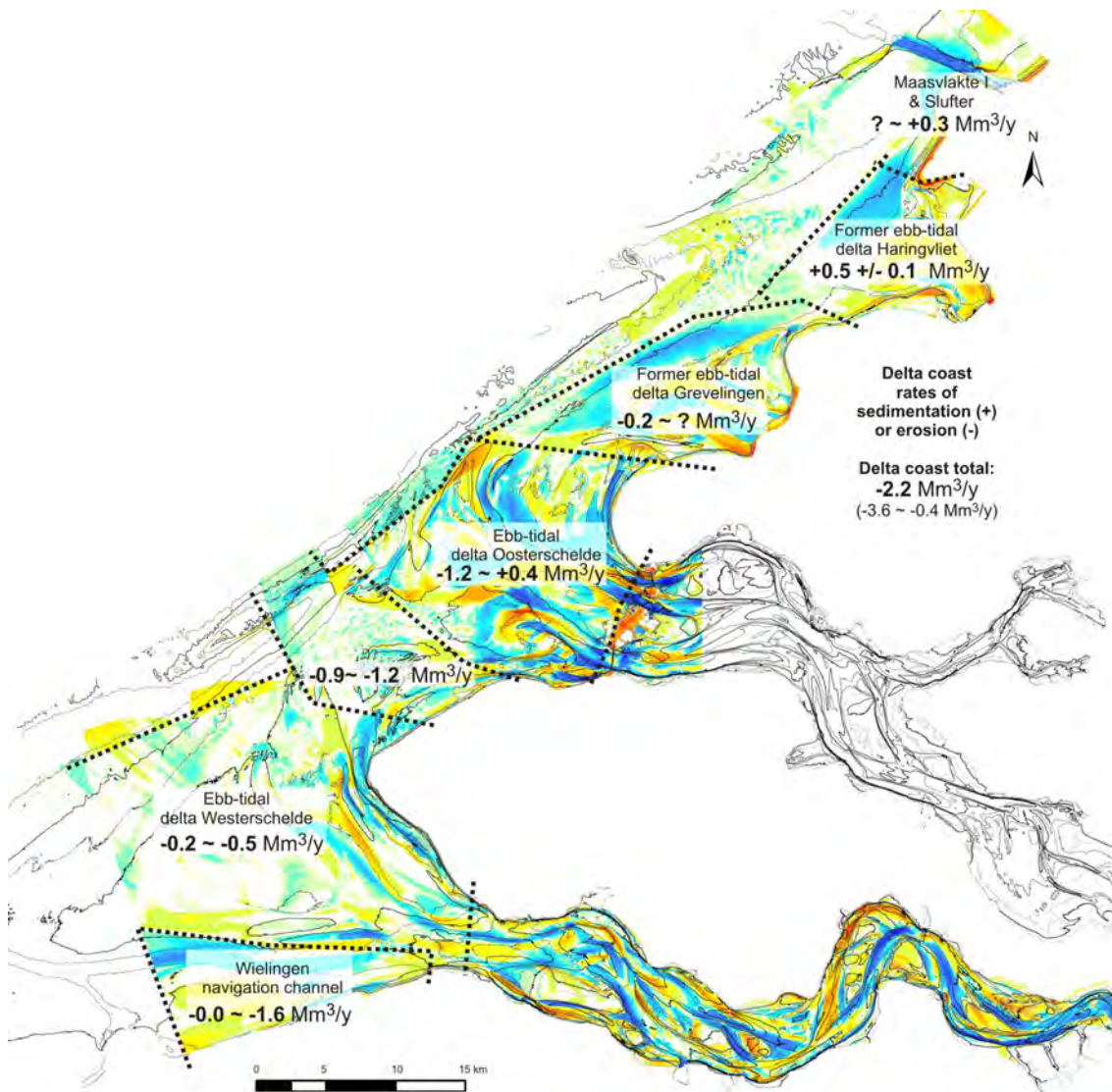
jaargemiddelde suppletie inspanning van  $2,5 \text{ Mm}^3$  per jaar – zoals uitgevoerd vanaf 1990 – onvoldoende om alle tekorten aan te vullen.

Ook in gebieden met een *passieve* sedimentvraag (de afgedamde zeegaten en het poldergebied) veroorzaakt relatieve zeespiegelstijging een negatieve sedimentbalans. Het functieverlies dat hiervan het gevolg is, kan (in theorie) fundamenteel worden opgelost door het verkleinen van de *passieve* sedimentvraag door de kunstmatige aanvoer van zand. Uitgedrukt in volume, levert een jaarlijkse aanvoer van ophoogzand van enkele miljoenen  $\text{m}^3$  per jaar hier al een redelijke bijdrage. Echter, deze toepassing gebeurt zeer lokaal en vrijwel alleen uit bouwkundige overwegingen. Vanuit waterkeringbeheer wordt het functieverlies als gevolg van een cumulatief, oplopende *passieve* sedimentvraag, primair vanuit de traditie tegengegaan door het versterken van de waterkering. Doordat bij deze aanpak de bodem van het achterland niet kan meegroeien met de zeespiegel, zullen de omvang en het belang van de waterkeringen evenredig toenemen met de groei van de *passieve* sedimentvraag. In aanvulling op het waterkeringbeheer kan een strategie die de *passieve* sedimentvraag gericht en geleidelijk terugdringt, wellicht een nuttige bijdrage leveren aan een duurzame Delta.



Figuur 4.1 Sedimentbalans van de ZW Delta, met op systeem niveau te onderscheiden actieve en passieve sedimentvraag.

NB: De sedimentvraag binnen de afgesloten bekkens, welke op het niveau van het ZW Delta systeem *passief* is, manifesteert zich binnen die bekkens zelf wel degelijk als *actief*.



**Figuur 4.2** Samenvatting van de zandbalansen over de periode van 1976/1980 tot en met 2004 van de Voordelta en de Westerschelde (uit Cleveringa, 2008)  
Een beeld van de interne herverdeling van het sediment binnen het actieve kuststelsel.

## 5 Voordelta en Westerscheldemonding

### 5.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk staat de sedimentbalans van de Zuidwestelijke Delta centraal. In dat hoofdstuk is impliciet iets opgenomen over de samenhang die er bestaat tussen de morfodynamiek van de Voordelta en de monding van Westerschelde enerzijds, en de aangrenzende bekkens anderzijds. Die samenhang zit verborgen in het karakter van de sedimentvraag: actief voor de Westerschelde, die ongehinderd sediment kan uitwisselen met de monding en passief voor de afgedamde bekkens, inclusief de Oosterschelde en het Haringvliet, die geen sediment (meer) uitwisselen met de Voordelta. Over deze samenhang, tussen bekkens, Voordelta en monding, die tot uiting komt in uitwisseling (par. 5.2) en een interne herverdeling van sediment (par. 5.3), gaat dit hoofdstuk. Het legt daarmee ook de basis voor het begrip van de invloed van ingrepen in en rond de bekkens op de Voordelta (par. 5.4).

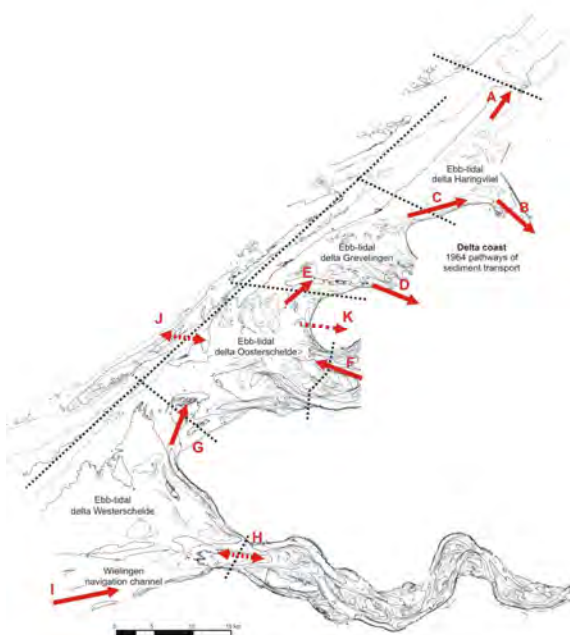
Eerst kort iets over namen. In de voorliggende notitie is tot nu tot gesproken over bekkens. Dat is een verzamelen begrip dat wordt gebruikt om zowel de getijdebekken Wester- en Oosterschelde te duiden, als de van de Noordzee afgedamde bekkens Grevelingen, Krammer-Volkerak en Haringvliet. In de context van de zuidwestelijke delta wordt ook vaak gesproken over zeearmen en over estuaria. Zeearm is het equivalent van getijdebekken. Estuarium is gereserveerd voor bekkens (zeearmen) waarin de aanvoer van zoetwater vanuit een of meerdere rivieren een merkbare invloed heeft op de saliniteit (overgang van zoetwater – brakwater - zoutwater) en de stroming (optreden van estuariene circulatie). De Westerschelde is een estuarium, de Oosterschelde niet. Overigens vormen ook de Nieuwe Waterweg en de achterliggende wateren een estuarium. Het woord ‘bekkens’ wordt gebruikt omdat door alle menselijke ingrepen (en ook de natuurlijke historische ontwikkelingen) het karakter van de verschillende waterlichamen in de loop van de tijd veranderd is.

### 5.2 Sedimentuitwisseling en –balans van deelsystemen

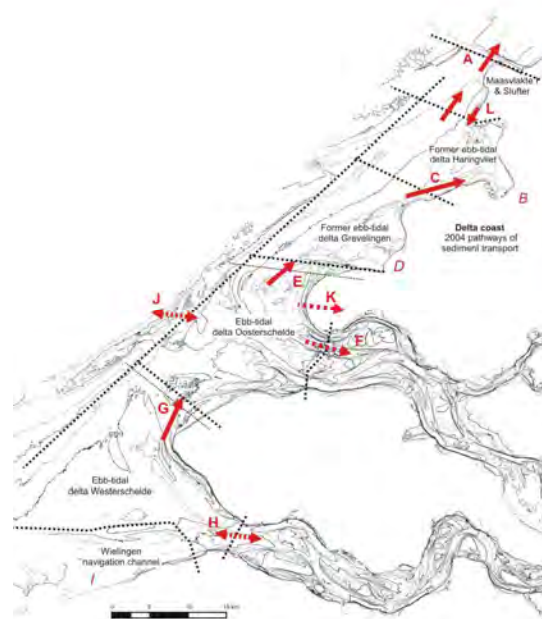
De Voordelta is het zeegebied ten westen van de Zeeuwse en Zuid-Hollandse Delta, dat wordt gekenmerkt door de afwisseling van geulen en ondiepten. De grote geomorfologische eenheden in de Voordelta zijn van noord naar zuid: de Haringvlietmondning, de Grevelingenmondning en de Oosterscheldemonding. De monding van de Westerschelde is qua geomorfologische en hydrodynamische eigenschappen goed vergelijkbaar met de Voordelta en vormt samen met de Voordelta een aaneengesloten geheel. De kenmerkende patronen van geulen en ondieptes van het gebied zijn direct gekoppeld aan de (voormalige) bekkens van de Zeeuwse en Zuid-Hollandse Delta. De grote geulen van de Oosterschelde en Westerschelde zijn nog steeds verbonden met de geulen op de Voordelta en de Westerscheldemonding. De geulen zeewaarts van de Grevelingen en Haringvliet waren voor de afsluiting verbonden met de geulen in deze zeearmen. Deze grote geomorfologische eenheden kunnen worden opgevat als (voormalige) buitendelta's van de (afgesloten) bekkens (Kohsiek en Mulder, 1988). Ze zijn vergelijkbaar met de buitendelta's die voor de zeegaten van de Waddenzee liggen (zie bijvoorbeeld Steijn, 1991).

Voor de voltooiing van de Deltawerken stonden alle bekkens van de Zuidwestelijke Delta in verbinding met hun buitendelta's. Ieder getij stroomde met vloed water met sediment naar de bekkens en stroomde bij eb met sediment naar de Noordzee. De uitwisseling van sediment tussen Voordelta en kust met de bekkens kon (grotendeels, omdat voor 1964 al enkele afsluitingen hebben plaatsgevonden) vrij plaatsvinden. Deze situatie is getekend in Figuur

12.A. De richting van de pijlen geeft een indicatie voor het netto transport, dat van de Voordelta naar de bekkens Haringvliet (B) en Grevelingen (D) is gericht en van de Oosterschelde naar de Voordelta (F). De uitwisseling van sediment van de Westerscheldemonding naar het Westerscheldebekken (H) was (en is) variabel, of dermate klein dat de richting niet onomstotelijk vastgesteld kan worden.



Figuur 5.1 Sedimentuitwisseling voor 1964  
Uit Cleveringa, 2006



Figuur 5.2 Sedimentuitwisseling in 2004

De situatie in 2004 (Figuur 5.1) komt wat betreft de uitwisseling van sediment met de bekkens overeen met de situatie na de bouw van de stormvloedkering in de Oosterschelde. Het Haringvliet (B) en de Grevelingen (D) zijn effectief gesloten voor de uitwisseling van sediment. Bij de Oosterschelde staat er een gestippelde pijl (F) die naar binnen is gericht, maar de grootte van het sedimenttransport is waarschijnlijk niet meer dan  $1\text{Mm}^3$  per jaar en beperkt zich tot slib, waarover meer in het hoofdstuk over de Oosterschelde (H.8). Effectief betekent dit dat de uitwisseling van sediment tussen Voordelta en Oosterschelde tegenwoordig niet meer meetelt voor de sedimenthuishouding van de Voordelta. Daarmee is alleen de Westerscheldemonding nog over, waar vrije uitwisseling van sediment kan plaatsvinden.

Bovenstaande gaat allemaal over de uitwisseling van sediment tussen Voordelta, Westerscheldemonding en bekkens. Zonder in details (en discussies) te treden, kan op hoofdlijnen worden gesteld dat het getij dat de bekkens in- en uitstroomt voor het transport van zand en slib zorgt. Naast de invloed van het getij op de uitwisseling van sediment en daarmee op de sedimentbalans, heeft het getij ook invloed op de interne herverdeling van sediment en daarmee op de vorm van de Voordelta. Die vorm en de veranderingen daarin worden hieronder besproken.

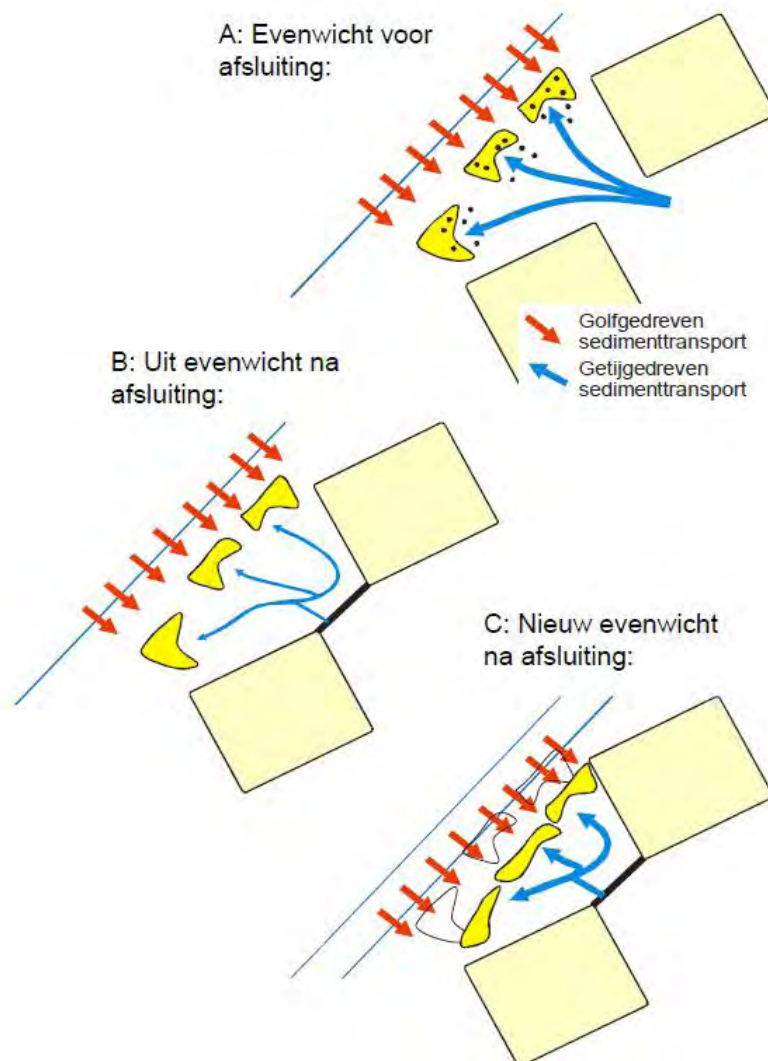
### 5.3 Interne sedimentherverdeling en vormveranderingen

De vorm van de bodem (morfologie) van de Voordelta en de veranderingen (dynamiek) daarin als gevolg van interne herverdeling van sediment, zijn tenminste zo bepalend voor de

functies en het gebruik van het gebied als sedimentvoorraad. De kenmerkende geomorfologie van de (voormalige) buitendelta's op de Voordelta en de (afgedamde) bekkens wordt in stand gehouden door een aantal morfodynamische mechanismen, die hieronder worden beschreven. Het begrip van deze mechanismen is gegroeid door de ontwikkelingen tijdens en na de uitvoering van de Deltawerken in detail te volgen. De afdammingen van de bekkens Grevelingen en Haringvliet hebben namelijk geleid tot grote veranderingen van de Voordelta. Bij de dynamiek wordt stilgestaan omdat bij ingrepen in de Zuidwestelijke Delta, via deze mechanismen mogelijk veranderingen in gang worden gezet.

De getijdestroming in en uit de bekkens transporteert zand van en naar de buitendelta. Het zand dat met de ebstroom vanuit de getijgeulen naar de monding wordt getransporteerd sedimenteert daar, omdat de stroomsnelheden afnemen.

Golfgedreven sedimenttransport vindt plaats langs de kustlijn die de buitendelta begrenst en op de ondiepten van de buitendelta. De richting van de golfgedreven sedimenttransporten is afhankelijk van de richting van de golven. In het algemeen zijn de transportrichting op de ondiepten van de Voordelta naar het land gericht (Steetzel en Stive, 1986).

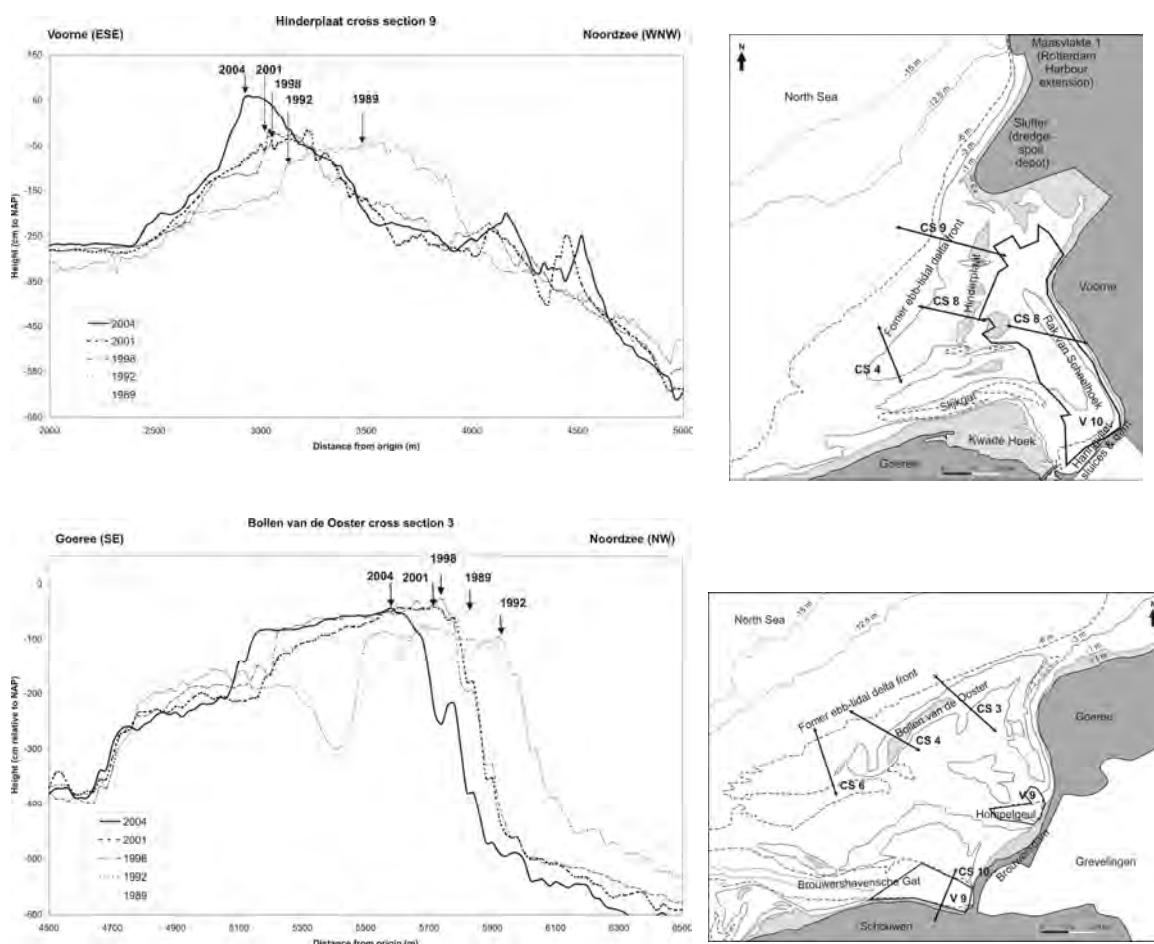


Figuur 5.3 Principeschets van veranderingen op de Voordelta als gevolg van afsluitingen uit Cleveringa, 2006

Op de Voordelta is er een dynamisch evenwicht tussen de landgerichte golfgedreven sedimenttransporten en de zeewaarts gerichte eb-gedreven sedimenttransporten (Figuur

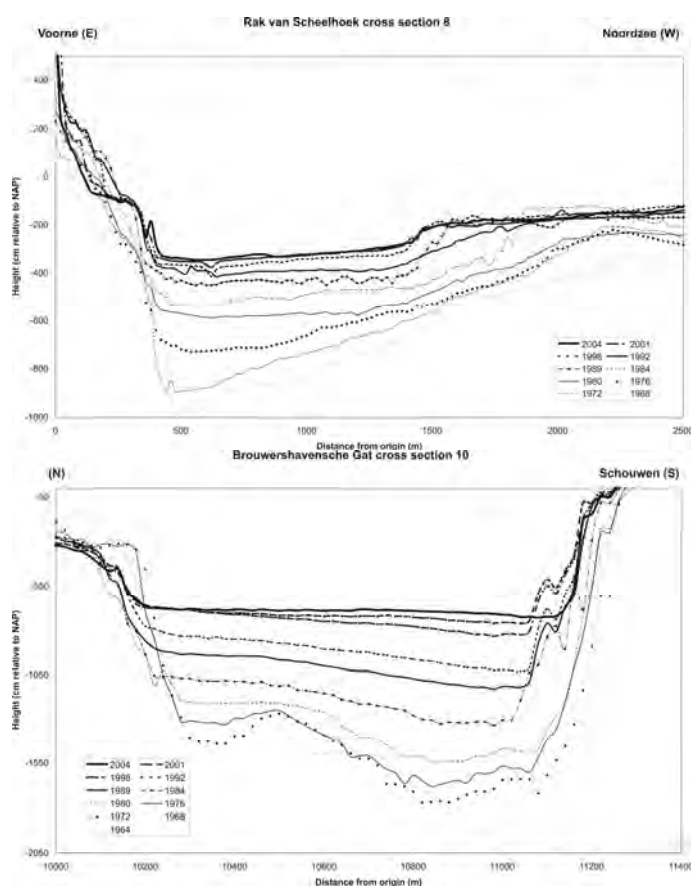
5.3A). Verstoring van deze balans, zoals door de beperking van de getijdestroming bij de afsluiting van een zeearm, leidt tot een verandering van het dynamisch evenwicht. Het golfgedreven landwaarts gerichte sedimenttransport wordt niet meer gecompenseerd door het zeewaartse gerichte transport, zodat netto sedimenttransport naar de kust plaatsvindt. De buitendelta schuift door dit mechanisme als het ware naar binnen (Figuur 5.3B). Wanneer in de monding een veel kleinere getijdekom ontstaat met de bijbehorende getijdestroming, kan een nieuw evenwicht ontstaan tussen de landgerichte golfgedreven sedimenttransporten en de zeewaarts gerichte getijgedreven sedimenttransportprocessen (Figuur 5.3C).

Na de sluiting van het Haringvliet en de Grevelingen erodeerde de vooroever tussen 1970 en 1978 onder invloed van de relatief toegenomen golfwerking. Tegelijkertijd ontstonden in de dieptezone tussen NAP -9 en -4 m zandbanken. Deze zandbanken ontstonden vooral langs de noordrand van de buitendelta's en groeiden in hoogte van circa NAP -3,5 tot -0,5 m. De zandbanken verplaatsten landwaarts met een afnemende snelheid van honderden meters per jaar in 1971 tot slechts tientallen meters per jaar in 1978 (Postma e.a., 1990b). In de periode daarna is de locatie van de banken min of meer gestabiliseerd. In de onderstaande figuren worden voorbeelden getoond van dergelijke ontwikkelingen.



Figuur 5.4 Dwarsdoorsneden van de landwaarts migrerende zandbanken Hinderplaat in de monding van het Haringvliet (boven – CS 9) en de Bollen van de Ooster in de monding van de Grevelingen (onder – CS3). Locaties van de dwarsdoorsneden in de kaartjes.

Een andere verandering op de Voordelta die het gevolg is geweest van de afdamming van het Haringvliet en de Grevelingen is het afnemen van de grootte (juister de doorstroomoppervlaktes) van de getijdegeulen in de mondingsgebieden. De doorstroomoppervlakte van getijdegeulen is direct gerelateerd aan het watervolume dat er ieder getij doorheen stroomt en door de afdammingen is het watervolume dat door de geulen stroomt afgenomen. Deze afname is zeer duidelijk zichtbaar in de zogenaamde verlaten geulen ("abandoned channels") Rak van Scheelhoek (Haringvlietmonding) en Brouwershavensche Gat (Monding van de Grevelingen). In de onderstaande figuren is zichtbaar dat deze geulen geleidelijk maar gestaag worden opgevuld met (voornamelijk fijn) sediment. Andere geulen zijn kleiner geworden en zelfs verdwenen door de verplaatsing van de platen en banken naar de locatie van de geulen.



Figuur 5.5 Dwarsdoorsneden van de met sediment opgevulde geulen (abandoned channels) Rak van Scheelhoek in de monding van het Haringvliet (boven – CS 8) en het Brouwershavensche gat in de monding van de Grevelingen (onder –CS10). Locaties van de dwarsdoorsneden in de kaartjes bij figuur 14.

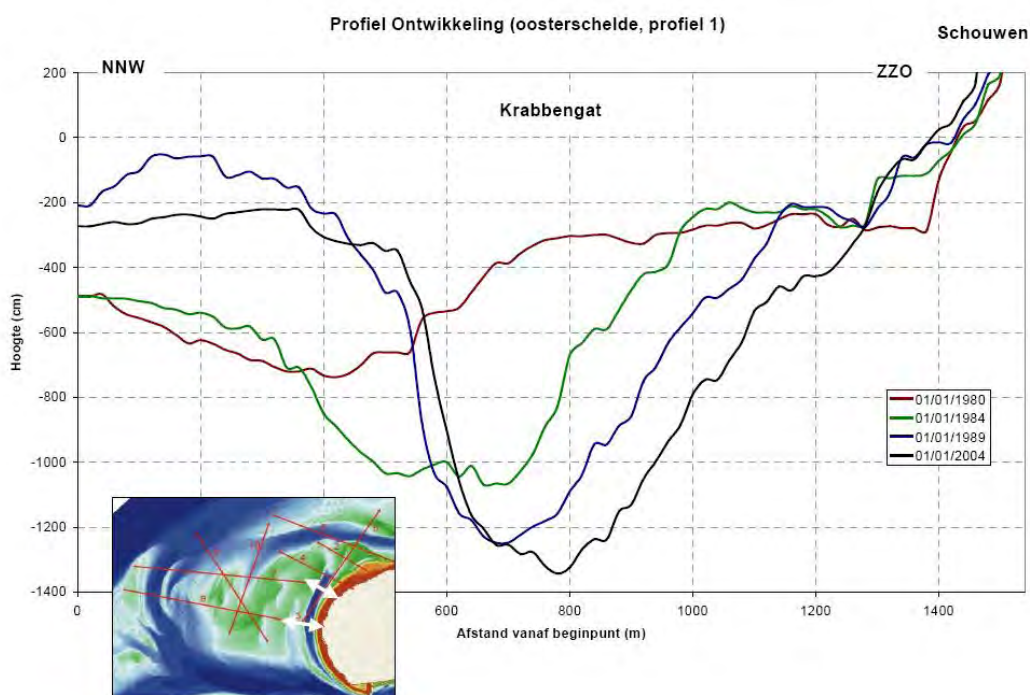
De gecombineerde morfologische veranderingen na de afsluiting van het Haringvliet en de Grevelingen hebben er toe geleid dat de buitendelta's als het ware naar binnen zijn geschoven, een verandering die is omschreven als het 'opkruien' van de buitendelta (Snijders en Walburg, 1998).

In de Oosterscheldemonding is nog steeds sprake van een dynamisch evenwicht en heeft geen 'opkruien' plaatsgevonden. Dat is het directe gevolg van de afdamming met de stormvloedkering, waardoor op de buitendelta nog steeds getijstroming naar en van het

bekken plaatsvindt. Bij de Oosterschelde is voorafgaand aan de aanleg van de stormvloedkering zelf sprake geweest van een uitbouw van het monding gebied (Postma, 1990a, de Bok 2001). Voordat de kering is voltooid is in eerste instantie is het getijvolume in het bekken toegenomen, door de werken in het getijdebekken. Het resultaat daarvan was de zeewaartse uitbouw van de buitendelta. Bij de bouw van de stormvloedkering en de compartimenteringwerken in het bekken is het getijvolume afgenomen en is de ontwikkeling omgekeerd, zodat sprake was van een afname van de doorstroomoppervlakte van de getijgeulen. Lokaal zijn bij de stormvloedkering grote verdiepingen ontstaan. Verder heeft de grootschalige verandering van het stroombeeld en de morfologie ten noorden van de monding van de Oosterschelde ertoe geleid dat er een geleidelijk noordwaartse verplaatsing of rotatie plaatsvindt van de gehele Oosterscheldemonding.

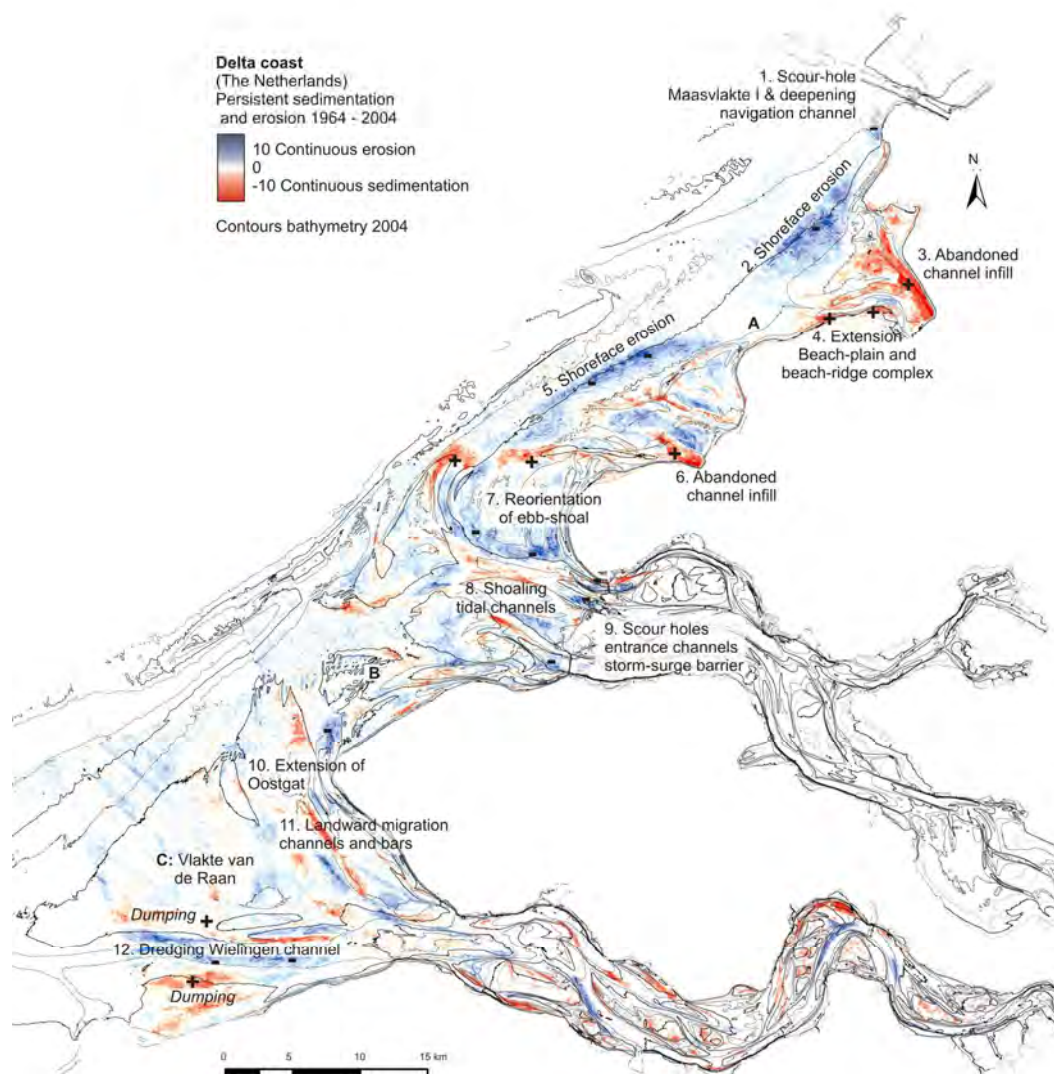
De morfologische veranderingen in de mondingen van de afgedamde bekkens Haringvliet en Grevelingen worden nog steeds gestuurd door de afdammingen. In de mondingen van de Oosterschelde en de Westerschelde vinden morfologische veranderingen plaats die als autonome natuurlijke ontwikkelingen kunnen worden beschouwd. Geulen en zandbanken ontstaan, migreren en verdwijnen onder invloed van de getijstromingen en de golfwerking. In de monding van Oosterschelde vindt zowel deze autonome natuurlijke dynamiek plaats, als de eerder genoemde verplaatsing of rotatie van de monding.

De natuurlijke dynamiek krijgt de aandacht op die momenten en die locaties dat er functies onder druk komen te staan. Dat is bijvoorbeeld het geval als een geul niet of minder bruikbaar wordt voor de scheepvaart, door verondieping of versmalling, of wanneer de kustlijn achteruitgaat, bijvoorbeeld door de landwaartse verplaatsing van een geul. Een bekend voorbeeld van de laatste ontwikkeling is de kust van Zuidwest Walcheren, waar het Oostgat tegen de kust aan ligt (en waar in de afgelopen jaren enkele grote geulwandsuppleties zijn uitgevoerd). Minder bekend, maar geheel vergelijkbaar is de ontwikkeling van het Krabbengat voor de kust van Schouwen, die hieronder is weergegeven.



Figuur 5.6 Dwarsdoorsneden van de getijdegeul Krabbengat uit de periode 1980 tot 2004 waarin de landwaartse verplaatsing en de verdieping van geul zichtbaar is, uit Alkyon (2006),

De morfodynamiek van de Voordelta en de monding van de Westerschelde wordt medebepaald door menselijke ingrepen, zoals al uitgebreid ter sprake is gekomen rond de afdammingen van de bekkens. In Figuur 5.7 wordt een overzicht gepresenteerd van de grootschalige en langjarige veranderingen van de Voordelta en monding van de Westerschelde, op basis van de beschikbare gegevens van de bodemligging.



Figuur 5.7 Overzicht van de persistente<sup>6</sup> erosie (blauw) en sedimentatie (rood) van de Voordelta en de Westerschelde over de periode van 1964 tot en met 2004 (uit Cleveringa, 2008).

<sup>6</sup> Een persistentiekaart wordt gemaakt met een serie sedimentatie- en erosiekaarten van opeenvolgende bodemliggingsopnamen. Per kaart wordt aan ieder punt in het raster met sedimentatie, ongeacht de grootte ervan, de waarde +1 toegekend en aan ieder punt in het raster met erosie, ongeacht de grootte, de waarde -1. Daarna worden voor ieder punt in het grid van alle verkregen kaarten de waarden +1, -1 (en 0) opgeteld (Cleveringa, 2008)

De erosie en sedimentatie in de monding van het Haringvliet en de Grevelingen (2, 3, 4, 5 en 6 in Figuur 5.7) zijn het directe gevolg van de afdamming van deze bekkens. De veranderingen in de monding van de Oosterschelde zijn het gevolg van de aanleg van de stormvloedkering (8 en 9 in Figuur 5.7). De rotatie of de verschuiving naar het noorden (7 in Figuur 5.7) is waarschijnlijk het gecombineerde effect van de aanleg van de stormvloedkering en de afdamming van de Grevelingen.

Er vinden ook natuurlijke veranderingen plaats, zoals de migratie van de geulen en banken voor de zuidwestkust van Walcheren (11 in Figuur 5.7) en veranderingen waarvan niet geheel duidelijk is of deze volledig natuurlijk zijn, of dat er indirect menselijke ingrepen in doorwerken, zoals de verlenging en vergroting van het Oostgat (10 in Figuur 5.7.) En er zijn gebieden op de Voordelta waar vrijwel geen netto veranderingen optreden, namelijk de Vlake van de Raan (C), de begrenzing tussen de mondingen van de Ooster- en Westerschelde (B) en de overgang tussen de mondingen van Haringvliet en Grevelingen (A).

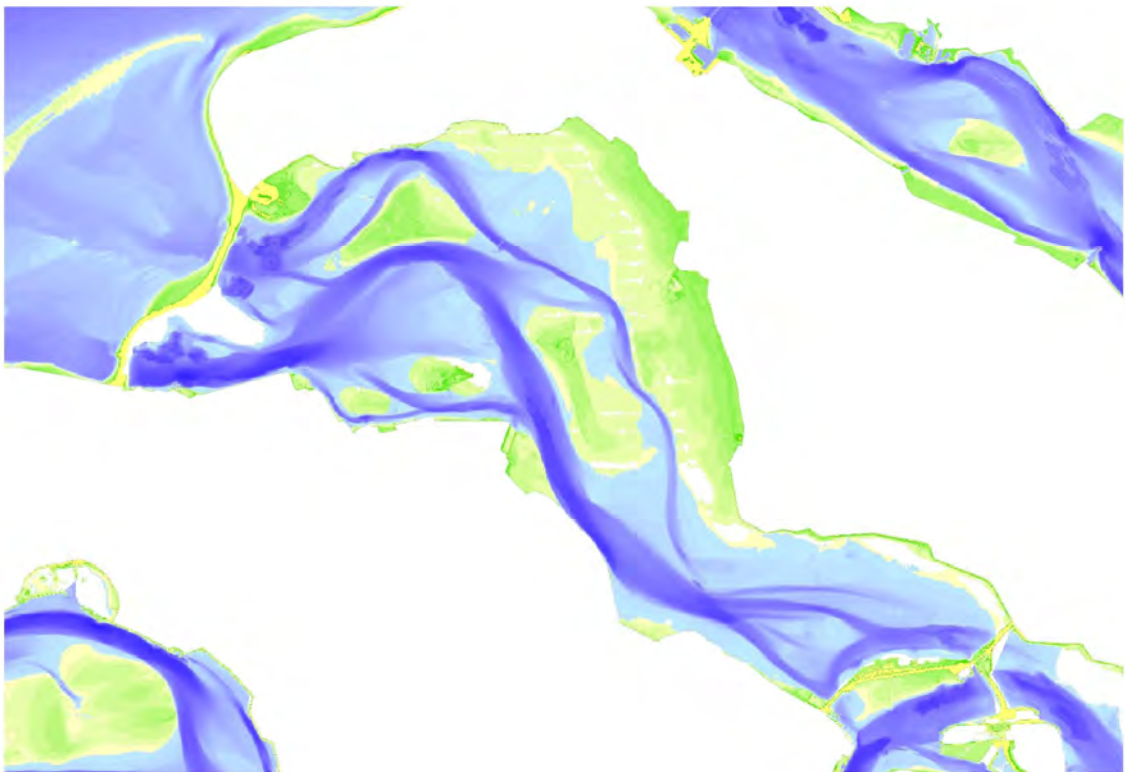
Andere menselijke ingrepen dan de afdammingen, die een grote invloed hebben op de morfodynamiek zijn de aanleg van de Maasvlaktes, Slufter en de Euro-Maasgeul aan de noordzijde (1 in Figuur 5.7) en de zuidzijde de havenuitbreiding van Zeebrugge en het verdiepen van de Wielingen (de toegangsegeul naar de Westerschelde vanaf het zuidwesten 12 in Figuur 5.7). In de huidige situatie wordt de Zuidwestelijke Delta in termen van zandhuishouding begrensd door deze combinaties van uitbouw en vaargeul. Aan deze randen domineren baggeren, storten en het suppleren van sediment de sedimenthuishouding.

## 6 Grevelingen en Volkerak-Zoommeer

### 6.1 Historische ontwikkeling

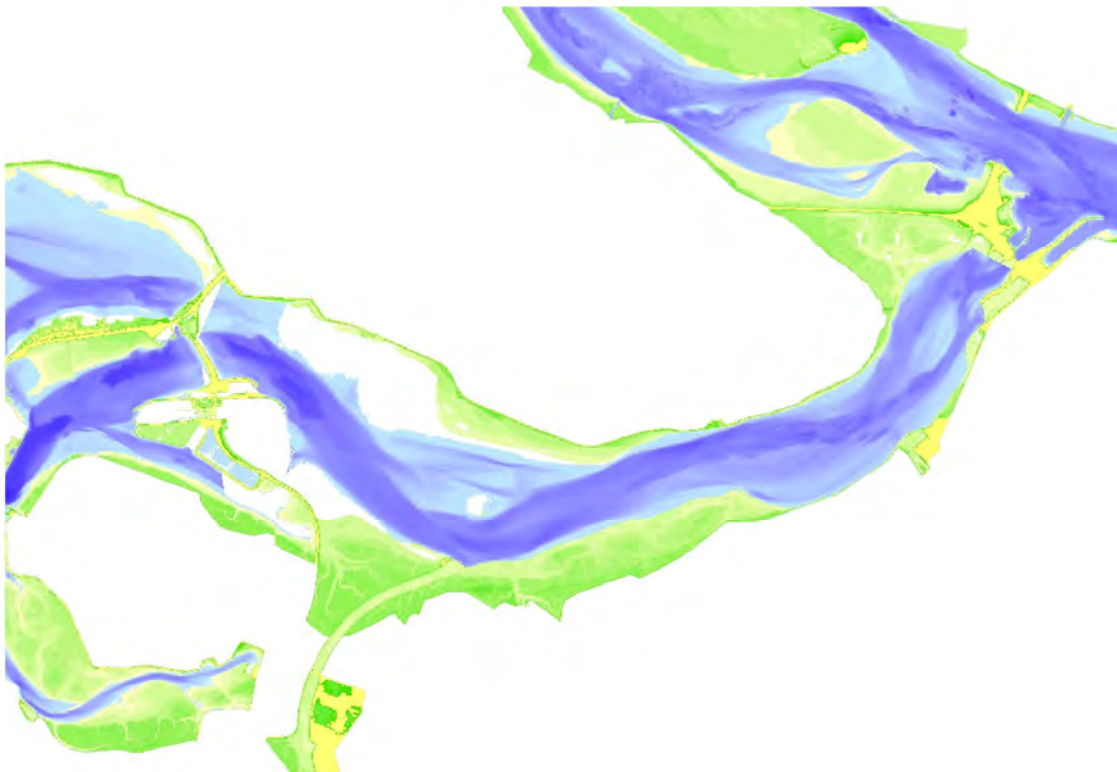
Voor de deltawerken stonden zowel Grevelingen als Krammer-Volkerak in verbinding met de rivieren en met de Noordzee. Zoet water vanuit het Hollandsch Diep stroomde zuidelijk over het Volkerak naar de Grevelingen en naar de Oosterschelde, waartoe in die tijd ook het Zoommeer en de Markiezaatsmeer behoorden. In 1965 werd de Grevelingen afgesloten van het Volkerak en de Oosterschelde door de voltooiing van de Grevelingendam en stopte de zoetwater invoer in de Grevelingen. In 1970 werd het Volkerak afgesloten van het Hollandsch Diep door de Volkerakdam met schut- en spuisluis. In 1972 werd de Brouwersdam aan de Westkant van de Grevelingen gesloten en hiermee was de Grevelingen een rustig zout binnenmeer zonder invloed van getijden geworden. Het Volkerak werd halverwege de jaren 80 pas afgesloten van de Oosterschelde door de Philipsdam en werd vervolgens een zoet binnenmeer met als belangrijkste functies waterberging, scheepvaart en zoetwatervoorziening.

Na de afsluiting verzoette de Grevelingen in rap tempo. Om de verzoeting te stoppen werd in 1978 een spuisluis in de Brouwersdam aangelegd. Begin jaren tachtig werd tevens een hevelsluis in de Grevelingendam gemaakt. Met behulp van beide sluisen kon een constant hoog zoutgehalte (circa 30 ppt saliniteit/17 g/l chloride) gehandhaafd worden. Het Volkerak-Zoommeer werd zoet gehouden. Zo veranderde een dynamisch getijden gebied met een gradiënt van zoet naar zout water in gescheiden gebieden met min of meer vaste waterpeilen; het zoete Volkerak-Zoommeer en het zoute Grevelingenmeer.



De afsluiting met dammen heeft ook grote invloed op sedimenttransport in deze meren. De bekkens zijn afgesneden van invoer van sediment uit rivieren en vanuit de zee en de

waterbeweging binnen de bekkens is gering. Echter, de bekkens bezitten nog hun oude bathymetrie met geulen en ondieptes. Het gebrek aan getij en stroming zet het systeem morfologisch min of meer 'stil', want er is niet genoeg dynamiek in het systeem om zandtransport te bewerkstelligen. Enkel in de ondiepe zone, waar de golven aangrijpen op de bodem, vindt erosie plaats. Hierdoor ontstaan in die zone steilere randen. Het materiaal dat hier erodeert komt in de geulen terecht. De bodem in de diepere delen wordt vaak slibbiger door het uitzakken van kleine sedimentdeeltjes die met meer dynamiek in suspensie blijven.



In de huidige situatie wordt in sommige delen van de Grevelingen de vorming van zand- en schelpenbanken waargenomen. Dit kan gebeuren door zandtransport door de golven die bij een vaste waterstand op een vast punt sediment weghalen (de golf erosieve zone) en op een vast punt hoger op de kust dit sediment weer neerleggen. Een dergelijk verschijnsel wordt ook waargenomen in het IJsselmeer. Dit golftransport is waarschijnlijk windgedreven, gezien de locaties waarop de vorming van de banken plaatsvindt. Dergelijke opbouw lijkt immers niet voor te komen langs de zuidoevers van het meer. Naast dat de wind hier minder vaak direct op staat, is er ook minder vaak een ondiep voorland aanwezig. Daarnaast lijkt het transport ook gerelateerd te zijn aan de aanwezigheid van vooroeversbeschermingen, waarachter deze vorming plaats vindt. De vooroeversbescherming zorgt dat het ondiepe voorland niet door erosie naar de geul verdwijnt en wordt behouden.

## 6.2 Toekomstige ontwikkelingen

Recent wordt gesproken van het terugbrengen van een gedempt getij in de Grevelingen door een groot doorlaatmiddel in de Brouwersdam. Daarnaast wordt verkend om het Volkerak-Zoommeer weer te verbinden met zowel de Grevelingen (MIRT verkenning Grevelingen) als met de Oosterschelde (planstudies waterkwaliteit en waterberging VZM). Het toelaten van dynamiek middels een beperkt getij zal de erosie van de ondiepe zones vergroten. Eendere gevolgen als in de Oosterschelde, het opvullen van de geulen met sediment uit de inter-

getijdengebieden zullen ook plaats gaan vinden in de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer bij het toelaten van een beperkt getij. De ervaring is dat met een beperkt getij wel erosie door golven in het ondiepe gebied plaatsvindt terwijl de getijstroming niet sterk genoeg zal zijn voor actief transport van grover sediment vanuit zee naar het bekken of voor opbouwend sediment transport naar inter-getijdengebieden. De aanwezigheid van het doorlaatmiddel/stormvloedkering/getijcentrale, of welke constructie dan ook vormt waarschijnlijk net als de stormvloedkering in de Oosterschelde al een belemmering voor het transport zand. Ook als de stroomsnelheden hoog genoeg zijn voor het transport ervan.

De Grevelingen kent momenteel lange perioden van zuurstofloosheid van de bodemwaterlaag gedurende de zomer en dit heeft effecten op de aanwezige bodemfauna. Hierdoor gaat de ecologische toestand van het systeem achteruit. Door gedempt getij toe te laten zal het water beter worden gemengd en verwacht wordt dat dit het voorkomen van zuurstofloze condities grotendeels zal voorkomen. Echter, voor het behoud van huidige natuurlijke functies en potenties van het systeem zal ook met een gedempt getij een behoorlijke beheersinspanning worden gevraagd. Maatregelen zullen voornamelijk nodig zijn om het nieuwe inter-getijdengebied in stand te houden. De verwachting is dat dit gebied zonder maatregelen zal eroderen tot de diepte waarop de golven kunnen aangrijpen (van Maldegem & de Jong 2010).

De verwachting is dat bij het toelaten van een gedempt getij de aanwezige zand- en schelpenbanken die niet actief worden beschermd zullen verdwijnen. Ook de nieuw gevormde banken zullen waarschijnlijk verdwijnen bij het toelaten van een gedempt getij, aangezien de zone waarin golferosie plaats kan vinden groter wordt. Daarnaast zal het opnieuw ontstaan van dit soort banken in de golfopbouwende zone minder gauw voorkomen omdat deze zone bij een wisselende waterstand onder invloed van getij eveneens veel groter is. Het aanwezige sediment dat potentieel voor opbouw kan zorgen wordt over een veel groter oppervlak verspreid en de effecten zullen daarom niet snel zichtbaar zijn.

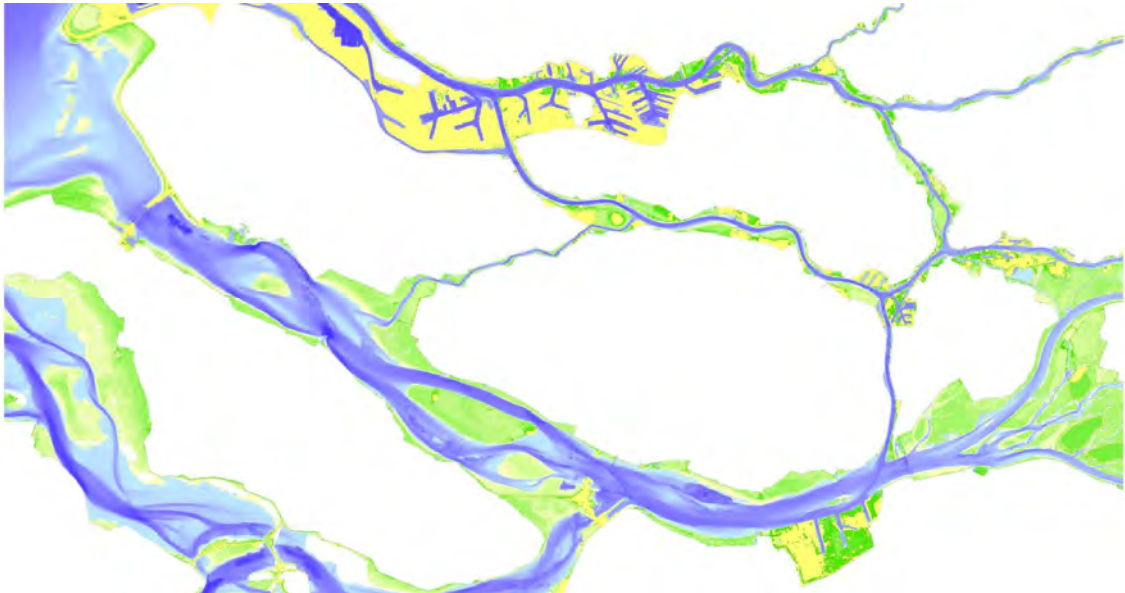
Verder moet bij het toelaten van een gedempt getij rekening worden gehouden met zeespiegelstijging. Een gedempt getij zal immers geen sediment input in het systeem veroorzaken. Echter, natuurlijk gezien zal een systeem meegroeien met de zeespiegelstijging door meer sediment vast te houden. Om te beginnen is het systeem sinds de afsluiting niet meegegroeid met de zeespiegelstijging. Daarnaast zal het bij een gedempt getij ook niet in staat zijn om mee te groeien. Bij de huidige zeespiegelstijging zal de passieve sedimentvraag jaarlijks met 220.000 m<sup>3</sup> sediment toenemen (bij een oppervlakte van 11.000 ha en een zeespiegelstijging van 2 mm).

### **6.3 Toepassing beheersmaatregelen Grevelingen-Volkerak**

Het tekort aan sediment dat jaarlijks ontstaat door zeespiegelstijging zou eenvoudig kunnen worden toegevoegd aan het systeem. Indien hiertoe wordt besloten zou het sediment kunnen worden gebruikt om een waardevol gebied als de slikken van Flakkee te voeden. Bij wijze van experiment zou het sediment hier op verschillende plaatsen onder water kunnen worden toegevoegd achter de vooroeververdedigingen. Deze plekken kunnen zo worden gekozen dat opbouw in het hoge inter-getijdengebied misschien mogelijk wordt. Echter, dit zal een experimentele opzet zijn die nauwkeurig gemonitord dient te worden om te bepalen of het succesvol is.



## 7 Haringvliet en Hollandsch Diep



### 7.1 Vraagstelling

Is er genoeg sediment om in het Hollandsch Diep-Haringvliet natuurlijke ontwikkeling van slikken, platen en schorren na te kunnen streven bij een stijgende zeespiegel? Of ook wel: Kan de sedimentatie de zeespiegelstijging bijbenen?

### 7.2 Historische ontwikkeling

De Rijn en Maas hebben na de piek van de laatste ijstijd gezorgd voor de aanvoer van veel sediment, waar de Nederlandse delta voor een groot deel uit is opgebouwd. De grootste aanvoer vond plaats tijdens het afsmelten van de ijskappen. Met het warmer worden en het begroeid raken van het stroomgebied is de aanvoer geleidelijk afgenomen, net zoals de zeespiegelstijging is afgevlakt tot het huidige tempo. Bij het afnemen van de aanvoer is ook de verdeling van sedimentsoorten veranderd: minder grind en zand, meer silt en klei (slib).

Door ingrijpen van de mens in het stroomgebied en in de rivieren zelf is de totale sedimentaanvoer nogmaals sterk afgenomen in de laatste twee eeuwen. Voor deze afname zijn drie hoofdoorzaken:

- zand- en grindwinning waarbij benedenstrooms meer werd onttrokken dan bovenstrooms werd aangevoerd (dit was decennialang het geval);
- 'afpleisteren' van de bodem, waarbij een laag grof grind op de rivierbodem verhindert dat het onderliggende zand kan bewegen;
- onderbreking van het sedimenttransport door het afvangen van zand en grind. In het verleden speelden bedverlagingen als gevolg van mijnzakkingen een belangrijke rol bij het afvangen van sediment; tegenwoordig zijn vooral kanalisatie en de aanleg van stuwen van belang.

De Maas is gekanaliseerd tot in Nederland, met de laatste stuw tussen Nijmegen en Den Bosch. De Rijn is in Duitsland gekanaliseerd tot aan Iffezheim.

Door de kanalisaties en de stuwen kan zand en grind niet meer over de volle lengte worden getransporteerd: het blijft liggen voor iedere stuw. Na de stuw treedt vervolgens erosie op

omdat de rivier wel water bevat, maar geen sediment; dat is 'onevenwichtig' en wordt gecompenseerd door uitschuring. Zo treedt bodemdaling in de vaargeul op. Op de Rijn is deze bodemdaling een groot probleem voor de scheepvaart, omdat deze rivier alleen een bevaarbare vaargeul houdt als geen harde rots of weerstandbestendige klei- en veenbanken worden geraakt. En dat gebeurt bij te weinig sedimentaanvoer. Om dat te voorkomen worden benedenstreams van de laatste stuw bij IJfezheim grote hoeveelheden tot grind gemalen rots aan de rivier toegevoegd (ca 180.000 m<sup>3</sup> /jr). De 'grind- en zandhonger' wordt zo enigszins gestild en de bodemdaling in de vaargeul tot staan gebracht.

Bij de aanvoer van sediment over de landsgrenzen moet onderscheid gemaakt worden tussen grind, zand en slib. Bij de landsgrens (Lobith) overheerst in de Rijn nog het grindtransport. Bij de Pannerdense Kop krijgt zand transport de overhand. Grind beweegt langzaam over de bodem (*bed load*); dat geldt ook voor een deel van het zand, maar het merendeel daarvan wordt zwevend verplaatst (*suspended load*). Slib wordt snel meegevoerd als zwevend stof (*suspension load*). Hieronder geven we wat getalswaarden, we doen dat apart voor zand en slib.

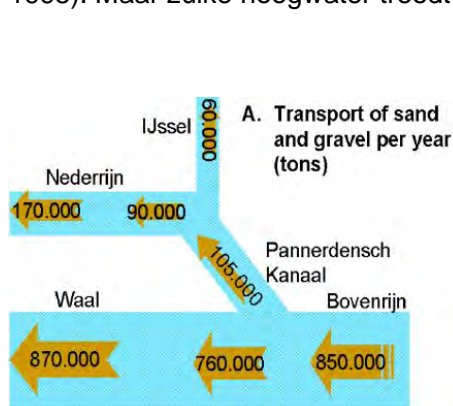
### 7.3 Zand

**Aanvoer** vanuit de Maas in het benedenrivierengebied wordt geschat op 200.000 ton/jaar <sup>7</sup> (Van Dreumel, 1995; Snippen et al., 2005).

Via de Rijn is de aanvoer vanuit Duitsland bij Lobith, gedurende de periode 1990 – 2000, jaargemiddeld 850.000 ton (Figuur 7.1A; Ten Brinke et al., 2001; Ten Brinke, 2004). Met een beetje erosie tussen de grens en Pannerdense Kop wordt dat 105.000 ton/jaar naar het Pannerdensch Kanaal en 760.000 ton/jr naar de Waal; door erosie wordt dat verderop in de Waal 870.000 ton/jr.

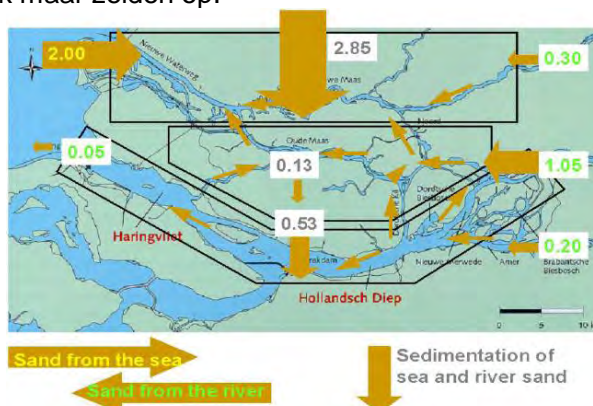
Ook de erosie in het Pannerdensch Kanaal gaat door; de 105.000 ton/jaar bij de Pannerdense Kop neemt tot de splitsing van Nederrijn en IJssel toe tot 150.000 ton/jaar, 60.000 naar de IJssel en 90.000 ton/jaar naar de Nederrijn. De laatste neemt verderop nog toe tot 170.000 ton/jaar.

Dit zand wordt in principe doorgevoerd naar het benedenrivierengebied, heel langzaam als *bedload*. Bij een hoogwater kan wel ca 50% van het jaarbudget worden afgezet in uiterwaarden, als oeverwal en als zandplaten (Ewijk; ervaring en metingen na hoogwater 1995). Maar zulke hoogwater treedt natuurlijk maar zelden op.



Figuur 7.1 A

Figuur 7.1A: transport van zand en grind door verschillende riviertakken in bovenrivierengebied (ton/jaar), over de periode 1990 – 2000 (Ten Brinke et al., 2001; Ten Brinke, 2004)



Figuur 7.2 B:

<sup>7</sup> Een kuub zand weegt ongeveer. 1,6- 1,8 ton

Figuur 7.1 B: afzetting van zand in Hollandsch Diep-Haringvliet en het Maasmondgebied (Mton/jaar) over de periode 1982 – 1992 (Ten Brinke, 2004 op basis van Van Dreumel, 1995)

Een groot deel van het zand is uitstekend metselzand. Het werd tot enkele jaren geleden opgebaggerd voor industriële toepassingen. Inmiddels is dit in het bovenrivierengebied niet langer toegestaan, om de bodemdaling van de vaargeul te stoppen. Er wordt nu wel ‘onderhoudsbaggerwerk’ gepleegd als ondieptes de bevaarbaarheid in het gedrang brengen, maar het materiaal wordt teruggestort. Meer bovenstrooms, in de diepe buitenbocht. In de afgelopen eeuw is aan het hele Nederlandse Rijntakengebied ca 0,1 km<sup>3</sup> onttrokken, dat is 1.000.000 m<sup>3</sup>/jr gemiddeld. In het benedenrivierengebied (Boven Merwede) is vanaf 2007 commerciële zandwinning beperkt tot maximaal 125.000 m<sup>3</sup> per jaar (Van Bommel et al., 2008).

Kunnen we voor de aanvoer vanuit het bovenrivierengebied beschikken over balansgegevens voor de periode 1990 – 2000 (Ten Brinke et al., 2001; Ten Brinke, 2004), voor een beeld van de **depositiezone** (Figuur 7.1B) zijn we aangewezen op gegevens over een eerdere periode van ca. 1982 – 1992 (Van Dreumel, 1995; Ten Brinke, 2004). De gegevens over aanvoer en depositie zijn daarom niet volledig met elkaar te vergelijken. Echter, wanneer we de onzekerheidsmarge in ogenschouw nemen (+/- 75% voor de aanvoercijfers volgens Ten Brinke, 2001), is uit de sedimentbalans van de depositiezone wel een globaal beeld af te leiden. Dat beeld is het volgende (Figuur 7.1B):

Over de periode van ca. 1982 – 1992 bedroeg de aanvoer via de Lek 300.000 ton, via de Merwede ca 1.050.000 ton en via de Maas 200.000 ton. Sedimentatie van rivierzand in Hollandsch Diep-Haringvliet is ca 530.000 ton/jr; 50.000 ton gaat door naar zee. In de Oude Maas sedimenteert nog 13.000 ton rivierzand. En in Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg sedimenteert 2.850.000 ton/jaar, hetgeen alleen verklaard kan worden vanuit een aanvoer van zand vanaf zee van 2.000.000 ton.

**Slotsom:** Er arriveert in het benedenrivierengebied jaargemiddeld ongeveer 1.500.000 ton zand. Zo'n kleine 40% daarvan wordt afgevoerd naar Hollandsch Diep en Haringvliet (ca. 600.000 ton per jaar); maximaal zo'n 3% wordt doorgevoerd naar zee (50.000 ton/jaar), de rest sedimenteert. In het Hollandsch Diep – Haringvliet bekken is dat zo'n 530.000 ton zand per jaar. Dit komt overeen met ongeveer 310.000 m<sup>3</sup> per jaar.

#### 7.4 Slib

Slib wordt zwevend aangevoerd. Voor de fijne slibdeeltjes zijn, in tegenstelling tot de grovere en zwaardere zandkorrels, ook bij lage afvoeren de stroomsnelheden voldoende groot om te worden getransporteerd. Daardoor is **de aanvoer** vanuit Duitsland vrij groot in vergelijking met de aanvoer van zand : gedurende de periode 1990 - 2000 ca 2.580.000 ton/jr (Figuur 7.3A; Ten Brinke et al., 2001; Ten Brinke, 2004), dat wil zeggen zo'n 3x zoveel als zand.

Omdat het slib zweeft verdeelt het zich ook anders over de 3 Rijntakken: 2/3 gaat de Waal op, 1/3 via het Pannerdensch kanaal naar Nederrijn en IJssel. Totaal was de aanvoer via Nederrijn en Waal naar het benedenrivierengebied, over de periode 1990 – 2000 zo'n 2.070.000 ton/jaar. Via de Maas kwam daar nog eens tussen de 390.000 en 450.000 ton per jaar bij (Van Dreumel, 1995; Snippen et al., 2005).

Evenals dit geldt voor de zandbalans, beschikken we alleen over een slibbalans van het benedenrivierengebied, die is gebaseerd op gegevens over een andere periode dan de aanvoergegevens; te weten ca. 1982 – 1992, tegenover 1990 – 2000. Volgens deze slibbalans (Figuur 7.3B; Van Dreumel, 1995, Ten Brinke, 2004) kwam er tussen 1982 en

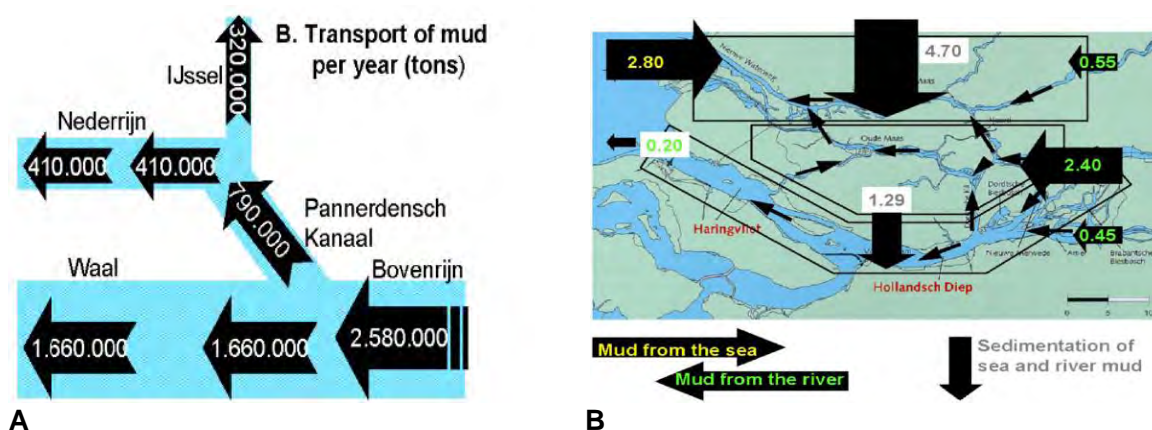
1992, van Lek en Waal respectievelijk 550.000 en 2.400.000.000 ton/jr binnen in het benedenrivierengebied; samen dus 2.950.000 ton/jr.

Het verschil van dit getal met het cijfer berekend voor de jaargemiddelde aanvoer over de periode 1990 – 2000 (2.070.000 ton volgens Figuur 7.3A), is deels te verklaren uit het verschil in beschouwde periode. Daarnaast geeft het verschil een indicatie voor de onzekerheidsmarge rond de getallen.

Met dit in ons achterhoofd, levert de slibbalans (Figuur 7.1B) het volgende beeld:

Van het door rivieren aangevoerde slib stroomt slechts zo'n kleine 6% door naar zee, zo'n 40% sedimenteert in Hollandsch Diep-Haringvliet. In de periode 1970 – 1990 was de doorvoer naar zee in de orde van 200.000 ton/jr; de totale slibsedimentatie in Hollandsch Diep-Haringvliet orde 1.290.000 ton/jaar

In de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas sedimenteerde toen wel 4.700.000 ton slib per jaar. Die grote hoeveelheid kan alleen doordat hier zo'n 2.800.000 ton/jr aan slib afkomstig was van zee.



Figuur 7.3 A: transport van slib door verschillende riviertakken in bovenrivierengebied (ton/jaar) over de periode 1990 – 2000 (Ten Brinke et al., 2001; Ten Brinke, 2004)  
 B: afzetting van slib in Hollandsch Diep-Haringvliet en het Maasmondgebied (Mton/jaar) over de periode 1970 – 1990 (Ten Brinke, 2004 op basis van Van Dreumel, 1995)

### Slotsom:

Van de totale slibaanvoer door rivieren in het benedenrivierengebied sedimenteert zo'n 40% in het Hollandsch Diep – Haringvliet; slechts zo'n 6% van het aangevoerde rivierslib wordt afgevoerd naar zee.

In tonnen is de slibsedimentatie in het Hollandsch Diep-Haringvliet ruim 2x zoveel als aan zand wordt afgezet. Omrekenen naar kuubs is lastiger dan bij zand, want sterk afhankelijk van de mate van zetting, rijping en droging. Asselman (1997) gebruikte 1220 kg/m<sup>3</sup> als omrekenfactor voor slibafzettingen op uiterwaarden (droge stof). Gebruiken we dezelfde factor, dan betekent een bovengrens voor slibsedimentatie van 1.290.000 ton/jaar, dat in Hollandsch Diep – Haringvliet jaarlijks maximaal 1.0750.000 m<sup>3</sup> slib sedimenteert in de huidige situatie.

## 7.5 Alles bijeen

Het meeste sediment dat wordt aangevoerd door Rijn en Maas blijft achter in het benedenrivierengebied. Voor het Hollandsch Diep-Haringvliet gaat het om 530.000 ton zand en 1.290.000 ton slib per jaar. Dat is substantieel.

Deze volumina stroken met bevindingen van Kleinhans et al. (2010), nl. dat in voorheen de Groote Waard (nu Biesbosch) tussen 1450 en 1850 ca 200.000.000 ton zand en 220.000.000 ton slib is afgezet. Dat komt overeen met gemiddeld 500.000 ton/jr aan zand en 550.000 ton/jr aan slib. Dat was bij een open estuariumgebied met getij en zonder Nieuwe Waterweg, vandaar de andere verhoudingen en de grotere doorvoer naar zee, en bij een nog niet gereguleerde rivier met veel meer overstromingsvlakte (dus misschien toch ook een lagere aanvoer?)

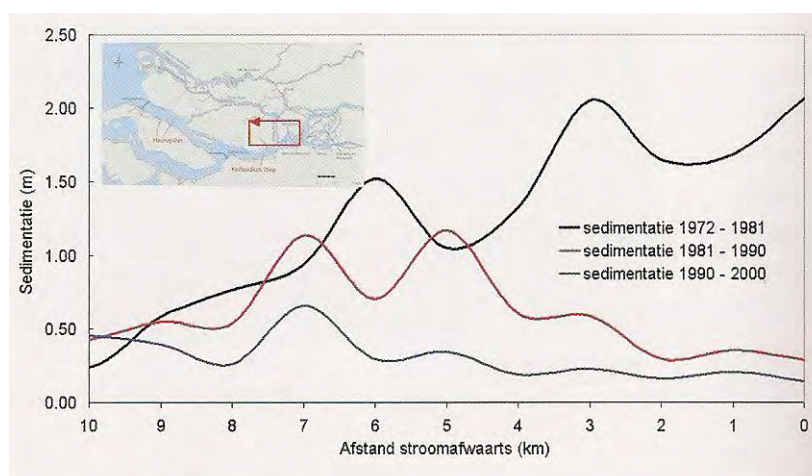
In de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas wordt in totaal nog veel meer sediment afgezet. Ook dat is deels riviersediment, maar het is vooral sediment dat van zee komt. Alle daarvandaan gebaggerde zand en slib wordt ook weer op zee gestort. Het is wel een potentiële voorraad.

## 7.6 Meegroeien met de zeespiegel?

Het Hollandsch Diep heeft een oppervlak van ongeveer 115 km<sup>2</sup> buitendijks (zonder hoogwatervrije terreinen). Het Haringvliet is ongeveer 105 km<sup>2</sup> buitendijks en niet hoogwatervrij. De gezamenlijke oppervlakte van beide bekkens is dus zo'n 220 km<sup>2</sup>.

Aannemende dat de totale zandsedimentatie in Hollandsch Diep – Haringvliet jaarlijks 530.000 ton bedraagt, dan komt dat overeen met zo'n 310.000 m<sup>3</sup> /jaar bij een dichtheid van 1,7 ton/ m<sup>3</sup>. Uitgesmeerd over het gehele gebied van 220 km<sup>2</sup>, zou deze totale zandsedimentatie jaarlijks een laagje opleveren van 1,5 mm dik. Uitgaande van een totale, jaarlijkse slibsedimentatie van 1.290.000 ton slib in deze bekkens (overeenkomend met zo'n 1.0750.000 m<sup>3</sup> bij een dichtheid van 1,2 ton/ m<sup>3</sup>), voegt slib daar jaarlijks nog een laagje aan toe van 5 mm.

Met een totale sedimentatie van 6,5 mm/jaar is er in principe voldoende sedimentaanvoer om het gehele Hollandsch Diep – Haringvliet te laten meegroeien met een zeespiegelstijging welke het drie-dubbele bedraagt van de huidige stijgsnelheid.



Figuur 7.4 Sedimentatie van zand en slib in het Hollandsch Diep sinds de voltooiing van de Haringvlietssluisen (Ten Brinke, 2004)

In werkelijkheid vindt de afzetting van riviersedimenten niet gelijkmatig over de bekkens plaats, maar is er sprake van een 'sedimentatie-tong' welke zich vanuit het Hollands Diep geleidelijk westwaarts verplaatst (Figuur 7.4). Geconcentreerd in de geulen zijn in de

bovenloop van het Hollandsch Diep sedimentatiesnelheden gemeten van 5 – 20 cm/jaar (Ten Brinke, 2004).

In het Haringvliet is de aanvoer van riviersediment veel minder en is het maar de vraag of deze op natuurlijke wijze kan meegroeien met de zeespiegel zonder sedimentaanvoer vanuit zee. In de eerste dertien jaar na afsluiting bedroeg de geulsedimentatie in het Haringvliet minder dan 0,1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (van Otterloo et al., 1987). Voor een deel was dat afkomstig van erosie van de platen – welke inmiddels is gestopt door het aanbrengen van oeverbeschermingen -, voor een ander deel door aanvoer vanuit het Hollandsch Diep. Dit aandeel kan in de tijd toenemen naarmate Biesbosch en Hollandsch Diep, door sedimentatie geleidelijk aangepast raken.

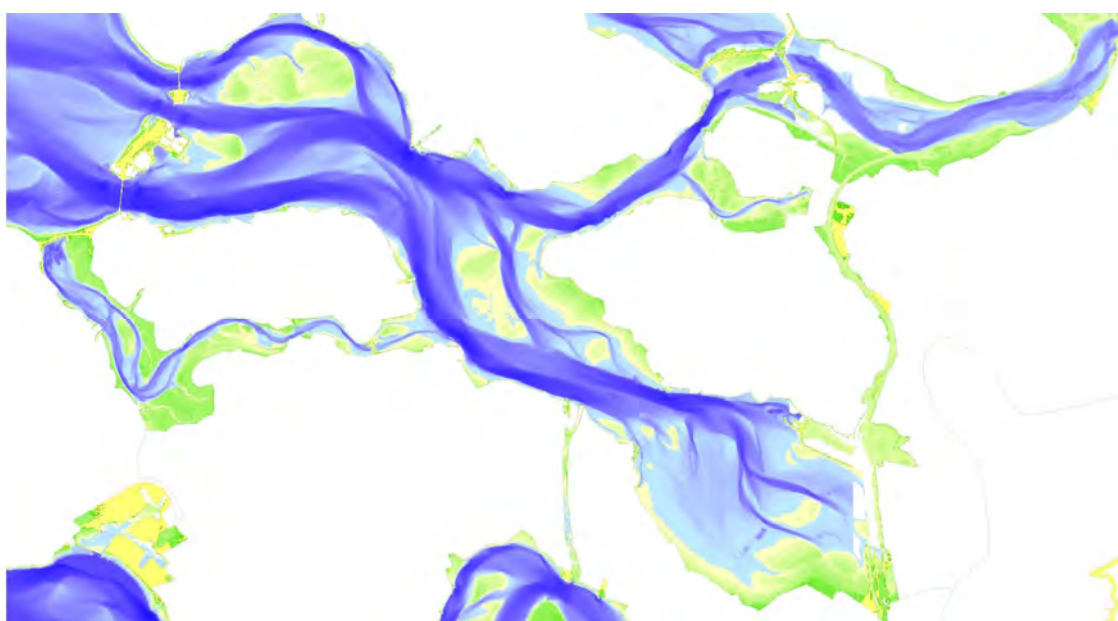
Voor het Hollandsch Diep inclusief de Biesbosch bieden de aangevoerde en afgezette volumina mogelijk enig perspectief voor een natuurlijke deltaontwikkeling die vergelijkbaar is met die van de Biesbosch in het verleden. Voorwaarde lijkt dan echter wel dat de omstandigheden daar geschikt voor worden gemaakt (getijdebeweging) en er geen dwarsgeulen doorheen worden gebaggerd omwille van de scheepvaart, die het sedimentatieproces (foreset beds) verstoren. Belangrijke kanttekening hierbij is wel dat het opnieuw toelaten van een (forse) getijbeweging, het gevaar met zich meebrengt dat chemisch vervuilde slibpakketten uit de jaren zestig en zeventig van de vorige eeuw, door erosie bloot komen te liggen en gaan bewegen.

## 8 Oosterschelde

*Uit: Gulzige geulen, slinkende slikken, Mulder en van Heeteren, 2009*

### 8.1 Historische ontwikkeling

Op kleinere schaal dan het gehele ZW Deltagebied worden sedimentvraag en –aanbod niet alleen bepaald door de lange-termijn trend in zeespiegelstijging, maar evenzeer, zo niet sterker, door de gevolgen van abrupte gebeurtenissen in het verleden. Voor een deelgebied als het Oosterscheldebekken is dat heel duidelijk.



De stijging van de zeespiegel leidt in het Oosterscheldebekken tot een gestage toename van de sedimentvraag: bij de huidige stijgingssnelheid van 2 mm per jaar, groeit elk jaar de sedimentvraag met 0,75 Mm<sup>3</sup>. Daarnaast heeft de aanleg van de Oosterscheldewerken in de jaren '80 van de vorige eeuw, een sedimentvraag (zandhonger) doen ontstaan van 400 – 600 Mm<sup>3</sup><sup>8</sup>. De invloed van deze ingreep is op korte en middellange termijn veel groter dan het geleidelijke effect van zeespiegelstijging.

Ook het sedimentaanbod wordt sterk bepaald door deze plotselinge verandering: door de aanleg van de kering is sedimentuitwisseling met de Noordzee (de Voordelta) zeer sterk afgenomen<sup>9</sup>. Het potentiële sedimentaanbod vanuit het achterland is tot nul gereduceerd<sup>10</sup>.

De grote onbalans tussen vraag en aanbod van sediment bepaalt de morfologische ontwikkeling van het huidige Oosterscheldebekken. De sedimentvraag (zandhonger) van de geulen wordt beantwoord met een lokaal sedimentaanbod door de platen, slikken en

<sup>8</sup> Door de aanleg van de Oosterscheldewerken is de hoeveelheid water die het bekken in- en uitstroomt met 30% afgenomen. De geulen zijn te groot geworden in verhouding tot de hoeveelheid water die ze vervoeren. Om deze verhouding te herstellen is veel sediment nodig: 400 - 600 Mm<sup>3</sup>.

<sup>9</sup> Door het ontstaan van ontgrondingskuilen is de uitwisseling van zand vrijwel verwaarloosbaar geworden; de import van slib wordt geschat op maximaal 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (Louters et al., 1998), maar is zeer onzeker.

<sup>10</sup> De dijken rond de Oosterschelde verhinderen verdrinking en erosie van het achterland, waardoor deze gebieden als potentiële sedimentbronnen afvallen.

schorren. De veranderde hydrodynamische condities na aanleg van de kering, zorgen voor een herverdeling van het aanwezige sediment binnen het bekken. In de (te) ruime geulen is de stroomsnelheid dusdanig afgenomen dat de sedimentaanvoer naar de platen sterk is gereduceerd; de plaatopbouw stopt. Tegelijkertijd is de plaatafbraak sterk toegenomen: door de afname van het verschil tussen hoog- en laagwater (het getijverschil) vindt de golfaanval plaats in een meer geconcentreerde zone <sup>11</sup>.

De dominantie van abrupte veranderingen in de (vorm van de) Oosterschelde op de morfologische ontwikkeling, kan verder worden geïllustreerd door de geschiedenis van de Oosterschelde in de voorbije eeuwen.

Een abrupte verandering van natuurlijke oorsprong vond plaats op 5 november 1531. De St. Felixvloed veroorzaakte een grote inbraak die leidde tot het ontstaan van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. De *passieve* bergingsruimte voor sediment, welke was ontstaan door onoordeelkundig landgebruik (ontwatering en moertering) achter zwakke, primitieve dijken, werd in één klap omgezet in *actieve* bergingsruimte. Gevolg: de potentiële sedimentvraag nam direct enorm toe. Wat de zaak compliceert is dat op de schaal van het Oosterscheldebekken zelf, deze toegenomen bergingsruimte niet onmiddellijk als een sedimentvraag naar voren kwam. Integendeel. Parallel aan de plotselinge toename van de actieve bergingsruimte was het getijvolume sterk toegenomen (met naar schatting 50 %). Om deze hoeveelheid in- en uitstromend water te kunnen accommoderen, schuurden de eb- en vloedgeulen sterk uit. Het Oosterscheldebekken manifesteerde zich niet als een sedimentvrager, maar juist als een sedimentaanbieder: het bekken exporteerde zand naar de Voordelta.

Dit exporteren van zand ging door tot de aanleg van de Oosterscheldewerken. Uit metingen is bekend dat tussen 1872 en 1952 de export ongeveer 350 Mm<sup>3</sup> heeft bedragen. Deze export was niet meer alleen het gevolg van de St. Felixvloed, maar ook van de toename in getijvolume veroorzaakt door de landwaartse uitbreiding van het Oosterscheldebekken in de richting van het Zijpe, ten koste van de Grevelingen.

De omvang van de export in de honderd jaar voorafgaand aan de aanleg van de stormvloedkering (350 Mm<sup>3</sup> alleen al tussen 1872 en 1952) is van dezelfde grootte-orde als de omvang van de zandhonger die de Oosterscheldewerken hebben veroorzaakt (400 – 600 Mm<sup>3</sup>). Dat levert een indicatie voor de tijd die nodig zou zijn om, langs natuurlijke weg, het dynamische evenwicht in het Oosterscheldebekken te herstellen: de import en herverdeling binnen het bekken van 400-600 Mm<sup>3</sup>, zal – in een situatie met minder getij-energie dan voor de afsluiting –, zeker enkele eeuwen in beslag nemen. In de tussentijd zal zonder gerichte tegenmaatregelen, veel plaatareaal verloren gaan. Het stimuleren van extra zand import door de stormvloedkering, kan daar niets aan veranderen. De herverdeling van dat zand over de platen en geulen binnen het bekken, zal daarvoor te langzaam gaan.

Wat dit betekent voor mogelijke beheersmaatregelen wordt toegelicht in de volgende paragraaf: Toepassing op ontwerp beheersmaatregelen Oosterschelde.

## 8.2 Toepassing op ontwerp beheersmaatregelen Oosterschelde

Zoals er twee soorten natuurlijke processen zijn die estuaria beïnvloeden, langjarige die op een tijdschaal van eeuwen min of meer constant zijn en extreme gebeurtenissen die in korte tijd grote veranderingen veroorzaken, zijn er ook twee soorten maatregelen om de gevolgen van de zandhonger van de Oosterschelde te minimaliseren. Enerzijds zijn er maatregelen die op korte termijn grote veranderingen zullen brengen. Dit zijn maatregelen die meer water in

<sup>11</sup> Door de concentratie van alle golfenergie in een kleinere zone, neemt hier de erosie toe,

het systeem brengen, zoals ontpoldering of afbraak van de stormvloedkering. Anderzijds zijn er lange-termijn maatregelen die meer zand in het systeem brengen.

In de huidige situatie, met een kering die nog lange tijd zal bestaan en met dijken die het laaggelegen polderland zullen blijven beschermen, lijken maatregelen met zand een haalbare en effectieve optie. Omdat niet de zandhonger van het getijbekken zelf, maar het verlies aan intergetijdenareaal het primaire probleem is, zal een maatregel met zand alleen effectief zijn als juist de platen en slikken worden gesuppleerd. Hiervoor zijn verschillende theoretische scenario's te bedenken.

Omwille van duurzaamheid moeten de gesuppleerde zandvolumes bij voorkeur dezelfde orde-grootte hebben als die van de optredende natuurlijke processen: de korte-termijn omvang van de plaaterosie en het lange-termijn proces van zeespiegelstijging. Eerstgenoemde blijkt uit metingen sinds 1983 jaargemiddeld ongeveer  $1,5 \text{ Mm}^3$ <sup>12</sup>. Daarnaast doet de huidige zeespiegelstijgsnelheid van 2 mm per jaar, de totale zandvraag in het bekken jaarlijks toenemen met zo'n  $0,75 \text{ Mm}^3$ .

Door alleen platen en slikken te suppleren, kan het verlies aan intergetijdenareaal worden gestopt gedurende de periode waarin het systeem zich aan de door de Deltawerken ontstane zandhonger aanpast. Dan moet echter de minimale omvang van plaat- en sliksuppleties gelijk zijn aan het verlies:  $1,5 \text{ Mm}^3$  per jaar.

In theorie kan deze  $1,5 \text{ Mm}^3$  jaarlijks worden gewonnen uit de nabije geulen. Door een continue, interne herverdeling van het sediment, zou op deze wijze het plaatareaal in stand kunnen blijven. Echter, door het gebruik van sediment uit het bekken zelf, wordt geen bijdrage geleverd aan het stillen van de zandhonger, en ook niet aan het tegengaan van de groei in zandhonger als gevolg van zeespiegelstijging. Deze groei in zandhonger, zal de omvang van de plaaterosie geleidelijk versnellen. Bijgevolg zal de vereiste jaarlijkse suppletie-inspanning om de platen te behouden, in dit scenario geleidelijk toenemen.

Het zand voor de plaatsuppleties kan ook worden ingevoerd van buiten de Oosterschelde. Wordt jaarlijks  $1,5 \text{ Mm}^3$  op platen gesuppleerd met zand van buiten, dan snijdt het mes aan meer kanten: de plaaterosie wordt gecompenseerd, de jaarlijkse groei van de zandhonger ( $0,75 \text{ Mm}^3$ ) wordt tegengegaan en tegelijkertijd wordt jaarlijks  $0,75 \text{ Mm}^3$  'afgelost' van de grote zandhonger. Om een idee te geven: het zou dan meer dan 500 jaar duren om de zandhonger van  $400 \text{ Mm}^3$  in het systeem te stillen, als de zeespiegel intussen niet sneller zou gaan stijgen en als we sedimentimport door de kering buiten beschouwing laten.

Nemen we aan dat er ook nog jaarlijks  $1 \text{ Mm}^3$  sedimentimport door de kering plaatsvindt vanuit zee, dan neemt - bij een jaarlijkse plaatsuppletie met zand van buiten en met een omvang van  $1,5 \text{ Mm}^3$  - de totale sedimentvraag jaarlijks met  $1,75 \text{ Mm}^3$  af. Ook dan duurt het echter meer dan 200 jaar voor het systeem zich aan de door de Deltawerken veranderde hydrodynamische condities heeft aangepast. Als de snelheid van de zeespiegel toeneemt naar meer dan 4 mm per jaar, zoals door het KNMI voorspeld, - en daarmee de jaarlijkse groei in zandhonger stijgt naar meer dan  $1,5 \text{ Mm}^3$  per jaar - zal de adaptatieperiode uitkomen op ruim 400 jaar. Grootschalige plaat- en sliksuppletie moet dan ook worden gezien als een permanente maatregel.

Bij sedimentimport door de kering spelen echter meer overwegingen dan alleen de hoeveelheid en de adaptatieperiode. De *kwaliteit* van de import (zand en/of slib) bepaalt

---

<sup>12</sup> Hesselink et al., 2003

mede het toekomstig karakter van de Oosterschelde. Zo er in de huidige situatie al sprake is van sedimentimport, dan beperkt deze zich hoofdzakelijk tot slib met een maximale omvang van  $1 \text{ Mm}^3$  per jaar. Dit leidt tot een relatieve verslibbing van de geulen. Het is de vraag of langs kunstmatige weg het zandgehalte van een import kan worden verhoogd.

Bronnen voor suppletiezand buiten de Oosterschelde, zijn in theorie niet alleen de Noordzeebodem buiten - , maar ook de Voordelta, binnen het kustfundament. Een overweging om het laatste ook in beschouwing te nemen, zou het systeemeigen karakter van dat zand kunnen zijn. Het is in de Voordelta neergelegd in de exportperiode voorafgaand aan de aanleg van de werken. Na aanleg van de kering vindt hier erosie plaats van het deltafront, zolang zich nog geen nieuw morfologisch evenwicht heeft ingesteld. Theoretisch is het denkbaar om dit nieuwe evenwicht kunstmatig te forceren, door het afgraven van het deltafront voordat het aan natuurlijke erosie ten prooi valt. Het daarbij vrijkomende zand zou een mooie bron kunnen vormen voor plaatsuppletie binnen de Oosterschelde met systeemeigen zand. Het is echter maar de vraag of er wel een nieuwe evenwicht is waarbij zand vrijkomt.

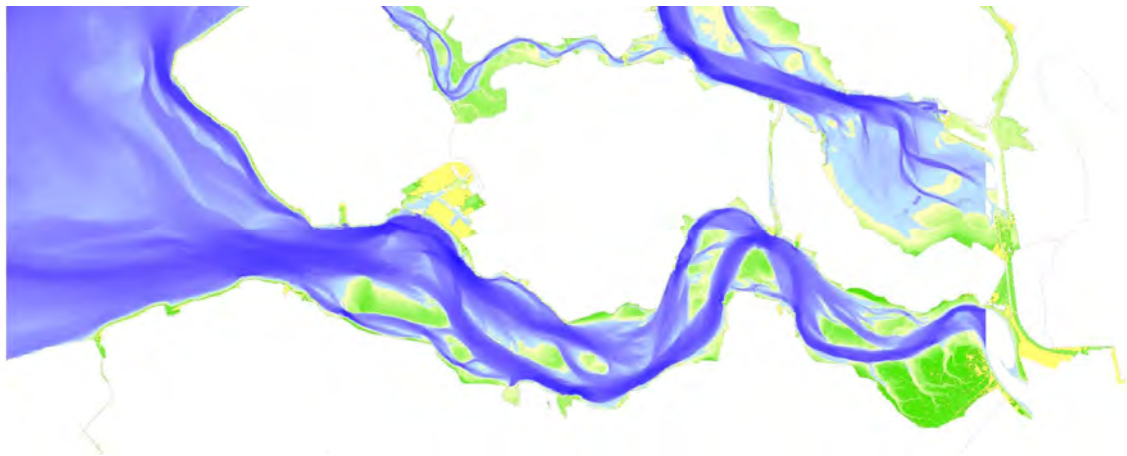
Overwegingen over jaarlijkse omvang en tempo, en over de mogelijke bron van het te suppleren zand, worden echter niet alleen ingegeven door duurzaamheid en kostenefficiëntie. Ook de onzekerheid in de mate van toekomstige zeespiegelstijging speelt een belangrijke rol. Mocht door de verwachte versnelling van de zeespiegel een vroegtijdig einde komen aan de levensduur van de stormvloedkering (zoals de Deltacie aangeeft), dan dienen zich andere mogelijkheden aan om het dynamisch morfologische evenwicht te herstellen: het eventueel verwijderen van de kering maakt dan een grotendeels herstel mogelijk van het getijdenprisma. Door vooralsnog de omvang van de plaatsuppleties af te stemmen op de jaarlijkse teruggang van de platen, wordt voorkomen dat een overmaat aan zand naar binnen wordt gebracht die op termijn weer zou worden geëxporteerd als het getijdenprisma zich zou herstellen.

Tot slot zal bij de keuze van de suppletievariant, een optimaal ecologisch rendement van doorslaggevende betekenis zijn.

## 9 Westerschelde estuarium

Het Schelde-estuarium omvat de monding, het Nederlandse deel van het estuarium (Westerschelde) en het Vlaamse deel ervan (Zeeschelde). Morfologisch gezien zou als een logische westwaartse begrenzing van het mondingsgebied beschouwd kunnen worden de havengeul naar Zeebrugge, welke een barrière vormt voor sedimentuitwisseling langs de kust. Een vergelijkbare barrière wordt gevormd door de scheepvaartgeul de Wielingen.

Het mondingsgebied en estuarium vormen samen één systeem en zijn, zeker bij beschouwingen op grotere tijdschalen, zanddelend. De inrichting en de ontwikkeling van het estuarium met behulp van morfologisch beheer moet beschouwd worden vanuit twee tijdschalen en perspectieven: kort/middellang (5-20 jaar) en lang (20-200 jaar).



Voor periodes van ca. 5 tot ca. 20 jaar zijn de effecten van majeure menselijke ingrepen (vooral baggeren, storten en winnen van zand) dominant. De strategische context voor inrichting en ontwikkeling op deze termijn is de LangeTermijnVisie (LTV) voor het Schelde-estuarium. Deze visie, in samenwerking met Vlaanderen tot stand gekomen, is, zeer kort samengevat: “uitgaan van huidige begrenzing en karakter en daarmee het uitgangspunt dat het meergeulenstelsel behouden blijft” naast een “een derde verdieping naar Antwerpen” en “gegarandeerde veiligheid”.

Op grote tijdschalen speelt het perspectief van zeespiegelstijging en mogelijke toename daarvan door klimaatverandering. De strategische context hiervoor wordt gevormd door de Nota Ruimte (behoud kustfundament) en (de ontwikkeling van) het deltaprogramma (2011). Uitwerking van deze context richt zich meer op behoud van sediment met het oog op meegroeien met de stijging van de zeespiegel. In het estuarium worden de effecten van zeespiegelstijging vooralsnog overschaduwed door de effecten van menselijk handelen. Opgemerkt moet dat de Westerschelde feitelijk geen onderdeel is van het kustfundament (net als de Waddenzee), maar wel deel uitmaakt van het kuststelsel (wat fysisch meer betekenis heeft) omdat het zanddelend is met de kustzone tot -20 meter op de bijbehorende tijdschaal van een eeuw of eeuwen.

Om het Schelde-estuarium goed te begrijpen en innovaties c.q. verbeterde inrichting ervan te ontwerpen is het goed te beginnen met het begrijpen van de problematiek op de kortere en middellange tijdschaal, dus de context van de LTV.

## 9.1 De tijdschaal van reactie op huidige menselijk ingrepen

Het baggeren en storten t.b.v. de verdieping van de vaargeul naar Antwerpen heeft invloed gehad op de stromingscondities en sedimentbeschikbaarheid:

Door initiële verdiepingen en het onderhoud daarvan (meestal het verwijderen sediment op zogenaamde drempels) zijn de vaargeulen langzamerhand verder verruimd en kan de getijgolf makkelijker het estuarium binnendringen. Het verschil tussen hoog en laag water (de zogenaamde getijslag) neemt toe. Dit leidt weer tot hogere lokale stroomsnelheden, wat weer invloed heeft op de opbouw van inter-getijdengebieden. Deze lijken gemiddeld hoger te worden en meer aaneengesloten (effecten die ongunstig zijn voor de ecologie omdat overstromingsfrequentie en land-water-overgangen afnemen). Grofweg vindt hier het omgekeerde plaats van de Oosterschelde (waar de getijdynamiek erg is afgenomen en platen lager werden).

Deze effecten zijn niet gelijk voor de verschillende delen van het estuarium. Met name in het oostelijk deel speelt dat het ongunstig is als de afname van zand in de hoofdgeul leidt tot een herverdeling van dat sediment over de andere delen. Zowel nevengeul als inter-getijdgebied hebben voldoende sediment (of wellicht zelfs te veel op platen die niet meer voldoende frequent overstroomd, de platen zijn veel hoger geworden dan vanuit de stellopers wenselijk is).

Door gericht sediment te storten, eventueel in combinatie met zandwinning, willen beheerders nu trachten de waterbeweging gunstig te beïnvloeden, leidend tot beperking van de getijslag, lokaal afname van stroomsnelheden en toename van waardevolle inter-getijdengebieden (door de stortingen zelf op plaatranden en door afname van stroomsnelheden in de luwtes).

Op wat grotere ruimteschaal is het belangrijk te weten dat het bagger- en stortprogramma langere tijd baggerspecie uit het oostelijk deel heeft doen storten in het westelijke deel. Deze overmaat aan sediment in het westelijk deel van het estuarium werd herverdeeld, niet alleen naar het oosten terug het estuarium binnen, maar ook richting het westen, de monding in. Dit beïnvloedt de zandboekhouding en het beeld of er netto sediment het estuarium in- of uitbeweegt<sup>13</sup>.

Tot slot zorgt zandwinning in de Belgische Zeeschelde ervoor dat sediment uit het Nederlandse deel van het estuarium stroomopwaarts wordt herverdeeld.

## 9.2 De tijdschaal van klimaatverandering en zeespiegelstijging

Bij de huidige snelheid van de zeespiegelstijging, 20 cm per eeuw, neemt de bergingsruimte voor sediment in de Westerschelde jaarlijks toe met 0,5 Mm<sup>3</sup>. Zandwinning met een omvang van tussen de 1 en 5 Mm<sup>3</sup> per jaar – zoals het geval is geweest vanaf het begin van de jaren '60 – heeft deze bergingsruimte evenredig vergroot. Er is dus, op de langere tijdschaal, in de Westerschelde een duidelijke (*actieve*) sedimentvraag. Gevoegd bij het theoretisch grote sedimentaanbod vanuit de Voordelta, lijken alle voorwaarden aanwezig voor transport van sediment naar het Westerschelde estuarium. In werkelijkheid is soms het omgekeerde te zien, onder meer als gevolg van het stortbeleid, dat sediment westwaarts bracht (zie vorige alinea). Op lange termijn zal er echter, evenredig aan de mate van zeespiegelstijging en van zandwinning uit het estuarium, sedimentvraag ontstaan / zijn, wat leidt tot sedimentimport. Het zal te zijner tijd moeten worden gezien of het transport van sediment naar de

<sup>13</sup> Waarnemingen over de periode '50 – '90 tonen import, tussen 1995 en 2004 verandert de trend naar minder import of zelfs export. De jongste gegevens wijzen op een nieuwe trendwijziging naar (meer) import.

Westerschelde te verenigen valt met de eis dat het huidige karakter van het estuarium (meergeulenstelsel) behouden blijft.

### 9.3 Belangrijke kennisvraagstukken

Binnen de context van de ontwerpessie is het karakter van de sedimentuitwisseling tussen Westerschelde en Voordelta, met het oog op het doel van meegroeien met de zeespiegelstijging, een belangrijke kennisleemte.

Van Voordelta richting Westerschelde: op welke tijdschaal zijn binnen het estuarium de veranderde stroming en de zandvoorraden in evenwicht? Op dat moment is de zandbehoefte t.g.v. zeespiegelstijging niet meer ondergeschikt aan herverdeling door stromingsverandering.

Van Westerschelde richting Voordelta: Hoe belangrijk is het sedimenttransport over de monding van de Westerschelde eigenlijk voor de ontwikkeling van de Voordelta. Dit is namelijk een systeem dat zich nog aanpast aan menselijke ingrepen met bijbehorende grote morfologische veranderingen (zie hoofdstuk 5).

Tenslotte:

Sinds de ontwikkelingsschets 2010 (de uitwerking in maatregelen van de LangeTermijnVisie) ligt er een vraagstelling op tafel omtrent de combinatie van het stortbeleid t.g.v. vaargeulonderhoud en het kustonderhoud. Hierin zullen onder meer kostenafwegingen spelen (vaarafstanden baggerschepen) naast beleidsvraagstukken over de mogelijkheid / wenselijkheid van zandverplaatsingen binnen het kustfundament tegenover het principe dat suppletiezand van buiten het kustfundament gehaald moet worden ( zie ook par. 3.2.4).



## 10 Oplossingsrichtingen vanuit sedimentperspectief

### 10.1 Inleiding

Na de beschrijving van de mechanismen achter vraag en aanbod van sediment en achter de interne herverdeling van sediment, doet zich de vraag voor in hoeverre van deze inzichten kan worden gebruik gemaakt bij het oplossen van huidige beheersproblemen en bij het invullen van de ambities van het Deltaprogramma voor een veilige, klimaatbestendige, ecologisch veerkrachtige en economisch vitale delta.

Het vinden van een antwoord op dit vraagstuk komt neer op het beantwoorden van de vragen:

- HOEVEEL zand wil ik toevoegen ?  
*Wil ik pro-actief zijn of de zeespiegelstijging volgen ?*
- Hoe VERDEEL ik het zand optimaal ?  
*Welke (combinatie van) functies wil / kan ik bedienen ?*

En als belangrijk onderdeel daarvan:

- waar, wanneer en hoe win ik het zand?
- waar, wanneer en hoe leg ik het zand neer ?

Gegeven de grote invloed van de Deltawerken op de sedimenthuishouding, is echter evenzeer de vraag van belang:

- wat is het effect van wijzigingen in de afsluitdammen (gedeeltelijke of volledige openstelling) op de sedimenthuishouding; en daarmee op verschillende functies ?

Een eerste antwoord op deze vragen is al te vinden in bijvoorbeeld de beschouwingen over de Oosterschelde problematiek (zie par. 8.2) of de toepassing op beheersmaatregelen in Grevelingen-Volkerak (zie par. 6.3). Hierna zullen wij ze nog uitwerken aan de hand van de resultaten van het werkatelier op 11 en 12 november jl. (zie 10.3).

Om nogmaals de samenhang van de verschillende deelsystemen in het gebied en de terugkoppeling tussen waterbeheersmaatregelen en sedimentdynamiek te benadrukken, volgt echter eerst een beschouwing over de mogelijke morfologische effecten van wijzigingen in het systeem van afsluitdammen ( par. 10.2).

### 10.2 Effecten van (gedeeltelijk) herstel van verbindingen op sedimenthuishouding

Het verbreken van de verbindingen tussen de verschillende deelsystemen van de ZW Delta in het kader van de Deltawerken, heeft geleid tot verschillende problemen. Op meerdere plaatsen wordt erover nagedacht in hoeverre een (gedeeltelijk) herstel van de verbindingen zou kunnen bijdragen aan de oplossing.

Wat zouden hiervan de effecten kunnen zijn op de sedimenthuishouding ?

De ervaringen met de Oosterscheldekering leren op welke factoren we dan moeten letten:

- De doorstroomopening (de mate van openstelling) en (eventuele verandering van) het oppervlak van het bekken, bepalend voor de getijslag (het verschil tussen hoog- en laagwater) en voor het getijvolume (de totale hoeveelheid in- en uitstromend water) en daarmee voor
  - de mate waarin het evenwicht met de aanwezige geuldoorsnede wordt hersteld (ofwel de subsysteem-actieve sedimentvraag wordt verkleind);

- de beschikbare getijenergie welke van invloed is op de mogelijkheden voor plaatgroei; en
- de verticale invloed zone van de golfenergie.
- De mate van zeespiegelstijging en de periode tussen afsluiting en wederopenstelling:  
Bij openstelling van een voorheen afgesloten bekken neemt binnen het bekken de actieve sedimentvraag direct toe met een hoeveelheid evenredig aan de opgebouwde passieve sedimentvraag sinds afsluiting; daarnaast groeit voortaan op bekkenniveau de actieve sedimentvraag evenredig met de zeespiegelstijging.  
Daarnaast bepaalt de lengte van de periode tussen afsluiting en wederopenstelling de omvang van de effecten van de op deelsysteem actieve sedimentvraag (zandhonger). Denk daarbij aan de omvang van de plaaterosie.
- De aanwezigheid (of het ontstaan van) ontgrondingskuilen aan weerszijden van de doorstroomopening, bepalend voor de mogelijkheid van actieve zanduitwisseling en daarmee voor de vraag of openstelling alleen effect heeft op de sedimentvraag van de afzonderlijke deelsystemen of ook op het systeem ZW Delta als geheel.

De complexe interactie tussen al deze factoren maakt het moeilijk duidelijke uitspraken te doen zonder nader (model)onderzoek. Redenerenderwijs valt over de verbindingen tussen de afzonderlijke bekkens en de Voordelta het volgende te zeggen:

#### **Oosterschelde bekken en Voordelta**

Als gevolg van de ontgrondingskuilen heeft er geen substantiële zanduitwisseling plaats tussen bekken en voordelta. De sedimentvraag welke in het bekken is ontstaan na de gedeeltelijke afsluiting, uit zich alleen op het niveau van het deelsysteem; op systeemniveau van de gehele ZW delta is de sedimentvraag (geforceerd door de ontgrondingskuilen) passief. De actieve zandvraag binnen het bekken veroorzaakt aldaar een plaaterosie; het passieve karakter van de vraag op systeemniveau – als gevolg van het verbreken van de morfologische relatie tussen bekken en voordelta – uit zich in een vormverandering van de buitendelta, zonder dat deze substantieel kleiner wordt.

Bij het volledig afbreken<sup>14</sup> van de Oosterscheldedekering zou het getijvolume zich grotendeels kunnen herstellen tot een niveau van voor aanleg van de kering. – De aanwezigheid van de compartimenteringsdammen houdt het oppervlak van het bekken, en daarmee het getijvolume kleiner dan in de oorspronkelijke situatie. – Door dit grotere getijvolume zal het evenwicht met de geuldoorsnede grotendeels worden hersteld. De zandhonger in het bekken (de op deelsysteem niveau actieve sedimentvraag) zal dan grotendeels zijn opgeheven, getijenergie weer op voldoende niveau om opnieuw plaatvorming mogelijk te maken.

Wanneer het getijvolume zich niet volledig zal herstellen tot het niveau van voor 1980, blijft er in het bekken een zandhonger aanwezig. Aannemende dat afbreken van de kering pas over 100 jaar gerealiseerd zou worden, moet bovendien rekening worden gehouden met een groei van de zandhonger evenredig met de zeespiegelstijging (100 miljoen m<sup>3</sup> bij gelijkblijvende zeespiegelstijging van 2 mm/jaar). Omdat na het volledig verwijderen van de kering ook de ontgrondingskuilen zullen verdwijnen, is er weer sedimentuitwisseling met de buitendelta mogelijk en uit deze zandhonger zich in een actieve sedimentvraag aan het systeem. De voordelta zal zand gaan leveren aan het bekken totdat er evenwicht bestaat tussen het getijvolume en de omvang van enerzijds de buitendelta en anderzijds de geulen in het bekken.

---

<sup>14</sup> NB Volledig afbreken van de Oosterscheldedekering is een theoretische optie. In de praktijk zal het volledig opruimen van de betonnen funderingen waarschijnlijk uiterst kostbaar (en daarom weinig realistisch) blijken. Een volledig herstel van het getijvolume ligt dan ook niet direct voor de hand.

De factor tijd speelt in deze redenering een belangrijke rol. Een volledig open verbinding realiseren over 100 jaar, betekent dat de lokale zandhonger nog 100 jaar actief zal zijn (en nog zal groeien evenredig met de zeespiegelstijging). De platen zullen in de tussentijd grotendeels zijn verdwenen, met alle gevolgen van dien voor veiligheid en ecologie. Het herstel dat vervolgens weer mogelijk wordt na verwijderen van de kering, zal minimaal eenzelfde tijdsperiode vergen.

### **Grevelingen bekken en Voordelta**

De Grevelingen vormt momenteel een volledig gesloten bekken. In het theoretische geval van volledige wederopenstelling is een redenering mogelijk vergelijkbaar met bovenstaande voor de Oosterschelde.

Bij een gedeeltelijke wederopenstelling door het terugbrengen van een gedempt getij via een doorlaatmiddel, is een ontwikkeling te voorzien die parallellen vertoont met de huidige Oosterschelde. Door het fenomeen van ontgrondingskuilen is niet te verwachten dat er actieve uitwisseling van zand zal gaan optreden. De lokaal aanwezige zandhonger zal aanwezig blijven. De plaatrandbescherming behoudt zijn functie maar zal wel aanpassing behoeven. Het laatste heeft twee oorzaken: (-) door het terugbrengen van getij-invloed zal de golfenergie zich over een grotere dieptezone manifesteren, en (-) door de verbinding met de zee doet zich de zeespiegelstijging actief gelden; de lokale zandhonger welke na afsluiting op een constant niveau lag, neemt voortaan jaarlijks toe evenredig met de zeespiegelstijging ( $220.000 \text{ m}^3$  bij de huidige stijging van 2 mm/jaar).

Bij het ontbreken van zanduitwisseling beperkt het effect van een gedeeltelijke openstelling zich op de voordelta, tot een morfologische aanpassing (erosie) van de toevoergeul(en). Het feit dat zich in deze geulen na de afsluiting vooral fijn materiaal (slib) heeft afgezet, zal de eerste periode na wederopenstelling kunnen leiden tot verhoogde slibconcentraties in het water. Als gevolg hiervan kan zich kort na de wederopenstelling een slibimport voordoen naar het bekken. Deze import zal afnemen naar mate zich een nieuw evenwicht heeft ingesteld tussen het getijvolume en de geuldoorsnede op de voordelta.

### **Haringvliet bekken en Voordelta**

Een volledige wederopenstelling van het Haringvliet zal in grote lijnen een ontwikkeling te zien geven vergelijkbaar met het geschetste beeld voor een volledig open Oosterschelde. Een gedeeltelijke openstelling (een kier) zal grote gelijkenissen vertonen met het geschetste voor een gedeeltelijk open Grevelingen.

### **Voordelta**

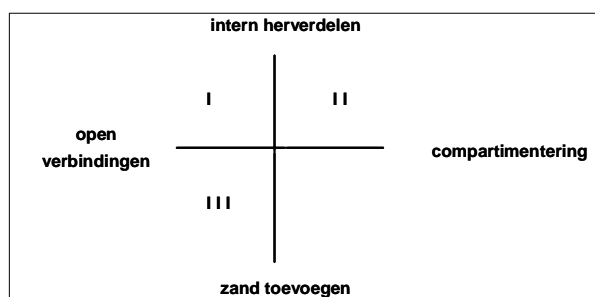
In het theoretische geval dat de bekkens weer volledig worden opengesteld en er opnieuw zanduitwisseling met de voordelta mogelijk wordt, zal de voordelta zand gaan leveren aan de bekkens. De achtergrond daarvan is hierboven geschetst bij de Oosterschelde. Of de voordelta als geheel hierdoor kleiner zal worden hangt af van de vragen of en hoe, de sedimentvraag van het systeem als gevolg van zeespiegelstijging zal worden gecompenseerd.

In het meer aannemelijke geval dat de openstellingen zich zullen beperken tot een gedeeltelijke opening, zal zanduitwisseling met de voordelta uiterst beperkt blijven. Dat betekent dat de trend welke op de Voordelta is ingezet na de afsluitingen, zich grotendeels zal voortzetten: een geleidelijke herverdeling van het zand langs de kust. De vorm van de buitendelta's verandert, de natuur streeft naar een 'gladde', aaneengesloten kustlijn. Dit komt onder andere tot uiting in het feit dat in de voorbije periode (zie ook Figuur 4.2) de grootste

sedimentatie optreedt op de buitendelta van het Haringvliet; de buitendelta waar de afsluitdam het meest landwaarts is geplaatst (Wang et al., 2009). Volgens deze theorie zal voor dit "gladstijken" van de kustlijn (ofwel het opvullen van de instulpingen voor de oude zeegaten) veel sediment nodig zijn, dat kan worden geleverd door het zand dat aanwezig is in de 'oude' buitendelta's.

### 10.3 Klimaatbestendig ontwerpen vanuit sedimentperspectief

Op het ontwerpatelier van 11 en 12 november jl. is de ontwerpogave voor een klimaatbestendige ZW Delta vanuit een sedimentperspectief, uitgewerkt aan de hand van twee benaderingen .:

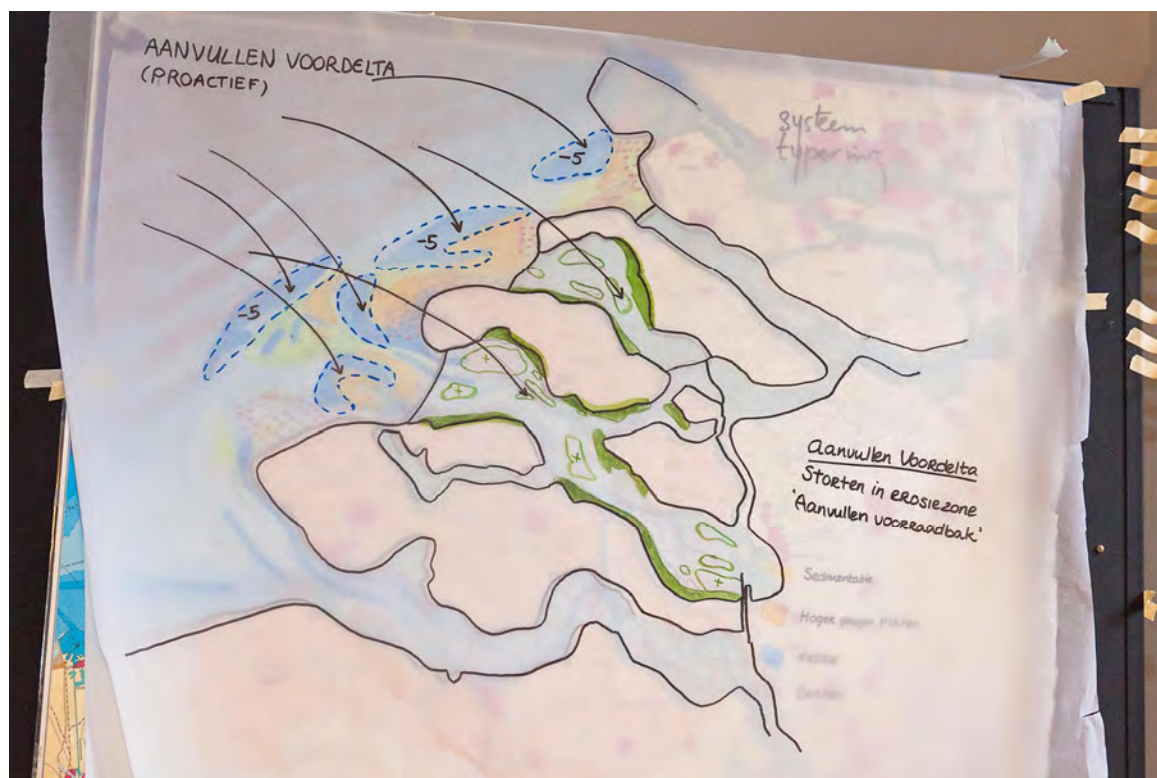


Benadering A

- > Delta = Voordelta (meebewegen)
- > Optimalisatie van (huidige) functies

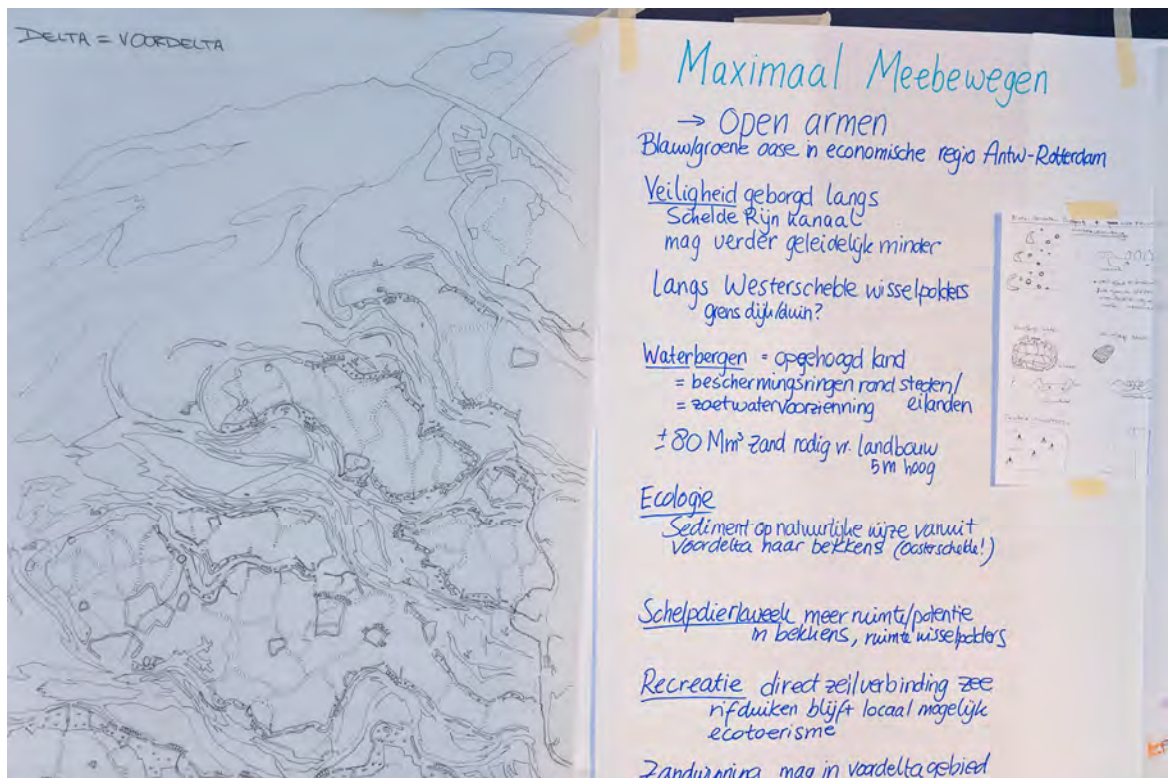
Benadering B

Enkele voorbeelden van de ontwerpen (foto's Loes de Jong):









Hoofdkenmerken van de gevonden oplossingsrichtingen zijn:

### Zandwinning

- Buiten het kustfundament om de actieve sedimentvraag van het systeem als gevolg van zeespiegelstijging te compenseren;
  - zoek locatie en winvorm die leidt tot optimalisatie van functies (b.v. vergroting van biodiversiteit)
- Binnen het kustfundament door interne herverdeling te beïnvloeden
  - Zoek lokale bronnen om lokale functies te optimaliseren
 Voorbeelden:
  - gebruik van geulsediment voor suppleren van platen
  - gebruik van zand uit voordelta (buitendelta's) voor suppleren van kust
  - gebruik zand uit het ene deelsysteem voor suppletie in een ander (zand uit voordelta voor plaatsuppleties in Oosterschelde; zand uit vaargeulonderhoud in Westerschelde voor plaatsuppleties in Oosterschelde etc).

### Zand storten / toevoegen

- Op een locatie en op een wijze die optimaal gebruik maakt van transportenergie van het systeem ('bouwen met de natuur')
  - Voorbeelden:
    - Onderwatersuppleties voor handhaving kustlijn en veiligheid;
    - Voordeltasuppleties (bv op erosie locaties) ter stimulering van de opbouw van platen en zandbanken
- Op locaties en een wijze die rechtstreeks leiden tot optimalisatie van functies
  - Voorbeelden:
    - Suppleties op eilandkoppen en andere locaties met kustlijnproblemen

- Voordeltasuppleties ter stimulering van ecologische en toeristische functies van inter-getijde platen
- Suppleties op voorlanden van waterkeringen ter bestrijding van dijkonderhoud
- Suppletie op platen gericht op handhaving ecologisch waardevol inter-getijde areaal
- Landwaartse verbreding en verhoging van dijken (en of de duinen) met als doelen vergroting veiligheid tegen overstroming, verbeteren woonklimaat, vergroten zoetwateropslag capaciteit;
- Ophoging van nieuwbouwlocaties met als doelen reductie van overstromingsrisico, verbeteren woonklimaat, vergroten zoetwateropslag capaciteit;
- Aanleg van terpen ('waterbergen') voor zoetwaterberging (ofwel in geïsoleerde terpvorm, ofwel als lijnelementen parallel aan dijken en duinen of langs oude kreekkruggen) met als nevenfunctie wonen, reductie overstromingsrisico en bewustwording van het sedimentperspectief.

## 11 Kennisvragen

Een verdere onderbouwing en kwantificering van de theorieën, empirische verbanden en oplossingsrichtingen welke in de voorgaande hoofdstukken zijn beschreven, vergt nader onderzoek.

### 11.1 Meer Jaren Kader Onderzoek (MJKO) kustlijnzorg en kustbeleid

Een belangrijk deel van de bij dat onderzoek aan de orde komende kennisvragen, zijn terug te vinden in het concept meerjaren kader onderzoek (MJKO) voor kustlijnzorg en kustbeleid, dat momenteel in opdracht van de Waterdienst door Deltares wordt ontwikkeld. In dat concept- MJKO zijn de kennisvragen opgenomen als hypothesen per onderwerp (Tabel 11.1); de onderwerpen hebben achtereenvolgens betrekking op de basislaag, de netwerklaag en de occupatielaag (vgl. Figuur 1.1).

Tabel 11.1 *Hypothesen voor kustonderzoek*  
(concept MeerJarenKaderOnderzoek, Deltares, versie november 2010)

Laag	Onderwerp	Hypothesen
Basislaag	<ul style="list-style-type: none"> <li>Werking Kustfundament</li> </ul>	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.
		De netto zandimport over de Belgische grens en de netto zandexport over de Duitse grens heffen elkaar op.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sedimentuitwisseling Kustfundament – Getijdebekkens</li> </ul>	Suppletiezand wordt verdeeld over het gehele kuststelsel.
		De Waddenzee onttrekt zand aan het kustfundament. Het onttrokken volume wordt bepaald door het oppervlak van de Waddenzee, de relatieve zeespiegelstijging (dus inclusief bodemdaling door mijnbouw) en morfologische aanpassingen veroorzaakt door afsluitingen.
		De Westerschelde onttrekt zand aan het kustfundament. Het onttrokken volume wordt bepaald door het oppervlak van de Westerschelde, de relatieve zeespiegelstijging en morfologische aanpassingen veroorzaakt door vaarwegverdieping.
		Er is géén significant sedimenttransport door de Oosterscheldekering.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herverdeling</li> </ul>	Suppleren in de kustzone verhoogt de grootte van het netto zandtransport naar de Waddenzee niet.
		Het zand dat wordt afgevoerd uit een suppletievak

	Suppletiezand	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.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust</li> </ul>	De actuele relatieve zeespiegelstijging is gelijk aan het gemiddelde over de afgelopen eeuw (1,8 tot 2 mm/jr).
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Morfodynamiek Wadden eilanden en Deltakust</li> </ul>	De ontwikkeling van eilandkusten wordt gestuurd door ontwikkelingen op de aangrenzende buitendelta's.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecologische gevolgen van ingrepen in het kuststelsel</li> </ul>	Zie MLTP + werkplan 2011

Laag	Onderwerp	Hypothesen
Netwerklaag	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suppletiestrategie</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suppletieontwerp</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lange termijn suppletiestrategie</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bijdrage kustlijn zorg aan kustveiligheid</li> </ul>	Handhaven van het kustfundament en de BKL draagt bij aan veiligheid door zeewaartse verplaatsing van het afslagpunt. (De profielvorm zal altijd tenderen naar een evenwichtsvorm gegeven de hydraulische condities, daarin zijn geen structurele veranderingen te verwachten van structureel suppleren.)

Laag	Onderwerp	Hypothesen
Occupatielaag	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatie KLZ en kustveiligheid binnendijks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KLZ zorgt voor een significante afname van het overstromingsrisico in de dijkringen langs de NL kust</li> <li>• De systematiek van KLZ is niet te verenigen met de systematiek van de toetsing van de (duin)waterkering.</li> <li>• KLZ kan niet voorkomen dat op termijn (ca. 20-50 jaar) dat nieuwe 'zwakke schakels' ontstaan en investeringen in het HWBP nodig zijn</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschermingsniveau's buitendijks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KLZ zorgt voor een significante afname van het overstromingsrisico in de buitendijkse gebieden langs de NL kust</li> <li>• De totale waarden (kapitaal, bewoners) in buitendijkse gebieden langs de NL kust rechtvaardigt een gerichte suppletieinspanning voor het vergroten van de beschermingsniveaus</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BasisKustLijn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Een beleidsmatige aanpassing van de BKL vergroot de maatschappelijke baten van KLZ</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kunnen de hybride en harde zeeweringen 'toekomstvast' worden gemaakt door het vaststellen en onderhouden van een BKL voor de zeedijken.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baten en kosten van integraal zandbeheer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De kosten van suppleties zijn hoger dan de baten voor specifieke gebruiksfuncties en niet eenvoudig te verdelen over de stakeholders</li> <li>• De geleidelijke aangroei van de duinenkust door KLZ is, indien zandsuppleties gericht worden neergelegd bij smalle duinen en kustplaatsen, een goedkopere werkwijze van het handhaven van kustveiligheid dan de momentane kustversterking via het HWBP</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beleidsanalyse Optimale Suppletiestrategieën</li> </ul>	<p>Een integrale afweging van lange termijn zandsuppletiestrategieën per kustdeel/vak maakt, gegeven diverse toekomstscenario's, inzichtelijk welke keuzes mogelijk er zijn voor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• het vergroten van de economische baten (waterveiligheid, recreatie etc.) en</li> <li>• het minimaliseren van de economische kosten, CO2 uitstoot en ecologische nadelen van zandwinning en storten.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kustverbreding</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kustverbreding is lokaal een goede mogelijkheid voor een proactieve kustveiligheidsbenadering in combinatie met het vergroten van de ruimtelijke kwaliteit</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toekomstvast maken harde weringen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De lange termijn veiligheidsopgave voor de kust biedt mogelijkheden voor het meekoppelen van korte termijn ruimtelijke ontwikkelingen, m.n. nabij kustplaatsen</li> </ul>

## 11.2 Specifieke kennisvragen voor ZW Delta

In aanvulling op de kennisvragen in het (concept-)MJKO zijn voor de ZW Delta een aantal specifieke kennisvragen af te leiden uit de systeembeschrijvingen en de oplossingsrichtingen in de voorgaande hoofdstukken. Zonder volledig te zijn en in willekeurige volgorde, hebben deze vragen te maken met de volgende onderwerpen:

Lange termijn ontwikkeling van de Voordelta

- Wat is de lange termijn ontwikkeling van de Voordelta en kust, bij verschillende scenario's (-) van zeespiegelstijging, (-) van gedeeltelijke of gehele wederopenstelling van de afsluitdammen en (-) van kustfundamentsuppleties ?
- Wat is het middellange tot lange termijn gedrag van getijgeulen langs de koppen van de eilanden (Oostgat, Krabbegat) ? Hoe is dit gedrag te beïnvloeden? Is verleggen van het Oostgat op termijn mogelijk?

## Lange termijn ontwikkeling van de bekkens Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet

- Vraag idem als bij Voordelta

## Lange termijn ontwikkeling van Westerschelde estuarium en monding

- Wat is de lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde bij verschillende scenario's van (-) zeespiegelstijging en van (-) bagger- en stort regimes voor vaargeulonderhoud?
- Hoe wordt de lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde beïnvloed door ontwikkelingen voor de Belgische kust (bv een plan als de Vlaamse Baaien)?
- Wat is de invloed van de Westerschelde op de ontwikkeling van de Voordelta ten noorden?
- onderzoek naar gedrag getijgeulen langs de koppen van de eilanden (Oostgat, Krabbegat). Hoe deze van de kust te houden? Verleggen van het Oostgat op termijn mogelijk?

## Zandwinning binnen de deelsystemen (kustfundament en bekkens)

- Wat zijn de effecten en mogelijkheden van zandwinning binnen de deelsystemen?

## Ophogen van binnendijks gebied

- Wat zijn de effecten en mogelijkheden van strategisch ophogen van binnendijks gebied?  
Aspecten die hierbij een rol spelen zijn zeer divers: o.a. hydrologisch, geotechnisch, ecologisch, landschappelijk, (landbouw)economisch, planologisch, sociaal, psychologisch .....

## 12 Referenties

- Asselman, N.E.M., 1997. Suspended sediment in the River Rhine. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Bok, de, C., 2001. Long-term morphology of the Eastern Scheldt, MSc-thesis TU Delft and Rijkswaterstaat RIKZ werkdocument RIKZ-2002.108x.
- Cleveringa, J., 2008. Morphodynamics of the delta zoast (South-west Netherlands); Quantitative analysis and phenomenology of the morphological evolution 1964-2004, Alkyon-report A1881.
- Alkyon. 2006. Kwantitatieve analyse en prognose morfologische ontwikkeling Voordelta, Alkyonrapport A1770
- Cleveringa, J. 2006. Morfodynamische ontwikkeling Voordelta. Alkyonrapport A1698R2r1.
- Cleveringa, J., J.G. van Kessel en R.C. Steijn. Time-scales of morphological change inferred from observations of the former ebb-tidal deltas of the Haringvliet and Grevelingen (The Netherlands) in RCEM 2007. C.M. Dohmen-Janssen and S.J.M.H. Hulscher (eds.), Taylor & Francis Group, London,, RCEM. P. 49-56.
- De Ronde, J., 2008, Toekomstige langjarige suppletiebehoefte, Deltares rapport Z4582.24, september 2008, 36 pp.
- Dumoulin, P., 2004, Monitoring Ophoogzand, Dienst Weg & Waterbouwkunde, rapport DWW-1735 / Publicatiereeks grondstoffen 2004/08, 55 pp
- Hesselink, A.W., D.C. van Maldegem, K. van der Male en B. Schouwenaar, 2003, Verandering in de morfologie van de Oosterschelde door aanleg van de stormvloedkering, Werkdocument RIKZ/OS/2003.810x
- Kleinbans, M.G., H.J.T. Weerts and K.M. Cohen (2010), Avulsion in action: reconstruction and modelling sedimentation pace and upstream flood water levels following a Medieval tidal-river diversion catastrophe (Biesbosch, The Netherlands, 1421-1750 AD), *Geomorphology* 118, 65-79
- Kohsiek, L.H.M., & J.P.M. Mulder (redactie), 1988, Een verkenning van een veranderend watersysteem: De Voordelta, Rijkswaterstaat DGW nota GWAO-88.002.
- Kohsiek, L.H.M., & J.P.M. Mulder (redactie), 1989, De Voordelta; Een watersysteem verandert, Rijkswaterstaat DGW.
- Louters, T., van den Berg J.H. and Mulder, J.P.M.,(1998) Geomorphological Changes of the Oosterschelde Tidal System During and After the Implementation of the Delta project, *Journ of Coastal Research* 14(3), 1134
- Middelkoop, H. 1997. Embanked floodplains in the Netherlands. Proefschrift/ Netherlands Geographical Studies 224, 341 pp

Meulen MJ van der, Van der Spek AJF, De Lange G, Van Gessel SF, Nguyen BL, Maljers D, Mulder, J.P.M. and Van der Krogt RAA (2007): Regional Sediment Deficits in the Dutch Lowlands: Implications for Long Term land use Options, *J. Soil and Sediments* 7 (1) 9 - 16

Mulder en van Heeteren, 2009, Gulzige geulen, slinkende slikken, Deltares report 23 maart 2009

Nota Ruimte, 2006

Postma, R., J.P.M. Mulder, T. Louters, F.P. Hallie, F.J. de Vos, 1990a, Een kwalitatieve prognose van de morfologie van de Oosterschelde-buitendelta, Rijksuniversiteit Utrecht Rapport Geopro 1991.10, Rijkswaterstaat DGW Notitie GWAO 900.13040.

Snippen. E., Fioole, A., Geelen, H., Kamsteeg, A., Van Spijk, A., Visser, T., 2005. Sediment in (be)weging – Sedimentbalans Rijn-Maasmonding periode 1990-2000. Internal report Ministry of Transport and Water Management, Rotterdam, The Netherlands, 121 pp.

Snijders, G.H. en L. Walburg, 1998. Morfologische ontwikkeling Voordelta 1980-1997. DG Rijkswaterstaat, RIKZ, rapport RIKZ-98.019.

Steetzel, H.J. en M. Stive, M., 1986. Dwarstransportstudie Voordelta; een onderzoek naar profielontwikkelingen door dwarstransport in de Zeeuwse voordeltas als gevolg van gehele of gedeeltelijke afsluiting van de estuaria. WL rapport H329.

Steijn, R.C., 1991, Some considerations on tidal inlets : a literature survey on hydrodynamic and morphodynamic characteristics of tidal inlets with special attention to 'Het Friesche Zeegat', Waterloopkundig Laboratorium, rapport H840.45 in het kader van project Kustgenese, 109 pag.

Ten Brinke, W.B.M., L.J. Bolwidt, E. Snippen en L.W.J. van Hal (2001), Sedimentbalans Rijntakken 2000. Een actualisatie van de sedimentbalans voor slib, zand en grind van de Rijntakken in het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling/RIZA, rapport 2001.043.

Ten Brinke, W., 2004. De beteugelde rivier. Deel 81 van Wetenschappelijke bibliotheek Natuur& techniek, Uitgeverij Van Veenmagazines, Diemen

Van Bommel, H., S. Ciarelli, M. Ohm, J. Mol, A. van Spijk, A. Broekhuizen, A. van der Vet, 2008, Watersysteemkwaliteit Zuid Holland 2006, Nota RWS Zuid Holland RWS/DZH/ARA/2008-16

Van Dreumel, P.F., 1995. Slib- en zandbeweging in het noordelijk Deltabekken. Internal report Ministry of Transport and Water Management, Rotterdam, The Netherlands, 60 pp.

Van Otterloo, R.H. van, Berghem, J.W. van, Kuijpers, J.W.M., Broekhuizen, A., Dreumel, P.F. van en Mol, J.W., 1987, De onderwaterbodem van het Noordelijke Deltabekken, Nota RWS Directie Benedenrivieren, 29 pp.

Wang,Z.B., J.G.de Ronde. A.J.F. van der Spek, E.P.L. Elias, 2009, Responses of the dutch coastal system to the (semi-)closures of tidal basins, Proceedings of ICEC 2009, Sendai, Japan, Vol. 1, 203-210.