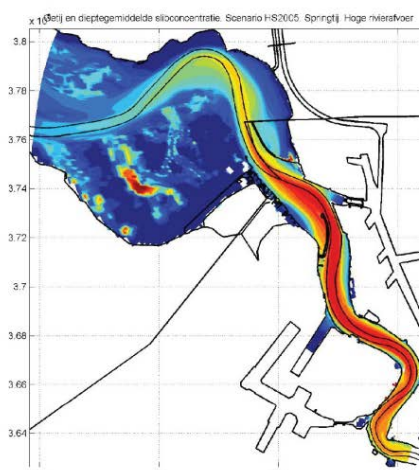


Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie



LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid

Synthese en conceptueel model


Basisrapport grootschalige ontwikkeling G-13


01 oktober 2013

Colofon

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Coveliersstraat 15, 2600 Antwerpen, België

: + 32 3 270 92 95


: + 32 3 235 67 11


Email: info@imdc.be

Website: www.imdc.be

Deltares

Adres: Rotterdamseweg 185, 2600 MH Delft, Nederland

: + 31 (0)88 335 8273


: +31 (0)88 335 8582


Email: info@deltares.nl

Website: www.deltares.nl

Svašek Hydraulics BV

Adres: Schiehaven 13G, 3024 EC Rotterdam, Nederland

: +31 10 467 13 61


: +31 10 467 45 59


Email: info@svasek.com

Website: www.svasek.com

ARCADIS Nederland BV

Adres: Nieuwe Stationsstraat 10, 6811 KS Arnhem, Nederland

: +31 (0)26 377 89 11

: +31 (0)26 377 85 60

Email: info@arcadis.nl

Website: www.arcadis.nl

Document Identificatie

Titel	Synthese en conceptueel model
Project	Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie
Opdrachtgever	Afdeling Maritieme Toegang - Tavernierkaai 3 - 2000 Antwerpen
Bestek nummer	16EF/2010/14
Documentref	I/RA/11387/12.294/GVH
Documentnaam	K:\PROJECTS\11\11387 - Instandhouding Vaarpassen Schelde\10-Rap\Op te leveren rapporten\Oplevering 2013.10.01\G-13 - Synthese en conceptueel model_v2.0.docx

Revisies / Goedkeuring

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	28/11/2012	Finaal	M. Taal / Z. B. Wang / J. Cleveringa	K. Kuijper / B. Blik / M. Sas	T. Schilperoort
1.1	10/04/2013	Klaar voor revisie	M. Taal / Z. B. Wang / J. Cleveringa	K. Kuijper / B. Blik / M. Sas	T. Schilperoort
2.0	01/10/2013	KFinaal	M. Taal / Z. B. Wang / J. Cleveringa	K. Kuijper / B. Blik / M. Sas	T. Schilperoort

Verdeellijst

1	Analoog	Youri Meersschaut
1	Digitaal	Youri Meersschaut

**LTV Veiligheid en
Toegankelijkheid G-13: Synthese
en conceptueel model**

Basisrapport grootschalige ontwikkeling



LTV Veiligheid en Toegankelijkheid
G-13: Synthese en conceptueel model

Basisrapport grootschalige ontwikkeling

Marcel Taal
Zheng Bing Wang
Jelmer Cleveringa (Arcadis)

1207720-000

Titel
LTV Veiligheid en Toegankelijkheid G-13: Synthese en conceptueel model

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat-
MOW-AMT

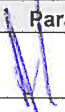



Project
1207720-000

Pagina's
80

Trefwoorden
Schelde-estuarium, meergeulenstelsel, sediment, getij

Samenvatting
Dit rapport is een integrerende rapportage binnen het programma LTV Veiligheid en Toegankelijkheid (V&T). Het geeft een grootschalige systeembeschrijving van het Schelde-estuarium met nadruk op de grootschalige waterbeweging en sedimenthuishouding van de Westerschelde.

Referenties
Zie p.55

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	sep. 2013	ir. M.D. Taal		ir. C. Kuijper		drs. F.M.J. Hoozemans	b.a. 
		prof. dr. ir. Z.B. Wang		B. Bliet			
		J. Cleveringa (Arcadis)		M. Sas			

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond, aanpak, leeswijzer	1
1.2 Beleid- en beheervragen	2
1.3 Antwoorden geven met gebruik van een conceptueel model	7
2 Theoretische beschouwingen	9
3 Conceptueel model werking van het systeem	13
3.1 Inleiding	13
3.2 Terugkoppelingen tussen getij en morfologie op megaschaal	13
3.3 Bronnen en putten van sediment en relatie met de terugkoppelingen	17
3.4 Terugkoppelingen getij en morfologie op niveau van de macrocel als geheel	17
3.5 Terugkoppelingen getij en morfologie binnen een macrocel (mesoschaal)	19
3.6 Respons estuarium op zeespiegelstijging	20
3.7 Reactie getij op ingrepen in de morfologie	21
4 Waarnemingen geuldimensies, getij-indringing, transporten	25
4.1 Veranderingen sedimentvoorraden	25
4.2 Veranderingen in dwarsdoorsneden en geulvolumes	26
4.3 Veranderingen in het getij	33
4.4 Veranderingen in het getij in relatie tot veranderde geuldimensies	35
5 Sedimenttransporten: waarnemingen en verklaringen	39
5.1 Van veranderingen in morfologie en waterbeweging naar transporten	39
5.2 Conclusies sedimenttransporten uit data-analyse	39
5.3 Conclusies slib- versus zandtransporten uit data-analyse	41
5.4 Mechanismen die verschillen in netto sediment transport bij de monding verklaren	42
5.5 Sedimenttransporten volgend uit de veranderde waterbeweging	44
5.6 Van transporten naar (veranderingen in) grootschalig gedrag	46
6 Historische ontwikkeling en toekomstperspectief Westerschelde	47
6.1 Inleiding	47
6.2 Historisch perspectief, daaruit voortvloeiende 'eigen' evolutie	47
6.3 Toekomstperspectief (lange termijn)	48
6.4 Mogelijkheden beïnvloeding getij	50
6.5 Conceptueel model reactie op sediment management geulen	51
7 Antwoorden op beheervragen van het Deltaprogramma	53
Referenties	55
Bijlage 1: Theoretische beschouwingen, uitgebreid	58
Basisbegrippen over het getij	58
Asymmetrie van verticaal en horizontaal getij	59
Netto sedimenttransport	61
Invloed morfologie op getij	63
Circulatie in en stabiliteit van een meergeulensysteem	64

Beschouwing vanuit empirische relaties	67
Bijlage 2: Conceptueel model reactie ingrepen in de morfologie	69
Algemeen	69
Ingrijpen in de komberging	70
Ingrijpen in stroomvoerende oppervlak van de hoofdgeul	70
Ingrijpen in de wisselwerking tussen hoofd- en nevengeul	71
Ingrijpen op schaal van platen en kortsluitgeulen	72
Ingrijpen in de morfologie monding	73
Uitgevoerde ingrepen	73
Bijlage 3: Uitgevoerd beleid t.a.v. storten en zand winnen	75
Bijlage 4: Memo doorstroomprofiel en dominant getijvolume	79

1 Inleiding

1.1 Achtergrond, aanpak, leeswijzer

Situering van dit rapport

Dit rapport is een integrerende rapportage binnen het programma LTV Veiligheid en Toegankelijkheid (V&T). Het geeft een grootschalige systeembeschrijving van het Schelde-estuarium met nadruk op de grootschalige waterbeweging en sedimenthuishouding van de Westerschelde. De reden voor de nadruk op de Westerschelde is de beheervragen vanuit het Nederlandse Deltaprogramma die zijn gericht op de relatie met het Nederlandse kuststelsel en de ontwikkeling van het meergeulenstelsel. Het onderzoek binnen V&T is gekoppeld aan de beantwoording van de gezamenlijke Nederlandse en Vlaamse beheervragen over het Schelde-estuarium, vastgesteld door de Vlaams-Nederlandse Schelde Commissie. Paragraaf 1.2 behandelt de voor deze rapportage meest sturende vragen en geeft aan hoe dit rapport bijdraagt.

Dit rapport bespreekt de resultaten van andere LTV-V&T-rapportages die zijn gericht op theorievorming (G-7), data-analyse (G-1, G-2, G-3, G-5, G-6, G-8) en het testen van hypothesen met numerieke simulaties (G-4, G-11, G-12) van getij en morfologie. Hierbij is ook theorievorming over de aandrijvende krachten van de ontwikkelingen op kleinere schaalniveaus (in rapport K-17) betrokken. De synthese wordt gedaan met behulp van een conceptueel model voor de grootschalige morfologie en waterbeweging.

In het LTV-V&T-rapport G-7 is de respons van het getij in een trechtervormig estuarium, zoals de Schelde op basis van de wiskunde van de waterbeweging functioneert, beschreven. In rapport K-17 is vanuit het denken in morfologische en geologische evenwichten, op basis van fenomenologie een concept uiteengezet dat is gebaseerd op locaties in een estuarium die sediment leveren (sources) of opslaan (sinks).

In LTV-V&T-rapporten G-1, G-5, G-6 en G-8 zijn de resultaten van de analyse van de waterstandsgegevens beschreven. De analyse geeft inzichten in de historische ontwikkelingen van twee aspecten van het getij: (i) de amplificatie & voortplanting binnen het estuarium en (ii) de asymmetrie die van belang is voor het netto sedimenttransport.

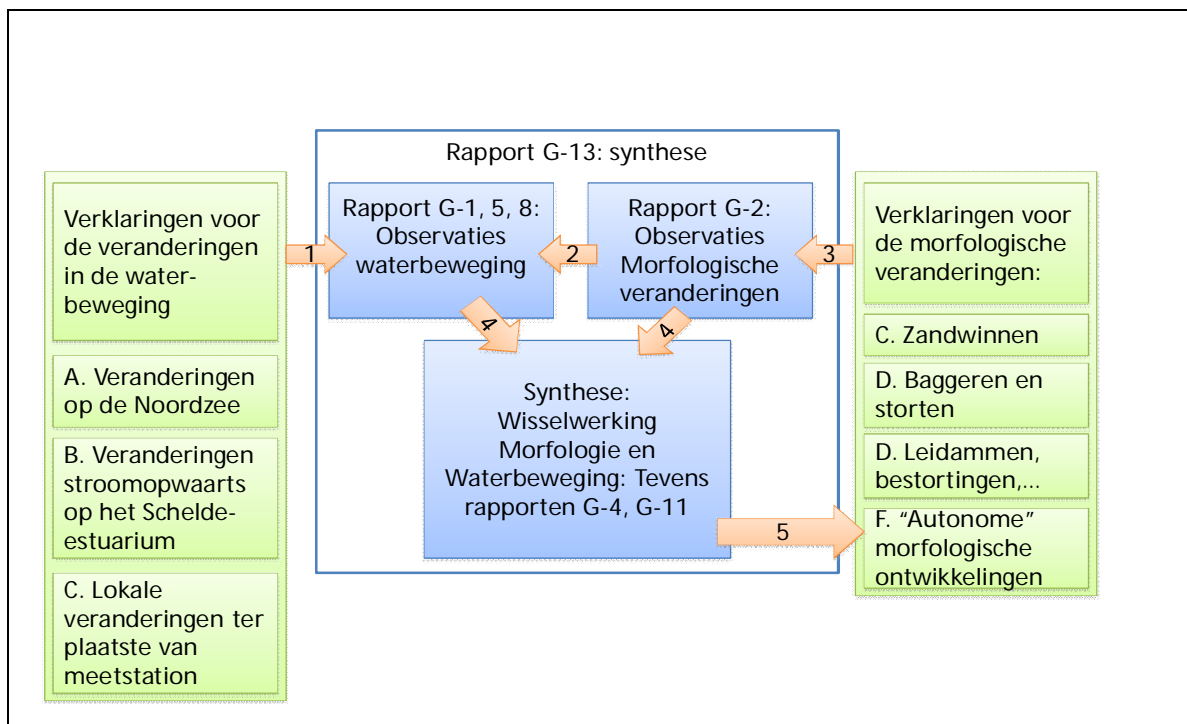
In LTV-V&T-rapporten G-2 en G-3 zijn de historische gegevens van de bodemhoogtes en de bijdrage van slib onder de loep genomen. De nauwkeurigheden en onzekerheden van de gegevens zijn in detail beschouwd. Dit leverde inzichten in de nauwkeurigheden en onzekerheden in de resultaten van de sedimentbalans-analyses op. In de rapporten G-5, G-6 en G-8 zijn, naast waterstanden, ook de bodemontwikkelingen van geulen beschouwd.

In LTV-V&T-rapporten G-4, G-11 en G-12 is het grootschalig functioneren van het gehele estuarium (van Gent tot en met de monding) bestudeerd door stelselmatig scenario-onderzoek.

Werkwijze / opbouw rapportage

Dit rapport bespreekt eerst een algemeen conceptueel model voor een meergeulenstelsel (hoofdstukken 2 en 3). Hierbij wordt ook ingegaan op de samenhang met menselijke ingrepen en zeespiegelstijging. Daarna volgt de synthese met verklaringen van de waarnemingen over het getij en de morfologie (hoofdstuk 4). Hierbij wordt een stappenplan doorlopen dat wordt geïntroduceerd in Figuur 1.1 en later uitwerking krijgt in Figuur 4.10. De samenhang tussen getij en de morfologie wordt verder besproken via theorie, waarnemingen en modelsimulaties

aangaande sedimenttransporten (zie pijl 5 in Figuur 1.1) in hoofdstuk 5. Het conceptuele model wordt dus gebruikt om de waarnemingen op megaschaal te verklaren. Verklaaren van waarnemingen binnen de macrocel valt onder de LTV V&T-rapportages K-16 en K-17.



Figuur 1.1: Stroomschema verklaring waarnemingen getij en bodem. Een deel van de verklaring ligt buiten het studiegebied (pijl 1). Een ander deel zijn de waargenomen morfologische veranderingen (pijl 2), die deels terug te voeren zijn op menselijke ingrepen (pijl 3). Een essentie van dit rapport is de wisselwerking tussen de veranderingen in de waterbeweging, de morfologie en het sedimenttransport (pijlen 4 en 5).

Dit rapport completeert de systeembeschrijving door een schets van de historische ontwikkeling, de nu vastgestelde 'autonome' trends en een schets van de toekomstige ontwikkeling (uitgaand van geen grote veranderingen in gebruik van het estuarium). Beantwoording van drie concrete beheervragen vanuit het Nederlandse Deltaprogramma gebeurt, als afsluiting, in hoofdstuk 7.

1.2 Beleid- en beheervragen

Vragen vanuit het Nederlandse Deltaprogramma

Een belangrijke reden voor het onderzoek naar grootschalig gedrag van het Schelde-estuarium zijn de beheervragen vanuit het Nederlandse Deltaprogramma. Hiervoor is kennis nodig over de ontwikkeling van het estuarium op de langere tijdschaal, in samenhang met de kust. De veiligheid tegen overstromingen, op de lange termijn en met behoud van functies, is het belangrijkste thema voor het Deltaprogramma.

Voor de veiligheid op lange termijn van de kust¹ zijn de sedimentvoorraden bepalend. Het Nederlandse beleid voor de kust is daarom gericht op het 'op peil houden van de sedimentvoorraden'. Zo kan het kuststelsel 'meegroeien' met de (mogelijk versneld) stijgende zeespiegel. Dit beleid is langs twee lijnen geoperationaliseerd. De eerste is het vasthouden van de kustlijn, die wordt getoetst met de basiskustlijn (BKL), die ook langs de

1. De lijn Vlissingen – Breskens fungeert als grens tussen estuarium en kust (met de monding als deel van de kust).

mondung van de Westerschelde, bij de kust van Zeeuws Vlaanderen en Walcheren, is gedefinieerd. De tweede operationalisering is de afspraak om het kustfundament met de zeespiegelstijging te laten meegroeien, vooralsnog door jaarlijks in totaal 12 miljoen m³ te suppleren langs de gehele Nederlandse kust. Ook Vlaanderen onderhoudt de kust met zand en kijkt hierbij ver vooruit (zie Masterplan Kustveiligheid, Geïntegreerd Kustveiligheidsplan).

Het Schelde-estuarium zelf is geen onderdeel van het kustfundament, maar wel van het Nederlandse Kuststelsel en wordt als zanddelend met het kustfundament beschouwd (zie kader "Belang van netto sedimenttransport tussen kust en estuarium").

Dit 'zanddelend zijn' is de directe aanleiding van de drie concrete beheervragen van LTV V&T vanuit het Nederlandse Deltaprogramma:

- Op welke tijdschaal zullen binnen het estuarium de veranderde stroming en de zandvoorraden in evenwicht zijn?
- Hoe belangrijk is sedimenttransport via de monding van het estuarium voor de ontwikkeling van de Voordelta? Zijn er relaties met de andere Deltabekkens?
- Wat is het effect van zeespiegelstijging op de sedimentbalans tussen de Voordelta en de Deltawateren? Wat is het effect van maatregelen?

Netto sedimenttransport tussen kust monding en Westerschelde

De monding van het Schelde-estuarium is onderdeel van het kustfundament. Netto zandtransport van de Westerschelde naar de monding betekent daarom een bijdrage aan de zandvoorraden van het kustfundament. De tot nu toe berekende netto sedimenttransporten tussen Westerschelde en monding variëren in de tijd, met een ordegrrootte van één miljoen m³ per jaar. De in de berekeningen toegepaste randvoorwaarden blijken een belangrijke factor te zijn (zie LTV V&T-rapport G-2), waaronder de aannames over de sedimentatie van slib in nevengeulen en intergetijdegebieden (zie LTV V&T-rapport G-3).

Het meest waarschijnlijke beeld dat uit de V&T-studies volgt, voor de zanduitwisseling over de lijn Vlissingen – Breskens, is een voortdurende levering van zand door de Westerschelde aan de monding. De ordegrrootte daarvan is de laatste twee decennia 0,5 - 1 miljoen m³ per jaar. Dit getal is het resultaat van de langjarige sedimentbalans volgens de Haecon-methode te corrigeren voor de veranderingen in slibvoorraden (zie Figuur 5.3) en daarbovenop met de waarschijnlijke levering van zand door de Boven-Zeeschelde aan de Beneden-Zeeschelde (ca. 0,25 miljoen m³ per jaar, zie LTV-rapport K-19) rekening te houden.

De levering vanuit de Westerschelde aan de monding van 0,5 - 1 miljoen m³ zand per jaar moet in perspectief worden gezien met de totale hoeveelheid zandsuppleties in Nederland (ca. 12 miljoen m³ per jaar) en de jaarlijkse sedimentbehoefte in het mondinggebied (berekend met de formule oppervlakte x snelheid van zeespiegelstijging), de sedimenttransporten binnen de Voordelta sinds de deltawerken en de morfologische ingrepen in de monding (zoals het onderhoud aan de toegangseul). In dat licht is het een klein getal (zie Cleveringa, 2008).

De invloed van de grootschalige sedimenthuishouding van het estuarium op de ontwikkeling van de kustlijn is (gezien voorgaande overwegingen en zie b.v. ook Cleveringa, 2008) zeer beperkt. De ontwikkeling van de Zeeuwse kustlijn wordt ook gestuurd door de geulen voor de kust. Op die geulen kan de verandering van het getij binnen de Westerschelde wel enige invloed hebben, via verandering van de sterkte van de stroming. Dit is een zeer indirect (en waarschijnlijk ook klein, zie LTV-rapport G-12) effect van veranderingen in het estuarium op de ontwikkeling van de momentane kustlijn en wordt verder niet in dit rapport geadresseerd.

Vragen over de ontwikkeling van het getij

Het Schelde-estuarium is een samenhangend systeem. Dat geldt voor water, sediment, flora en fauna. Het belangrijkste fysische aspect waarin deze samenhang naar voren komt is het getij. Elke dag komt de getijgolf twee maal het estuarium binnen. In combinatie met de zoetwateraanvoer uit de riviertjes zorgt dit voor de karakteristieke estuariene omstandigheden. Door veranderingen in de bodem (vorm, wrijving) verandert de getijgolf tijdens de tocht van Vlissingen tot Gent. Hoe het getij verandert heeft (zie kader) veel invloed op de mogelijkheden om de doelen van de Lange Termijn Visie (LTV-functies) te bereiken.

LTV-functies en afhankelijkheid van getij en bodemligging

Voor het Schelde-estuarium is het gemeenschappelijk beleid gebaseerd op de Lange Termijn Visie (Technische Schelde Commissie, 2001), met als pijlers veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid.

Veiligheid.

Het estuarium wordt beschermd door dijken. De belangrijkste invloed van het getij op de veiligheid is de ontwikkeling van de belasting van de dijken. Die hangt samen met de voortplanting van het getij, in het bijzonder tijdens extreme situaties. Op kleinere schaal (dus niet in dit rapport behandeld) speelt nog de invloed van de bodem op de (demping van de) golfaanval en lokale erosie, die de stabiliteit van de dijken kan beïnvloeden.

Toegankelijkheid.

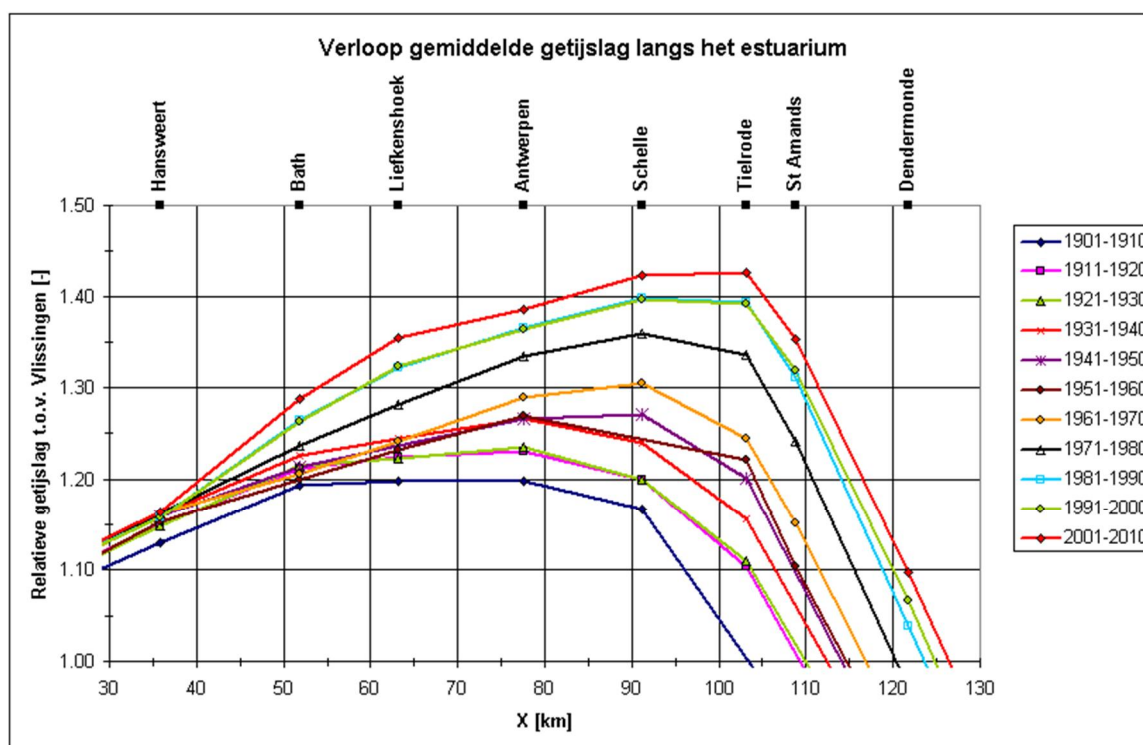
De ontwikkeling van de sedimentvoorraden op grote schaal heeft geen directe relatie met de bevaarbaarheid van het estuarium. Lokaal, op de drempels in de vaargeul is sedimentbeheer van groot belang voor de toegankelijkheid. Veranderingen in de grootschalige waterbeweging hebben gevolgen voor bevaarbaarheid, onder meer via verandering van getijvensters en de stroomsnelheden. Het in stand houden van het meergeulenstelsel van de Westerschelde is voor de toegankelijkheid ook belangrijk vanwege de scheiding van zeevaart en binnenvaart. Een meergeulensysteem biedt ook meer mogelijkheden voor de bagger- en stortstrategie.

Natuurlijkheid.

De issues 'behoud van het meergeulenstelsel' en 'voorkomen van verdrinking van het estuarium' zijn gerelateerd aan de grootschalige sedimentvoorraden. Voor natuurlijkheid is de ontwikkeling van de grootschalige waterbeweging (amplificatie en asymmetrie van het getij) van direct belang. Voor de ecologische waarde van habitats (zoals platen, slikken, schorren en ondiep water) zijn naast het areaal (bepaald door oppervlakte en overstromingsfrequentie) ook stroomsnelheden medebepalend. De ecologische waarde is pas goed te beoordelen op kleine ruimteschaal. Hierbij spelen begrippen als 'mozaïek' en de 'aanwezigheid van gradiënten' een grote rol.

Het getij in het Schelde-estuarium ontwikkelt zich al heel lang in een minder gunstige richting. De maximale getijslag (het verschil tussen laag- en hoogwater) is, zie Figuur 1.2, toegenomen en heeft zich stroomopwaarts verplaatst (LTV V&T-rapport G-8). Ook de verschillen tussen de stroming tijdens eb en vloed veranderden. Dat laatste betekent dat de transporten van zand en slib kunnen zijn veranderd, met elk hun eigen gevolgen voor de LTV-functies en de ontwikkeling van de bodem.

Ook andere kenmerken veranderen al decennia. In het meergeulenstelsel is steeds minder verschil tussen de waterstanden en stromingen in de hoofd- en de nevengeul (zie b.v. LTV V&T-rapport G-4).



Figuur 1.2: De verandering van de amplificatie van de getijslag tijdens de laatste eeuw, van west naar oost langs de Schelde tussen Hansweert en Dendermonde. De piek is hoger en meer landinwaarts. De amplificatie is het effect van de bodemdiepte van het estuarium op de getijslag. Hiernaast is bij Vlissingen een autonome toename van getijslag te observeren.

Vragen over sedimentbehoefte en sedimentbeheer

De effecten van zeespiegelstijging in het Schelde-estuarium zijn momenteel beperkter dan de invloed van het morfologisch beheer (zie paragraaf 3.6 en 3.7). Op lange termijn is het een relevanter effect, vergelijkbaar met een toegenomen bodemdiepte. Het effect van de zeespiegelstijging zal zich daardoor kunnen manifesteren als een verdere toename van de getijslag². Er is dus wel een sedimentbehoefte op lange termijn voor het estuarium (om mee te groeien), maar die wordt beperkt omdat er ruimere geulen passen bij de toegenomen getijslag (meer uitleg in paragraaf 3.6 van dit rapport). De benadering 'oppervlakte maal stijgsnelheid'³ voldoet daarom in principe niet voor het afschatten van de sedimentbehoefte van het estuarium.

Ook geldt in het estuarium dat het op peil houden van de sedimentvoorraad minder garantie (dan bij de kust) geeft tot bereiken van beleidsdoelen, omdat de ontwikkeling van het getij zeer belangrijk is voor het bereiken van de doelen. Die ontwikkeling hangt niet alleen van de sedimentvoorraad af, maar ook van de 'verdeling over het profiel' (zie hoofdstukken 3 en 4).

In Mulder et al (2012) wordt beredeneerd dat gebruik van 'oppervlakte maal stijgsnelheid' momenteel toch de beste aanname is, mede omdat er geen alternatieve, meer passende, operationalisering beschikbaar is (voor een trechtersvormig estuarium in het algemeen en de Schelde in het bijzonder). Bovendien, in aanvulling op feit dat door toenemende getijslag er in theorie minder sediment nodig is, lijkt er juist een beheerdoelstelling te moeten zijn die gericht

² Afhankelijk van de geuldiepte die er al is, want de relatie is niet lineair, zie LTV V&T G-7.

³ Deze wordt gebruikt in Nederland bij het kustfundament en de Waddenzee,

is op vermindering van getijslag. Die beheerdoelstelling heeft waarschijnlijk juist meer sediment nodig is dan ‘oppervlakte maal stijgsnelheid’ (zie verder paragraaf 6.4).

Voorafgaande betekent dat een bredere vraagstelling geldt dan alleen sedimentvoorraden:

“Op welke wijze kan sedimentbeheer bijdragen aan het lange termijn behoud van de functies veiligheid, toegankelijkheid natuurlijkheid, bij een (versneld) stijgende zeespiegel en indachtig de toekomstige veranderingen in het getij?”

Ontwikkelen systeembeschrijving voor grootschalig gedrag

Dit rapport stelt voor de beantwoording van beheervragen een beschrijving op over het grootschalige systeemgedrag, meer precies over de grootschalige waterbeweging (getij-indringing) en morfologie (sedimentvoorraden, geulomvang). Deze beschrijving draagt ook bij aan antwoorden op vraagstukken vanuit beleid en beheer over de ontwikkeling van het getij en de mogelijkheid deze te beïnvloeden⁴.

Het programma LTV V&T wil met de systeembeschrijving een doorslaggevende bijdrage leveren aan de operationalisering van beleid- en beheerdoelen naar te behouden fysische systeemkenmerken, waaronder de aandrijvende, grootschalige aspecten zoals sedimentvoorraden en de ontwikkeling van de getij-indringing.

De ‘evaluatiemethodiek Schelde-estuarium’ (Holzhauer et al, 2011) geeft de nu richtinggevende uitwerking van de fysische systeemkenmerken, in meetbare indicatoren, gericht op alle drie de LTV-functies. De uitgewerkte aspecten van morfologie en getij als onderdeel van de LTV-functie ‘natuurlijkheid’ zijn samengevat in Tabel 1.1 en Tabel 1.2.

Schaal	Getij / waterbeweging	‘Vorm’ / dynamiek	Sedimentvoorraden
Grootschalig	Amplificatie, asymmetrie		Sedimentinhoud westelijk deel, uitwisseling kustfundament
Bochtgroep als geheel		Areaal intergetijde-gebied vs breedte-diepteverhouding	Zandhuishouding van een bochtgroep
Macroschaal	Bruto sediment-transportcapaciteit		Volume en dimensies geulen
Mesoschaal		Dynamiek kortsluitgeulen	

Tabel 1.1: uitwerking ‘plaat- en geulsysteem’ voor meergeulensysteem in ‘evaluatiemethodiek Schelde-estuarium

4. Het begrip van het getij staat centraal in de offerteaanvraag van MOW-AMT die mede basis is van LTV V&T.

Habitats
Sublitoraal
- hoogdynamisch
- laagdynamisch
Litoraal
- hoogdynamisch
- laagdynamisch
* laag gelegen
* middelhooggelegen
* hooggelegen
Pionierschor
Schor

Tabel 1.2 uitwerking 'leefgebieden' in de 'evaluatiemethodiek Schelde-estuarium

1.3 Antwoorden geven met gebruik van een conceptueel model

Dit rapport levert een systeembeschrijving voor de grote schalen van tijd en ruimte, in de vorm van een conceptueel model van waterbeweging en morfologie en de interactie daartussen. Dit geeft een instrument voor de operationalisering van het doel 'in stand blijven van de fysische systeemkenmerken'.

Meer precies levert dit rapport systeemkennis over:

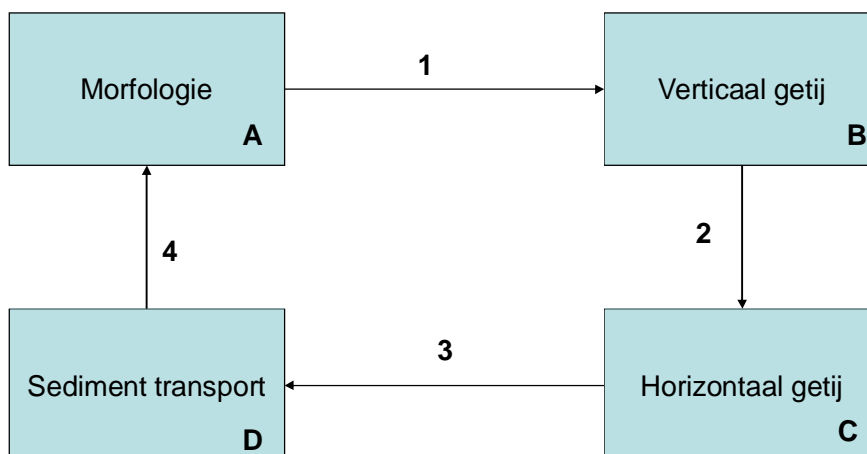
- (i) grootschalig sedimenttransport, binnen het estuarium en tussen estuarium en monding,
- (ii) de grootschalige ontwikkeling van het getij (niet tijdens extreme situaties),
- (iii) de samenhang tussen bodem en getij.

De ambitie is voldoende inzichten, breed wetenschappelijk gedragen⁵, aan beleid en beheer te geven om grootschalige strategieën te kunnen vaststellen. Dit rapport maakt die stap naar kwalitatieve effectvoorspelling van maatregelen in paragrafen 3.7 (met bijlage 2) en 6.3.

5. Draagvlak onder deskundigen (van diverse disciplines) is een belangrijk doel. De complexiteit van het functioneren van een estuarium betekent dat bij modelstudies altijd onzekerheden en bandbreedtes overblijven. Als interpretaties daarvan te veel discussie oproepen zal de geleverde kennis moeilijker bruikbaar blijken voor beleid en beheer. Zie bijvoorbeeld de juridische procedures rond de vergunningverlening voor de laatste verruiming (b.v StAB, 2008).

2 Theoretische beschouwingen

Dit hoofdstuk vat bijlage 1 samen en geeft theoretische beschouwingen om de veranderingen van het getij (LTV V&T-rapport G-1) te kunnen relateren aan de morfologische veranderingen (LTV V&T-rapport G-2). Dit wordt gedaan via de in Figuur 2.1 aangegeven grootheden en relaties.



Figuur 2.1: behandelde grootheden en relaties in dit hoofdstuk

De voortplanting (1) van de getijgolf in het estuarium (B) wordt bepaald door de bodem (A). Het resulterende verticale getij (waterstanden, B)⁶ leidt (2) tot een horizontaal getij (stroomsnelheden, C). Door asymmetrie in stroomsnelheden zullen de transporten tijdens eb en vloed (3) ongelijk zijn en is er sprake van netto transport (D) in een bepaalde richting. Dit betekent weer dat er veranderingen (4) in de morfologie (1) worden geïnduceerd.

In bijlage 1 wordt eerst een aantal basisbegrippen over het getij uiteengezet (B, 2 en C in Figuur 2.1). Vervolgens wordt dit vertaald in netto sedimenttransport (3 en D in Figuur 2.1). Daarna wordt de invloed van de morfologie op het getij (1 in Figuur 2.1) besproken. Vervolgens wordt de stap gemaakt naar een meergeulenstelsel en een schaalniveau lager (de macrocel). Er wordt dan ingegaan op de circulatie binnen een macrocel. Om de grote complexiteit die dan bereikt is te kunnen hanteren wordt gebruik gemaakt van een aantal empirische relaties tussen hydrodynamische en morfologische grootheden.

(Bij 1 en B): Amplificatie

In LTV V&T-rapport G-1 is over twee aspecten van het getij (amplificatie en asymmetrie) gerapporteerd. Toepassing van een analytisch model laat zien dat de amplificatie⁷ van het getij vooral gevoelig is voor de diepte van de geulen en de relatieve omvang van intergetijdegebieden van het estuarium. Historische ontwikkelingen van het getij kunnen

-
6. Let op dat verandering van de getijamplitude zeker geen symmetrische verandering van het laag water en het hoog water hoeft te betekenen. Verruimingen en verdwijnen van intergetijdegebieden hebben in verschillende estuaria (Eems, Loire en ook de Schelde) relatief meer invloed gehad op het laag water (LTV-V&T rapport G-14).
 7. Er zal meestal een andere amplificatie van het getij waar te nemen zijn bij dood- en springtij. De amplificatie van het doottij is meestal sterker, omdat de wrijving kwadratisch toeneemt met de stroomsnelheid. De grotere stroomsnelheid tijdens springtij zorgt voor meer energiedissipatie en dus een zwakkere amplificatie van het getij.

daardoor redelijk verklaard worden (Van Rijn, 2011, LTV V&T-rapporten G-5, G-8 en G-14). Berekningen met het Delft3D model (LTV -V&T-rapport G-4) bevestigen dit ook.

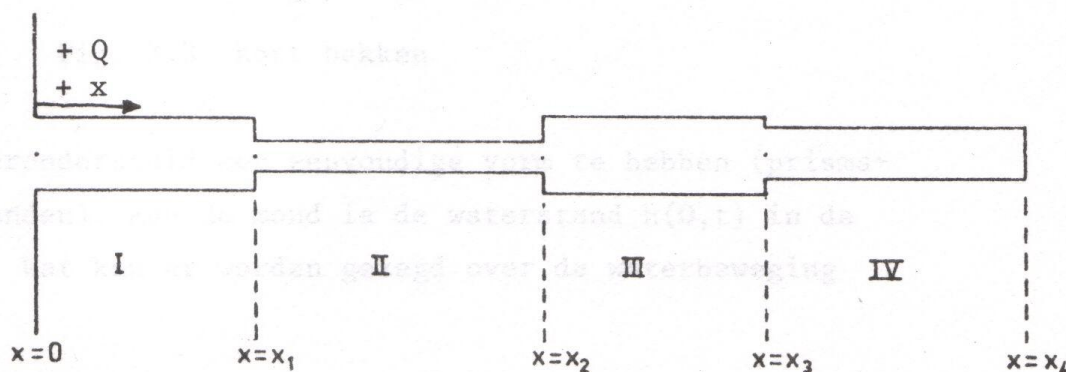
In wezen kan de morfologie teruggebracht worden tot twee factoren. Dit zijn de komberging en het stroomvoerende vermogen. De komberging bepaalt de hoeveelheid water die nodig is om tot een waterstandverandering te leiden. Het stroomvoerende vermogen bepaalt hoe makkelijk of moeilijk het water aan- en afgevoerd kan worden. Het getij op een bepaalde plaats langs het estuarium is voor wat betreft komberging vooral afhankelijk van het landwaartse deel en voor wat betreft het stroomvoerende vermogen van het zeewaartse deel. Komberging en stroomvoerend vermogen zijn zelf ook weer afhankelijk van de waterstand.

Voor het Schelde-estuarium zijn zowel veranderingen in intergetijdegebieden als geulen van belang voor de ontwikkeling van de amplificatie van het getij. Verhoging van de platen leidt tot afname van de komberging. Verruiming van geulen leidt tot vergroting van het stroomvoerende vermogen. In principe hebben beiden een versterkend effect op de amplificatie van het getij, maar de invloed via de komberging van de verhoging van de platen is in de situatie van het Schelde-estuarium veel kleiner. Daarnaast speelt dat ophogende platen ook als berging voor sediment fungeren (dat daarmee niet meer in de geulen kan liggen). Zie ook Hoofdstuk 3 en 4.

(Bij 1 en B): asymmetrie

De verandering in de tijd van de asymmetrie van het getij in het estuarium kan niet alleen door de verandering van de diepte worden verklaard. Het blijkt essentieel te zijn dat verschillende 'mate van trechtering' (lees afname van doorstroomoppervlakte in stroomopwaartse richting, uitgedrukt in de zogenaamde convergentielengte) bij hoog en laagwater worden toegepast. Fysisch betekent het dat vooral de veranderingen in de intergetijdezone erg belangrijk zijn voor de ontwikkeling van de asymmetrie van het getij. Zie ook bijlage 3.

(Bij 2, 3, D en 4)



Figuur 2.2 : Schets van een lang bekken met verwaarloosbaar rivierafvoer bovenstrooms

In bijlage 1 is getoond, met behulp van Figuur 2.2, dat het horizontale getij bij een bepaalde raai beïnvloed wordt door het verticale getij in het hele gebied landwaarts van de raai. Als er vloeddominant verticaal getij op een punt (x_1) optreedt, draagt dit bij aan vloeddominant horizontaal getij benedenstrooms daarvan (hier: sectie I). Het is echter wel de optelsom van al het bovenstrooms optredende verticale getij (x_1, x_2, x_3 etc) dat het uiteindelijke gedrag van het horizontale getij (hier: in sectie I) bepaalt. Dus: als ter plaatse van $x=x_2$ en ter plaatse van $x=x_3$ verschillende ontwikkelingen zijn, kan niet zonder meer gezegd worden in welke richting het horizontale getij in sectie I zich ontwikkelt.

In Bijlage 1 is ook uitgewerkt dat de asymmetrie in stroomsnelheden een factor twee sterker is dan de asymmetrie in waterstanden. Ook is uiteengezet dat de componenten van het getij met hogere frequentie, door hun meerdaags voorkomen, relatief belangrijker worden. Tenslotte is besproken dat er netto transport van sediment is als gevolg van reststroomsnelheid (maar klein bij de Schelde vanwege beperkte bovenafvoer), Stokes drift, horizontale circulatie (verschillen tussen diepe en ondiepe delen) en estuariene circulatie (als gevolg van zoutgradiënt en dichtheidsstroming).

Het voorafgaande, plus het feit dat het netto sedimenttransport in een estuarium als dat van de Schelde het kleine verschil tussen het veel grotere vloed- en ebtransport is, maken dat de morfologische evolutie (4 in Figuur 2.1) vanuit procesbeschouwingen lastig nauwkeurig te bepalen is, vooral op kleinere ruimteschaal.

Hoewel het Delft3D model (LTV -V&T G-4) niet de ontwikkelingen van het netto sedimenttransport door het estuarium afgeleid uit de data precies kan weergeven, is de berekende trend van de verandering wel goed. De berekende verandering van het netto sedimenttransport blijkt inderdaad goed te correleren met de verandering in de getijasymmetrie.

De resultaten van de Delft3D berekeningen (LTV -V&T G-4) benadrukken verder het belang van de reststroomsnelheid voor het netto sedimenttransport. Daaruit komt een consistente trend in de ontwikkeling naar voren: De verruiming van het estuarium in de tijd heeft het karakter van het getij veranderd in de richting van staande golf. Dit heeft als gevolg dat het effect van Stokes drift minder wordt. Hierdoor wordt de reststroomsnelheid in ebrichting minder sterk. Dit effect blijkt belangrijk te zijn om de veranderingen van het berekende netto sedimenttransport, vooral in het middendeel van de Westerschelde, te kunnen verklaren.

De asymmetrie van het getij in een trechtervormig estuarium is, net als de amplificatie, ook bestudeerd met een analytisch model. Dit is gerapporteerd in LTV V&T-rapport G-8.

Schaalniveau lager: stabiliteit

Bijlage 1 beschrijft na de theoretische beschouwing, hoe de ontwikkelingen van het getij (LTV V&T-rapport G-1) en morfologie (LTV V&T-rapport G-2I) van invloed zijn op de stabiliteit van het meergeulensysteem. De versterking van de amplificatie van het getij (geconstateerd in LTV V&T-rapport G-1) blijkt gunstig voor de stabiliteit van het meergeulensysteem. Sterkere amplificatie betekent namelijk een groter verschil tussen de getijamplitudes op de twee einden van een macrocel. Dit bemoeilijkt de vorming van een hydraulisch wantij / drempel in de nevengeul. Wanneer zo'n wantij optreedt kan dit leiden tot degenereren van een geul en instabiliteit van (een deel van) het meergeulensysteem. Hier staat tegenover dat de versnelling van de voortplanting van het getij in het estuarium ongunstig is voor de stabiliteit. Dit leidt namelijk tot verkleining van het faseverschil tussen de twee einden van een macrocel. De ontwikkeling van het getij leidt dan ook niet tot eenvoudige conclusies over de stabiliteit van een meergeulensysteem.

Morfologische ontwikkelingen geven ook inzicht in de stabiliteit. De relatie tussen de invloed van de lengte van een plaat en de ligging van wantijen / drempels is in een andere studie, voor de Waddeneilanden, uitgewerkt (Vroom, 2011). Dit onderbouwt de hypothese dat de lengte van de plaat een belangrijke parameter is voor de stabiliteit van het systeem. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat het aan elkaar groeien van de plaatcomplexen negatieve invloed heeft op de stabiliteit van het meergeulensysteem.

Consequenties voor de observaties van LTV-V&T-rapport G-2:

Kijken wij naar de morfologische ontwikkelingen dan hebben vooral de ontwikkelingen van de platen invloed op de stabiliteit. Het gaat om het feit dat ze hoger zijn geworden en meer aan elkaar zijn gegroeid (verdwijnen van kortsluitgeulen). Deze ontwikkelingen maken een cel effectief langer.

De ontwikkelingen van de platen hebben ook invloed op de circulatie binnen een macrocel. Er is geconstateerd dat de circulatie door de vloed- en ebgeulen van de reststroming in de tijd is afgenomen. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de genoemde ontwikkelingen van de platen

Een mogelijke verklaring kan zijn dat de circulatie ontstaat door het feit dat de plaat tijdens vloed overstroomd wordt vanaf vooral de zijde van de vloedgeul en dat het water boven de plaat tijdens eb vooral afgevoerd wordt naar de ebgeul. Door de verhoging van de platen en de verdwijning van de kortsluitgeulen wordt deze rondstroming minder. Hoe het precies werkt is niet voldoende bekend om op deze plaats nadere conclusies te kunnen geven.

Deze hypothese wordt niet ontkend door de numerieke simulaties die in LTV V&T zijn uitgevoerd met Delft3D (zie LTV -V&T G-4, LTV -V&T K-20).

Empirische verbanden tussen hydrodynamica en morfologie

Ook empirische relaties voor morfologisch evenwicht helpen de interactie tussen morfologie en het getij te begrijpen en worden gebruikt in het conceptuele model (hoofdstuk 3).

Empirische relaties zijn beschikbaar voor:

- evenwichtsoppervlak van het dwarsprofiel van een geul met het getijvolume;
- evenwichtshoogte van het intergetijdegebied met de getijslag.

De eerste relatie is bijna lineair, de tweede is een lineaire relatie. Ze vormen mede de basis voor lange-termijn morfologische modellen als ASMITA en ESTMORF.

3 Conceptueel model werking van het systeem

3.1 Inleiding

Het conceptuele model is gebaseerd op de principes van getij en morfologie, toegespitst op het Schelde-estuarium en, gezien de kaders van dit rapport, vooral de Westerschelde. Het model beschrijft de relaties tussen de morfologie (de vorm van het estuarium) en het getij en wordt gebruikt om de waarnemingen die gerapporteerd zijn in andere LTV V&T-rapporten (G-1, G-2, G-3, G-5, G-6 en G-8) te verklaren. Hierbij worden ook empirische relaties gebruikt. Het beschrijven van de positieve (versterkende) en negatieve (dempende) terugkoppelingen, op verschillende schaalniveaus is een belangrijk doel van het conceptuele model.

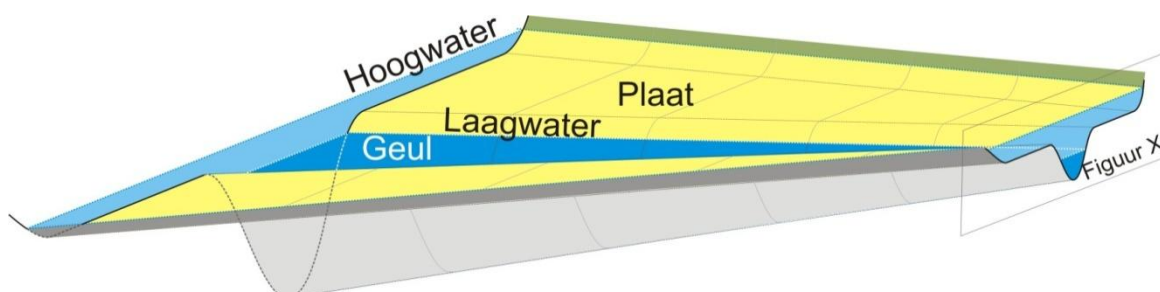
Het stelsel van terugkoppelingen is complex, want er zijn veel grootheden en processen⁸ die de waterbeweging bepalen. De waterbeweging bepaalt vervolgens weer mede de morfologische ontwikkeling (zie Figuur 2.1). Die ontwikkeling wordt ook in belangrijke mate, zie hoofdstuk 4, direct door morfologisch beheer gestuurd. Tenslotte moet worden begrepen dat ook 'toeval' belangrijk blijft in de morfologische ontwikkeling, zeker op kleinere ruimteschalen.

Dit maakt dat een te presenteren generiek conceptueel model alleen op relatieve hoofdlijnen en voor relatief grootschalige effecten opgesteld kan worden. Het is dan ook alleen toepasbaar voor afwegingen in de beheersstrategie op grote schaal, zoals zandwinning, keuzes in storten tussen macrocellen (zoals de oost-west-strategie eind vorige eeuw) en de afweging of vaker hoog (plaatranden) of laag (geulen) in het profiel gestort moet worden.

Het conceptuele model wordt in dit hoofdstuk beperkt beschreven op kleinere schaalniveaus. Het moet echter verder, en gebiedsgericht, uitgewerkt worden om bruikbaar te zijn in een specifieke macrocel of locatie daarbinnen. Dit kan door voort te bouwen op de aanzetten die de MER (Consortium Arcadis-Technum, 2007a) en 'alternatieven natuurherstel' (Deltares, 2011) geven. Dit gebeurt in de LTV V&T-rapporten K-16 en K-17 en kan, bij specifieke beheervragen en locaties, verder uitgewerkt worden met behulp van numerieke modellering⁹.

3.2 Terugkoppelingen tussen getij en morfologie op megaschaal

Op mega-schaalniveau is het estuarium beschreven als een trechtersvormig systeem: een geul geflankeerd door een 'intergetijdeplaat', zie Figuur 3.1. Dit is gedaan en uitgewerkt in de LTV V&T-rapporten G-5, G-7 en G-8).

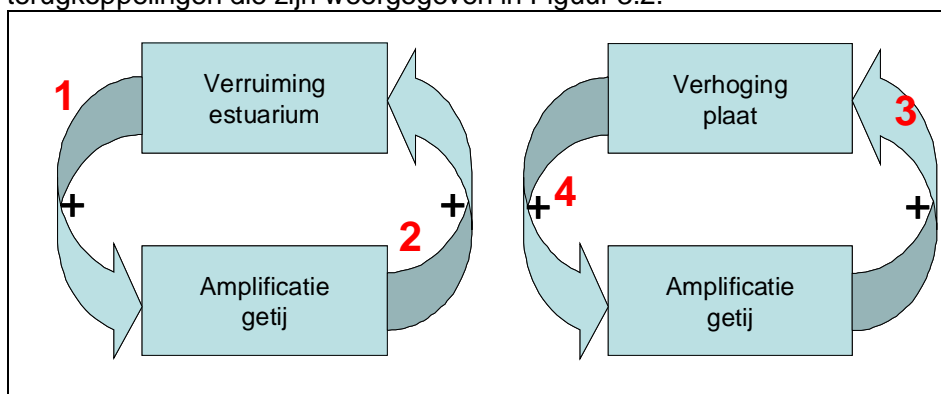


Figuur 3.1: Megaschaal schematisatie van het Schelde-estuarium

-
8. Diepten, stroomvoerende breedten en bergende breedten en oppervlakten, weerstand, traagheid, berging (horizontaal + verticaal), vervallen/verhangen, fase- en watersnelheden, etc.
9. Een goed instrumentarium is beschikbaar gemaakt, zie LTV V&T-rapport A-26 en A-27

Deze beschrijving voldoet voor het begrijpen van ontwikkelingen in getijslag en vorm van het 'estuarium als geheel'. Voor de vorm zijn de geuldiepte, intergetijdegebieden (omvang en hoogte) en de mate van convergentie (sterkte van de trechtervorm) de bepalende factoren.

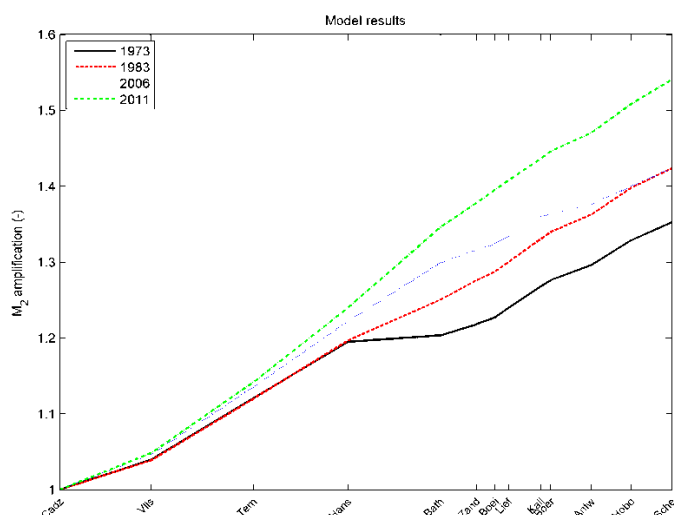
Op het schaalniveau van het gehele estuarium (megaschaal) spelen de positieve terugkoppelingen die zijn weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Terugkoppeling tussen morfologie en getij op mega-schaal

De pijlen in Figuur 3.2 suggereren een risico op instabiliteit. Met behulp van Figuur 3.5 en Figuur 3.6 wordt uitgelegd waarom dit niet plaatsvindt en dat het Schelde-estuarium met de huidige geometrie niet in een instabiele toestand raakt en naar een ander evenwicht gaat.

Het linker deel van Figuur 3.2 laat zien dat een verruiming van het estuarium (meer doorstroomoppervlakte, door menselijke of natuurlijke oorzaken) en een amplificatie van het getij elkaar versterken in het estuarium. Dat een verruiming leidt tot sterkere amplificatie van het getij (pijl 1) volgt onder meer uit Van Rijn (2011). LTV-V&T-rapport G-5 onderbouwt dit verder met resultaten van een eenvoudig 1D-model van de Schelde.



Figuur 3.3 Amplificatiefactor t.o.v. Cadzand, berekend door Delft3D met bodemligging van verschillende jaren.

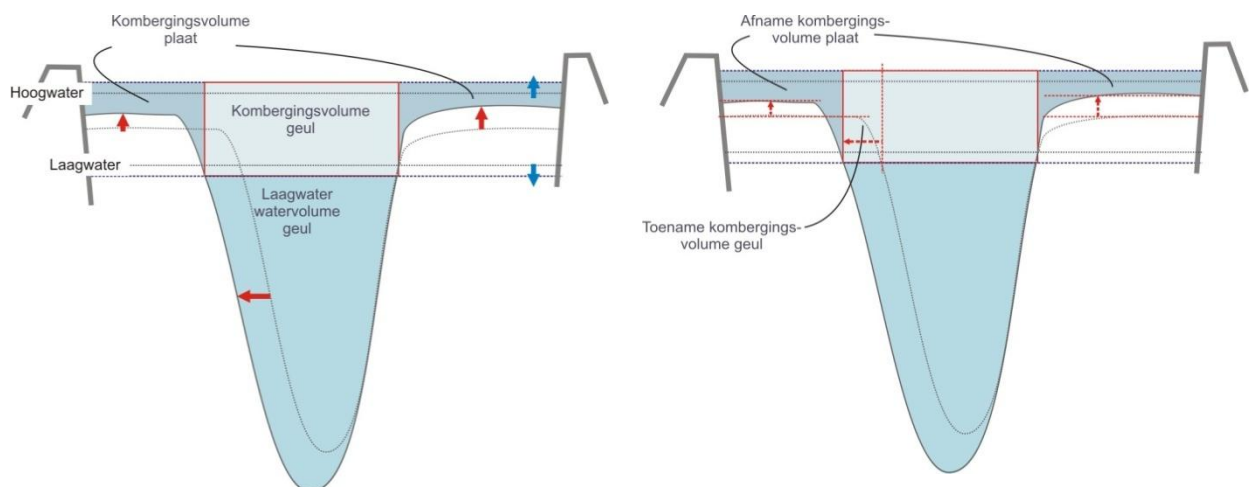
Een sterkere amplificatie van het getij leidt tot groter getijvolume vanwege een toename van de komberging. Hoeveel dat exact is hangt af van de lokale geometrie. Dat leidt in theorie direct tot hogere stroomsnelheden (er moet meer water door de doorsneden). Echter, toegenomen snelheden betekenen meer bodemwrijving en dus meer energiedissipatie, wat de getijslag weer vermindert. Wanneer een geul tegelijkertijd verruimt, hoeft de snelheid niet omhoog te gaan en blijft de toegenomen energiedissipatie achterwege. Op termijn leidt een

toegenomen getijvolume (die niet alleen door toename getijslag veroorzaakt hoeft te zijn) altijd, volgens bekende empirische relaties (zie bijlage 1), tot vergroting van het dwarsprofiel.

De Delft3D resultaten waarmee de waterbeweging van een viertal historische bodems zijn geanalyseerd (Figuur 3.3, uit LTV -V&T G-4) ondersteunen deze beschrijving. Tussen 1973 en 1983 is versterking van het getij vooral ten oosten van Hansweert opgetreden¹⁰. Deze verandering van het getij heeft daarna morfologische veranderingen veroorzaakt die ook in het westelijke deel van de Westerschelde zijn opgetreden. Dat heeft weer geleid tot veranderingen van het getij in de rest van het estuarium.

Het rechter deel van Figuur 3.2 laat zien dat een sterkere amplificatie van het getij en een verhoging van de platen in het estuarium elkaar ook versterken. Dat meer amplificatie leidt tot hogere platen (pijl 3) volgt uit een empirische relatie tussen plaathoogte en getijslag (zie bijlage 1). Het is wel de vraag hoe groot de toepasbaarheid van deze evenwichtsrelatie in de Westerschelde is. Er kunnen andere processen domineren¹¹.

De verhoging van de platen ook weer leidt tot sterkere amplificatie van het getij (pijl 4) is beschreven in hoofdstuk 2 van dit rapport en LTV V&T –rapporten G-5 en G-7. Dit gebeurt omdat door hogere platen in de betreffende sectie minder water de geul kan verlaten. Overigens is het effect van ruimere geulen (linker deel van Figuur 3.2) veel belangrijker in de Westerschelde, gezien de grootte van het estuarium en de volumes waar het bij de berging op de platen om gaat. Te sterke verhoging van platen heeft vooral relevante negatieve ecologische gevolgen (zie verder LTV-V&T-rapport K-16).



Figuur 3.4 De veranderingen in getijslag, oppervlakte geulen en verhoging platen in dwarsdoorsnede

In Figuur 3.4 geven de rode pijlen de veranderingen in de bodem aan, met de schematisatie van Figuur 3.1. De geulen zijn groter (ruimer) en de platen hoger geworden. De blauwe pijlen

¹⁰ Bij de bodem van 1973 valt de beperkte amplificatie tussen Hansweert en Bath op. Dit volgt ook (zij iets minder sterk) uit waterstandsdata. Het zou verklaard kunnen worden door de stapsgewijze eerste verdieping. In 1973 was de drempel van Bath al verdiept, maar de drempels van Valkenisse en Hansweert nog niet (zie bijlage 3)

11. Een voorbeeld is de voortgaande ophoging van de Hooge platen, ondanks relatief weinig wijzigingen in de getijslag. Hier speelt de verminderde invloed van de geul ten zuiden (Vaarwater langs de Hoofdplaat) waarschijnlijk een rol en mogelijk ook opbouwende werking van de golven uit de Noordzee. Een ander voorbeeld is het feit dat de slikken niet in hoogte zijn toegenomen, terwijl dit op basis van de geschetste relatie in eerste instantie wel verwacht wordt. Dit onderstreept de noodzaak het conceptuele model voor macrocellen en op mesoschaal te verfijnen. Zie verder paragraaf 3.5 en de LTV V&T-rapportages K-16 en K-17).

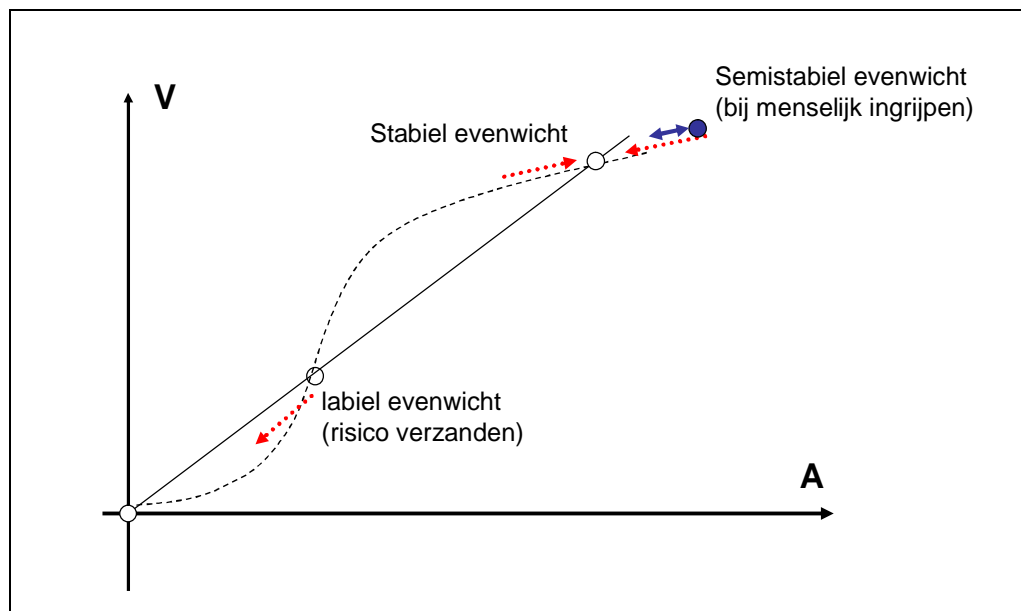
geven de veranderingen in de waterstanden (getijslag wordt groter). In het rechter deel van de figuur zijn de gevolgen van de veranderingen voor het volume komberging van geul en plaat geschetst. De komberging neemt toe door de toename van de getijslag. Merk op dat tegelijkertijd de komberging boven de plaat afneemt door zowel de plaatverhoging, als de afname van het oppervlakte plaat (dit wijzigt in komberging boven de verruimde geul).

De hiervoor beschreven ontwikkelingen en terugkoppelingen zijn ook te zien in het Schelde-estuarium, maar ze leiden niet tot instabiliteit op systeemchaal. Dat komt omdat er ook dempende werkingen zijn. Die worden besproken aan de hand van Figuur 3.5 en Figuur 3.6 (waarin ze ook als mintekens verschijnen).

De eerste dempende relatie is die tussen de dwarsdoorsnede (A , natte doorsnede) en het getijvolume (V). Deze heeft de vorm V/A (zie vergelijking 6 van bijlage 1). Wanneer beide termen toenemen zal het morfologisch-hydrodynamisch systeem reageren door via sedimentatie of erosie terug te gaan naar een (nieuw) stabiel evenwicht met dezelfde verhouding V/A . Grafisch is dit uiteengezet in Figuur 3.5 met rode pijlen richting het punt met 'stabiel evenwicht'. Het weergegeven 'labiel evenwicht' heeft geen betrekking op de grote geulen in de Westerschelde.

De hiervoor genoemde dempende relatie is via pijl 1 in Figuur 3.6 ingebracht. Een tweede en vergelijkbare dempende relatie (pijl 2) is er tussen plaathoogte en getijslag. Hierbij speelt dat de relatie van getij richting plaathoogte redelijk linear is, terwijl er omgekeerd een veel zwakkere relatie is.

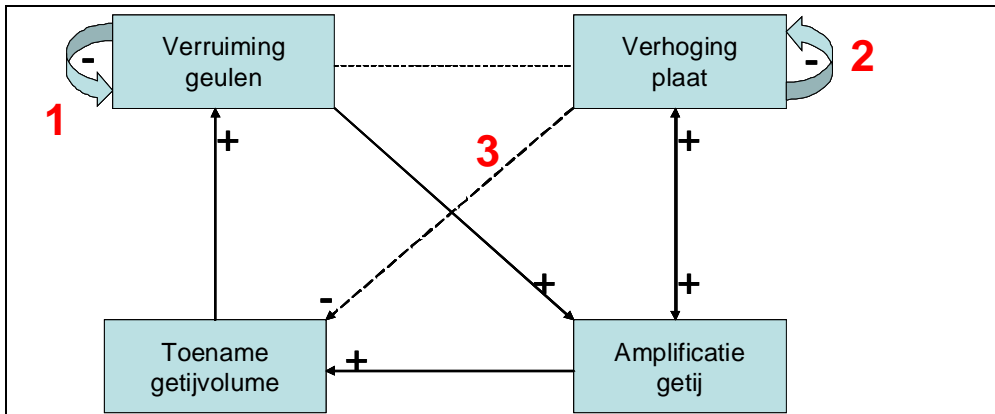
De derde dempende terugkoppeling (pijl 3 in Figuur 3.6) is dat verhoging van platen leidt tot verkleining van getijvolume bij dezelfde getijslag (zie ook Figuur 3.4), waardoor de verruiming van geulen weer wordt geremd. Hierboven stond dat de rol van verandering in de plaathoogte op het getij in de praktijk klein is, zeker in verhouding tot de geulen.



Figuur 3.5: Stabiliteit dwarsdoorsnede (A) en getijvolume (V)

Deze dempende terugkoppelingen geven een beschrijving van de veranderingen in dwarsdoorsnede en getijvolume bij een verruiming door menselijke ingrijpen. Dit ingrijpen leidt (direct) tot verdere amplificatie van het getij (een directe aanpassing van de waterbeweging op de bodemvorm). De stroomsnelheden en transportcapaciteiten veranderen en de demping met nummer 1 van Figuur 3.6 treedt op. Het daaropvolgende

vaargeulonderhoud houdt het systeem echter in een nieuwe (semistabiele) situatie die echter 'uit evenwicht is' op basis van de empirische relaties (blauwe punt en pijlen in Figuur 3.5).



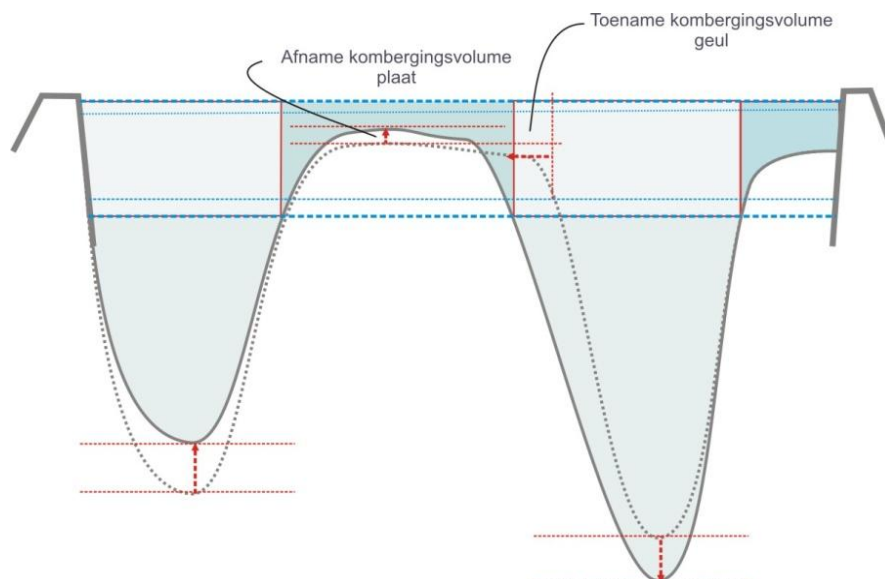
Figuur 3.6 Terugkoppeling tussen morfologie en getij op mega-schaal

3.3 Bronnen en putten van sediment en relatie met de terugkoppelingen

Op de grotere tijdschalen kan de sedimenthuishouding bestudeerd worden door de bronnen van het sediment (of de 'sources') en de plekken waar sediment wordt afgezet ('sinks') te beschouwen. De terugkoppelingen tussen waterstanden, doorstroomoppervlakte en veranderingen in komberging worden in LTV V&T-rapport K-17 systematisch beschreven. Die uiteenzettingen dragen bij aan het conceptueel model van dit hoofdstuk.

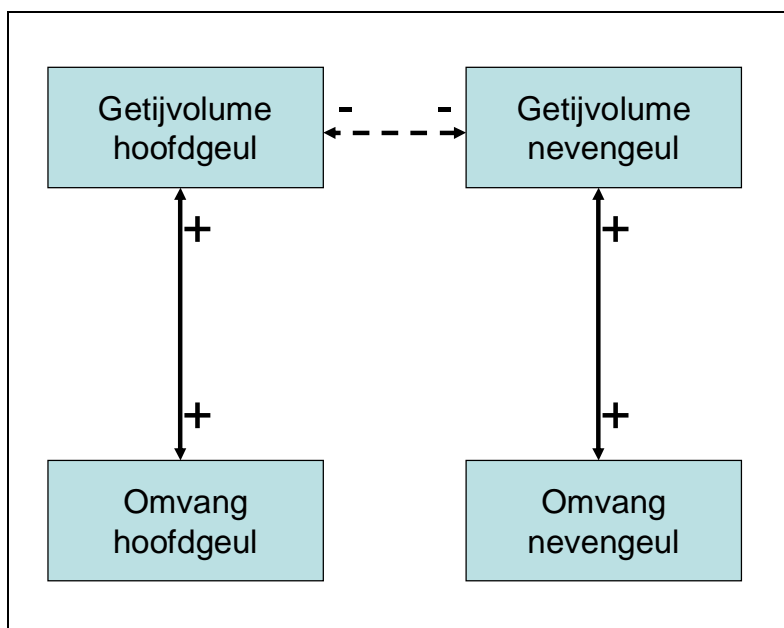
3.4 Terugkoppelingen getij en morfologie op niveau van de macrocel als geheel

Op macroschaal zijn er subsystemen van samenhangende eb- en vloedgeulen (hoofd- en nevengeulen), met tussenliggende intergetijdegebieden (Figuur 3.7). Het verschil met Figuur 3.4 is de uitwerking voor het 2-geulen systeem.



Figuur 3.7 Terugkoppeling tussen morfologie en getij in dwarsdoorsnede

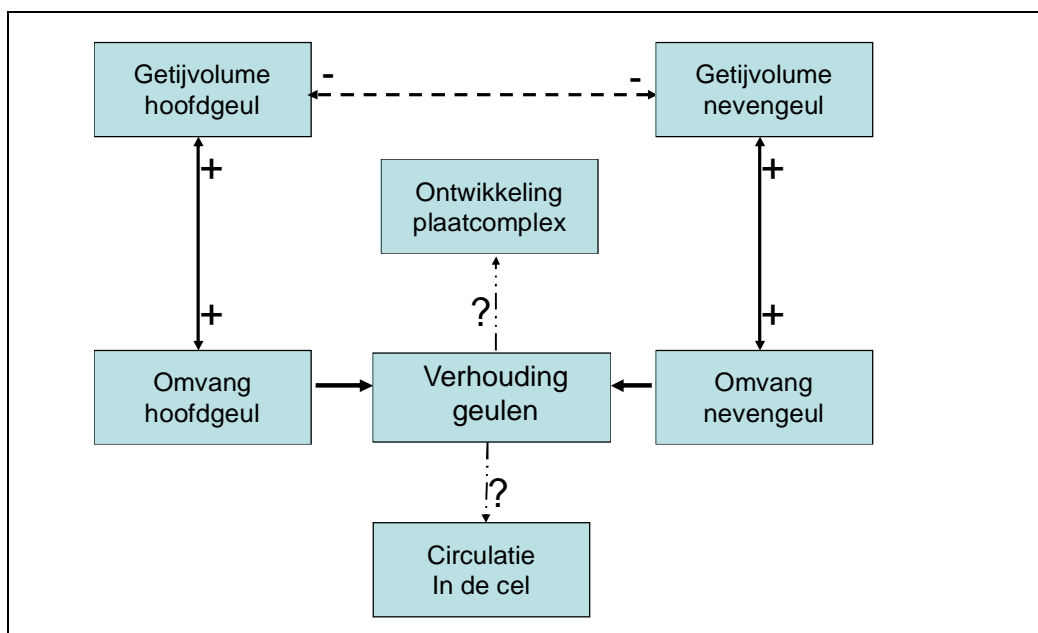
Nu worden een aantal andere terugkoppelingen geïntroduceerd, die een belangrijke rol spelen op het niveau van de macrocel



Figuur 3.8 Terugkoppeling ontwikkeling morfologie en waterbeweging op macroschaal

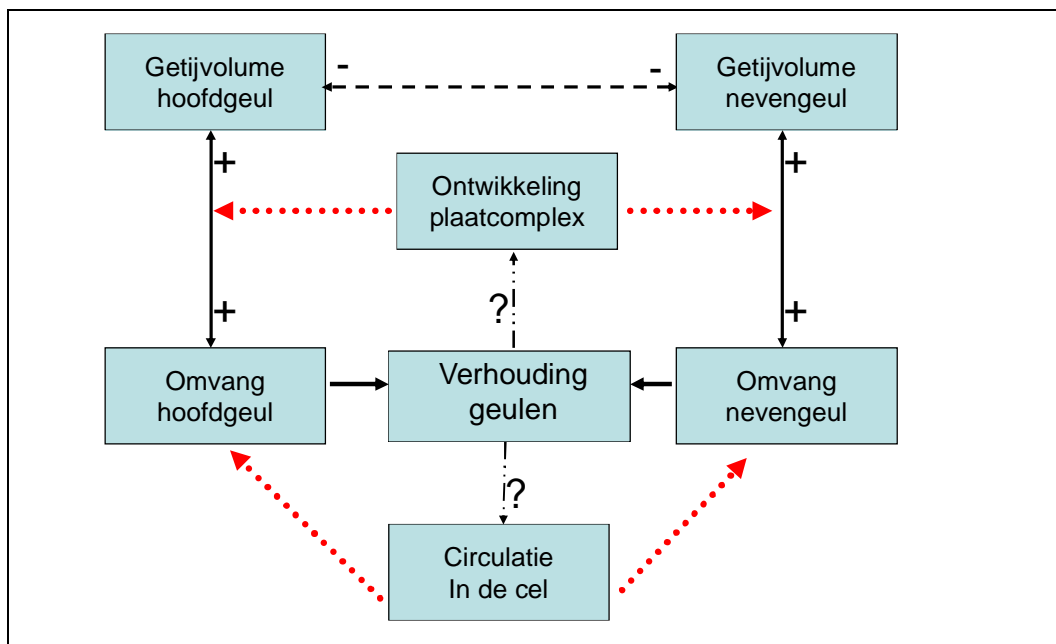
Figuur 3.8, Figuur 3.9 en Figuur 3.10 tonen, in toenemende complexiteit, de terugkoppelingen tussen de morfologische ontwikkeling en de waterbeweging op de schaal van de gehele macrocel. De figuren gelden binnen een macrocel, bestaande uit een hoofdgeul, een nevengeul en een plaatcomplex ertussenin.

Figuur 3.8 laat zien dat de omvang van beide geulen afhangt van het getijvolume door de geul. Aannemende dat het totale getijvolume door de twee geulen hetzelfde blijft (omdat de getijslag bovenstrooms in de eerste instantie door ontwikkelingen op mega-schaalniveau worden bepaald) betekent het groter worden van de ene geul een verkleining van de omvang van de tweede geul. Er is dus een onderling dempende werking tussen de getijvolumes door de twee geulen.



Figuur 3.9 Terugkoppeling ontwikkeling morfologie en waterbeweging op macroschaal

De ontwikkelingen van de twee geulen hebben zeker ook invloed op de (vloed – eb) circulatie binnen de cel (Figuur 3.9). Het is echter niet zonder meer te beredeneren hoe deze invloed is. Dit hangt af van de lokale morfologie. Hetzelfde geldt voor de invloed van de ontwikkelingen van de geulen op de ontwikkeling van het plaatcomplex (ook Figuur 3.9). Deze zaken kunnen verkend worden met een goed gekalibreerd en ingespeeld model. Deze zijn in LTV V&T beschikbaar gekomen op twee softwareplatforms, Finel en Delft3D (zie rapportages A-27 en A-28).



Figuur 3.10 Terugkoppeling ontwikkeling morfologie en waterbeweging op macroschaal

Figuur 3.10 toont dat het geheel van de terugkoppelingen binnen een macrocel nog complexer is. De ontwikkeling van het plaatcomplex zal invloed hebben op de omvang en verdeling van getijvolume door hoofd- en nevengeul.¹² Dit geldt ook voor de (veranderingen in de) circulatie in de cel. De figuur onderstreept aldus de moeilijkheid van het duiden van ontwikkelingen binnen de macrocel (mesoschaal) en de voorzichtigheid waarmee uitspraken daarover gedaan moeten worden.

3.5 Terugkoppelingen getij en morfologie binnen een macrocel (mesoschaal)

Op de mesoschaal beschouwen we de invloed van de individuele morfologische elementen die in de macrocel voorkomen. Hiermee is in Figuur 3.10 al een begin gemaakt.

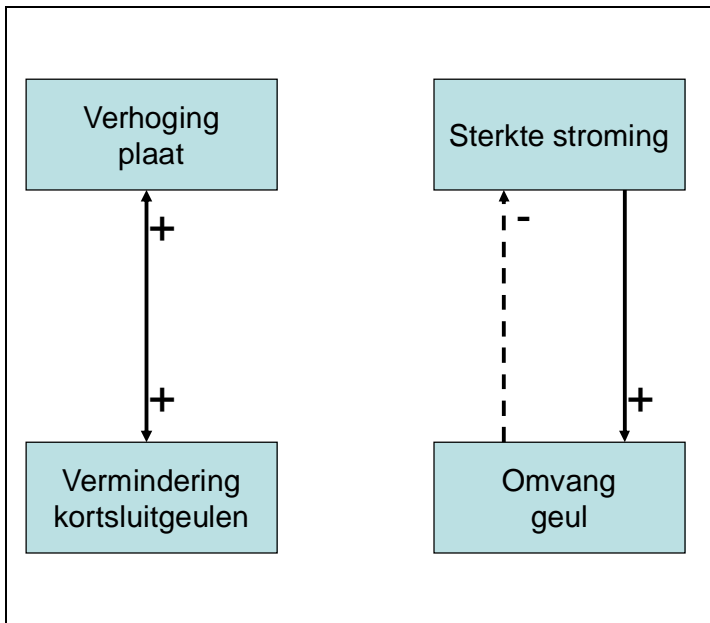
Ontwikkeling intergetijdegebieden tussen de geulen: platen

De laatste twee terugkoppelingen die worden geïntroduceerd spelen binnen de macrocel / op de mesoschaal. Het linkerdeel van Figuur 3.11 geeft het verband tussen de hoogte van platen en de ontwikkeling van kortsluitgeulen. Hogere platen belemmeren kortsluitgeulen. Omdat de migratie van kortsluitgeulen mogelijk bijdraagt aan het regenereren van platen is dit een ontwikkeling die zichzelf kan versterken. Verhoogde platen geven minder ontwikkelde kortsluitgeulen, wat weer bijdraagt aan verhoging van platen.

Het rechter deel van Figuur 3.11 toont een dempende terugkoppeling op de mesoschaal. De omvang van de geul wordt aanpast wanneer de debieten, en daarmee de stroomsnelheden,

12. Bv: mogelijk hebben meer onregelmatige platen een grotere dempende werking (onderzoeksvraag).

veranderen. Dit wijzigt de transportcapaciteiten voor sediment¹³ waardoor de geulomvang wordt aangepast. Hierin is aangenomen dat het getijvolume door een geul door ontwikkelingen op grotere schaalniveaus wordt bepaald. De verandering in de stroming leidt tot een nieuw evenwicht tussen stroming en dwarsdoorsnede. De geschetste dempende terugkoppeling heeft echter ook weer effecten voor de grotere schaal. Ze is een onderdeel van de pijlen met nummer 1 in Figuur 3.2 en Figuur 3.6.



Figuur 3.11 Terugkoppelingen op mesoschaal

3.6 Respons estuarium op zeespiegelstijging

De langjarige zandbehoefte is in het Nederlandse kustbeleid gebaseerd op de berekening “sedimentbehoefte = oppervlakte x zeespiegelstijging”. Dit gaat in geval van een getijdebekken alleen uit van een effect van zeespiegelstijging via komberging/getijprisma. Dit mechanisme is in empirische modellen als ASMITA opgenomen. Het effect van de zeespiegelstijging op de voorplanting van het getij is in die berekening echter niet meegenomen. Hierdoor is het gebruik voorbehouden aan korte getijdebekken, waarin de vervorming van de getijgolf slechts een beperkte rol speelt. Bij een lang, trechtervormig estuarium geldt dit niet omdat de zeespiegelstijging ook een effect heeft op de voortplanting van het getij.

Op basis van vooral de studies voor de Humber (EMPHASYS Consortium, 2000) zijn de volgende opmerkingen te maken over de respons van een lang estuarium op (versnelde) zeespiegelstijging:

- Een estuarium importeert minder sediment dan “oppervlakte van het estuarium maal zeespiegelstijging”, zijnde de hoeveelheid die nodig is om zeespiegelstijging te volgen volgens het model dat het kustbeleid hanteert. De oorzaak van de kleinere “sedimentvraag” is de toename in de komberging door de hogere zeespiegel in estuarium. Een groter getijvolume is het gevolg. Bij het grotere getijvolume horen ruimere geulen, zodat het estuarium zelf sediment beschikbaar maakt voor (een deel van) het volgen van de zeespiegel.

13. sterkere stroming door de geul leidt tot verruiming van de geul en omgekeerd

- De getijamplitude neemt ook toe door (versnelde) zeespiegelstijging, omdat er altijd overdiepte nodig is om extra sediment te importeren. De morfologie ijlt ook hier achter de waterbeweging aan, die de extra import van sediment moet veroorzaken. De grotere diepte van het estuarium betekent aldus sterkere amplificatie van het getij. Het 'laag water' volgt de zeespiegelstijging niet, het 'hoog water' wel.
- De zeespiegelstijging werkt niet gelijkmatig door in het gehele estuarium. Er zijn twee effecten en het hangt lokaal af welk effect wint. Effect 1: Een dwarsprofiel wordt groter door de zeespiegelstijging, wat neiging tot sedimenteren tot gevolg heeft (terug naar oude doorstroomoppervlakte). Effect 2: Het getijprisma bovenstreams neemt toe, dus de doorsnede heeft neiging tot eroderen. Bij 'nauwe' dwarsdoorsneden is de kans het grootst dat effect 2 'wint' en er erosie waarneembaar is. Bij ruime, brede raaien, zal effect 1 domineren en volgt sedimentatie.

De respons van de platen en slikken op zeespiegelstijging is voor de Westerschelde niet zonder meer te voorspellen. Het algemene principe is dat de hoogte van intergetijdegebieden het niveau van hoog water volgen (Eysink, 1990, 1992). Zo'n ontwikkeling is echter niet overal in het Schelde-estuarium te zien omdat de lokale omstandigheden veelal domineren. Het is daarom niet mogelijk om een voorspelling te geven over de effecten van zeespiegelstijging op platen en slikken, want het is niet uit te sluiten dat ook bij de toekomstige ontwikkelingen de lokale respons van slikken en schorren prevaleert.

LTV V&T-rapport G-11 bevestigt het bovenstaande. De rapportage over lange termijn (100 jaar) simulaties geeft uitkomsten volgens deze verwachtingen. De component M2 neemt toe en de (kleinere) componenten (M4, gebaseerd op de verschillen in hoog en laag water en M6, waarin de bij diepte afnemende wrijvingsterm een rol speelt) nemen af:

3.7 Reactie getij op ingrepen in de morfologie

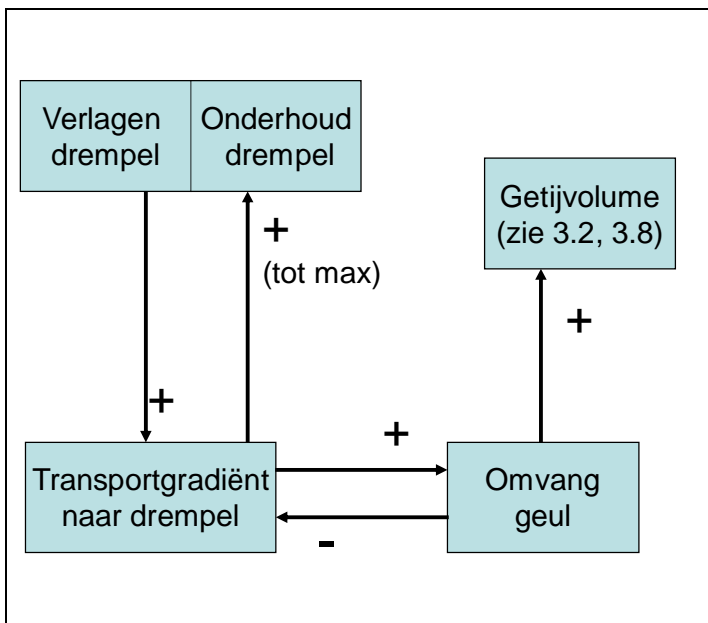
In het onderzoek naar 'alternatieven natuurherstel' (Deltares, 2011) zijn diverse wijzen van morfologisch beheer besproken als (een combinatie van) vier typen ingrepen, met hun invloed op de (grootschalige) waterbeweging. Dit is in bijlage 2 van dit rapport samengevat. Dit vult het conceptuele model uit dit hoofdstuk aan. Het totaal is toepasbaar voor de eerste, kwalitatieve evaluatie van de effecten van verschillende soorten morfologisch beheer, als dit gebaseerd is op 'werken met sediment' ('zachte' maatregelen).

Als aanvulling daarop is voor het conceptuele model nog een beschrijving nodig van terugkoppelingen tussen geulomvang en drempelonderhoud. Ook de mogelijkheid om via ingrepen in de monding het getij te beïnvloeden wordt in deze paragraaf verder besproken.

Ontwikkeling drempels en geulen bij verdieping en onderhoud

Een in omvang belangrijke ingreep is het verdiepen en onderhouden van drempels. Over de ontwikkeling van de drempels in de Westerschelde is uitvoerig gerapporteerd door Verbeek (1998). Een conceptueel model dat mede daarop is gebaseerd is getoond in Figuur 3.12. Het verduidelijkt ook dat het verwijderen van sediment tijdens de aanleg (de daadwerkelijke verdieping) niet gescheiden kan worden van het verwijderen van sediment tijdens onderhoud. Het vergroten van de doorstroomoppervlakte op een specifieke plek (de drempel) veroorzaakt op die locatie verlagingen in stroomsnelheid en daarmee in sedimenttransportcapaciteit. Hierdoor zal, dankzij de grote bruto transporten door getijstroming, sediment uit de nabijheid zich gaan herverdelen richting de drempel. Merk op dat de debieten door de hele doorsnede niet zullen veranderen, want deze worden bepaald door getij en grootschalige bodemligging. Ook veranderen de stroomsnelheden in de aanliggende delen niet (ongewijzigd debiet, ongewijzigd doorstroomoppervlakte in die delen). Een toename in de stroomsnelheden in die aanliggende delen is dus niet nodig om zand netto richting de drempel te doen verplaatsen.

Het is de afname van de stroomsnelheden op de drempel die de herverdeling aandrijft (zie ook Verbeek, 1998). Vanaf de drempel zal het sediment via onderhoud weer worden verwijderd. Dit veroorzaakt een gestage uitruiming nabij de verdiepte drempel. Uiteindelijk zal er een ruimere doorstroomoppervlakte over een groter deel van het estuarium ontstaan, met mogelijk grotere indringing van het getij.



Figuur 3.12 Terugkoppeling in geul na verdiepen en onderhoud drempel

Dit proces, dat onderhoudsbaggerwerk gekoppeld is aan langzame uitruiming van de aanliggende delen, is in de data van de geulomvang van de oostelijke macrocellen waar te nemen (zie paragraaf 4.2), evenals uit numerieke simulaties waarbij alleen het effect van het verdiepen en onderhouden van een enkele drempel werd bekeken (twee losse onderzoeken, voor de drempels van Bath en Hansweert, zie LTV V&T K-20). De resultaten laten zien dat deze lokale wijziging voldoende impact heeft om inderdaad aangrenzende delen te doen uitruimen. In paragraaf 4.4 wordt vastgesteld dat de trendbreuken in de ontwikkelingen van de geulen inderdaad lijken samen te hangen met start van verruimingswerken.

De aanzandingsnelheid van de drempels is echter niet gekoppeld aan de mate van verdieping. Kornman et al (2002) beschreven dat uitgevoerde verdiepingen tot veel minder toename in baggeronderhoud leidden dan was verwacht. Hieruit volgde de veronderstelling dat er sprake is van een maximale transportcapaciteit richting de drempels. Dit past ook bij de observatie dat de daar onderzochte stortplaatsen relatief weinig invloed op het baggerbezwaar leken te hebben. Deze observatie is in Figuur 3.12 opgenomen door de toevoeging 'max' richting drempelonderhoud. De gehele redenatielijn uit Kornman et al (2002) past ook anderszins bij de terugkoppeling die Figuur 3.12 toont, want de aanzanding van de drempels blijkt noodzakelijkerwijs niet van stortplaatsen afkomstig hoeven te zijn. Het is veel waarschijnlijker dat het materiaal van de stortplaats zich herverdeelt over de nabije omgeving, afhankelijk van de lokale hydrodynamica (hieronder).

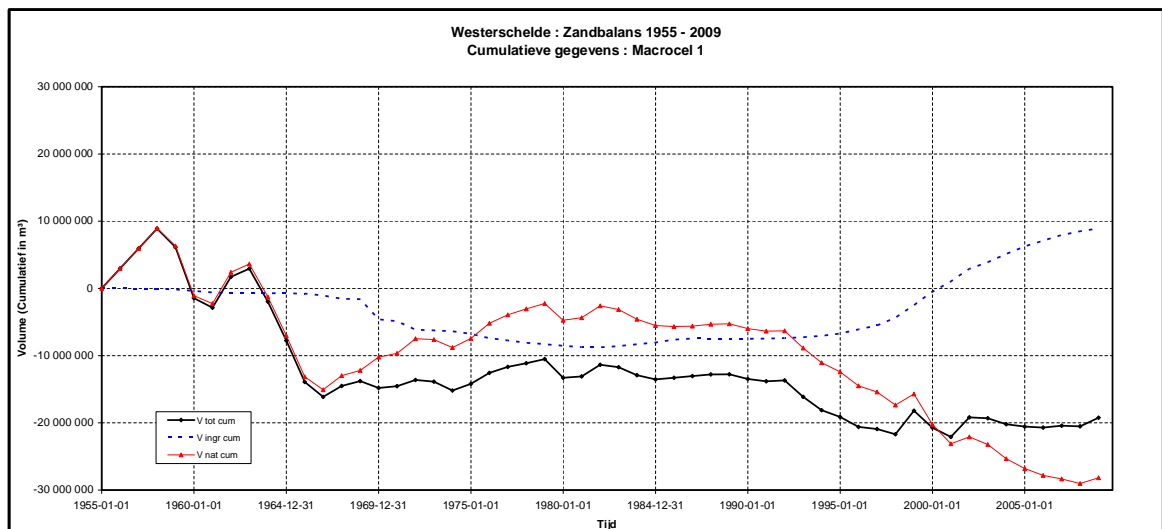
Herverdeling gestorte specie

Gestort materiaal zal zich kunnen verspreiden, afhankelijk van de lokale hydrodynamica. Het leidt te ver om hier alle mechanismen op mesoschaal te bespreken. In de rapportages LTV V&T K-20, B-21 en B-22 worden verschillende stortplaatsen besproken. Het is duidelijk dat

actievere hydrodynamica (zoals in turbulente putten) leidt tot snellere verspreiding (zie onder meer IMDC, 2012).

Op een groter schaalniveau kan de herverdeling soms wel met succes met een eenvoudig conceptueel model beschreven worden, gebaseerd op 'meer erin is meer eruit'. Dit principe lijkt van toepassing op macrocel 1. Hier is gedurende 10-15 jaar, vanaf ca. 1995 netto specie gestort (blauwe lijn in Figuur 3.13). In dezelfde periode veranderde de inhoud van de macrocel echter niet (zwarte lijn). Het lijkt waarschijnlijk dat de monding voldoende capaciteit heeft om dit sediment te ontvangen¹⁴, onder meer om mee te groeien met de zeespiegel (zie ook numerieke simulaties beschreven in LTV V&T G-12).

Het principe lijkt ook van toepassing op de specie die wordt gestort in het 'Gat van Ossenisse'. Uit simulaties beschreven in LTV V&T G-12 blijkt dat dit sediment verdeeld wordt tussen de aangrenzende macrocellen 3 en 5. Wanneer langdurig minder sediment wordt verplaatst (via de stortstrategie) van cel 5 naar het 'Gat van Ossenisse' blijkt dit niet tot een volumeverandering van cel 4 te leiden.



Figuur 3.13 Zandbalans macrocel 1 van RWS Zeeland, volgens methode van Haecon

Ingrijpen in morfologie van de monding

Ook over ingrijpen in de morfologie van de monding, met als doel de getij-indringing te beperken is al gerapporteerd (in Deltares, 2011) en daarvan wordt in bijlage 2 een samenvatting gegeven. Binnen LTV V&T is dit uitgebreid en is systematisch onderzocht welke veranderingen nodig zijn in de monding om een belangrijke impact op de getijslag te veroorzaken (rapport G-12). Het blijkt om zeer forse ingrepen te gaan.

¹⁴ Het sedimentvolume dat hier mee gemeoid is, is relatief klein ten opzichte van de oppervlakte van het mondinggebied. Het is daarom niet zinvol om dit sedimentvolume te 'zoeken' in de balans van de monding.

4 Waarnemingen geuldimensies, getij-indringing, transporten

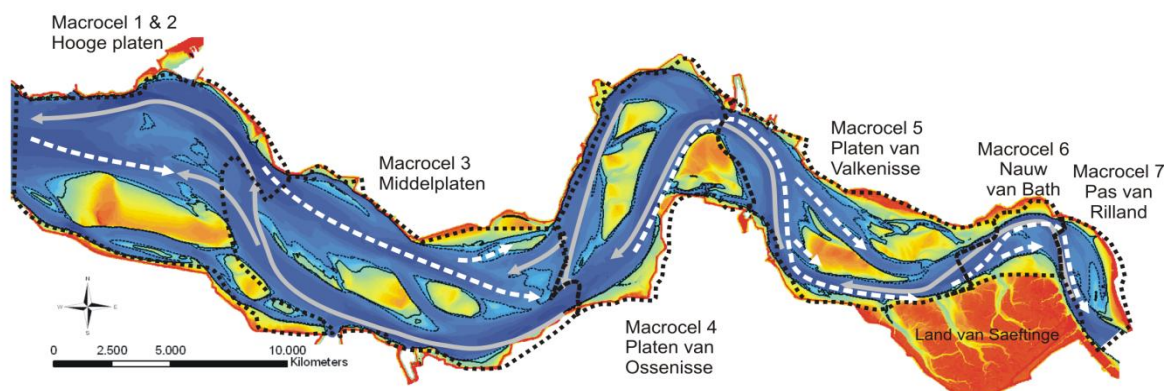
4.1 Veranderingen sedimentvoorraden

In LTV V&T-rapport G-2 zijn de ontwikkelingen in de sedimentvolumes geanalyseerd, met een verbijzondering voor de oostelijke en de westelijke helft van de Westerschelde. Het rapport gaat uit van langjarige gemiddelde waarden. Dit is gedaan vanwege de variatie rond metingen van de bodemligging die ontstaat door problemen met de gegevens en door plausibele veranderingen in de bodemligging. Door middel van een analyse in LTV V&T-rapport G-3 kon ook de rol van slib in de sedimentbalans worden meegenomen.

Samengevat is het beeld uit LTV V&T-rapport G-2: De oostelijke helft vertoont gemiddeld tot 1994 een beperkte afname van het sedimentvolume (ca. $-0,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar), wat sterk toeneemt in de periode erna (tot ca. $-4,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar). De westelijke helft vertoont tot 1994 ook een afname (ca. $-0,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar), wat in de periode erna verandert in een toename (ca. $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar). Menselijke ingrepen zijn sturend in deze trendbreuken. Een andere belangrijke uitkomst, van de zand- en slibbalans, is dat de berekende zandtransporten deels een andere richting hebben dan de slibtransporten. Daarop komt dit rapport terug in paragraaf 5.4.

In dit hoofdstuk worden de observaties van de sedimentvoorraden eerst aangevuld met de observaties van de ontwikkeling van de doorstroomoppervlakte, meer precies de dimensies van de geulen. De theoretische verkenningen (zie paragraaf 3.2 en LTV-rapport G-7) zeggen namelijk dat de doorstroomoppervlakte van de geulen het meeste effect hebben op de amplificatie van het getij.

Door de gegevens van getij en doorstroomoppervlakte naast elkaar te bestuderen kan de theoretische verkenning worden bevestigd en ook worden beschreven welke morfologische veranderingen het meest invloed hebben op de veranderingen in de waterbeweging.

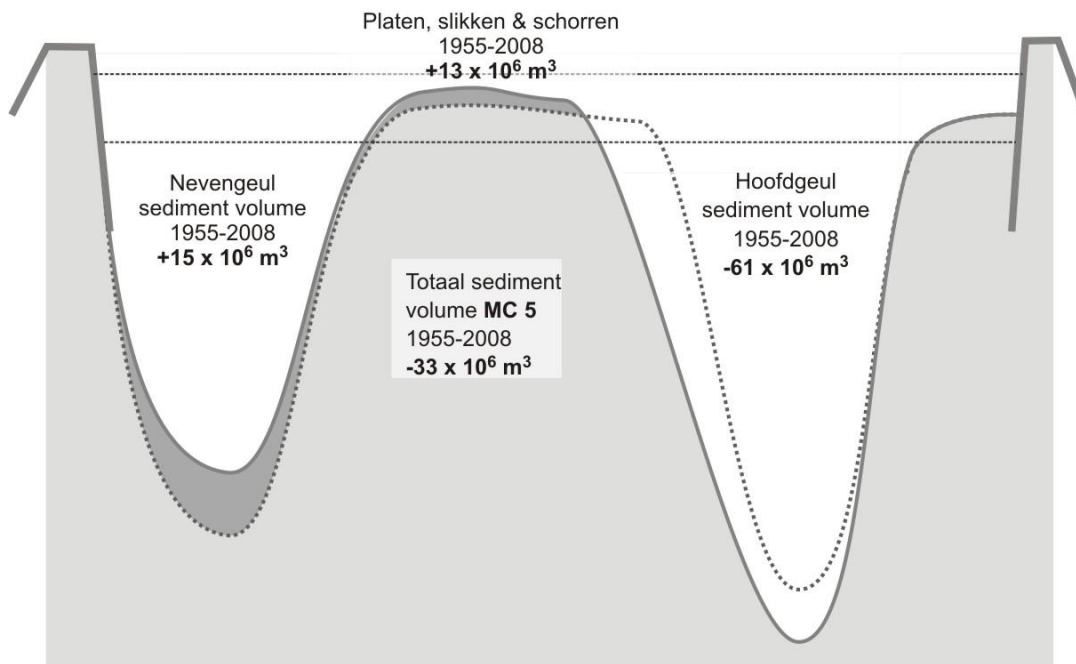


Figuur 4.1 Overzicht van de macrocellen in de Westerschelde. Macrocel 2 ligt ten zuiden van de Hooge Platen.

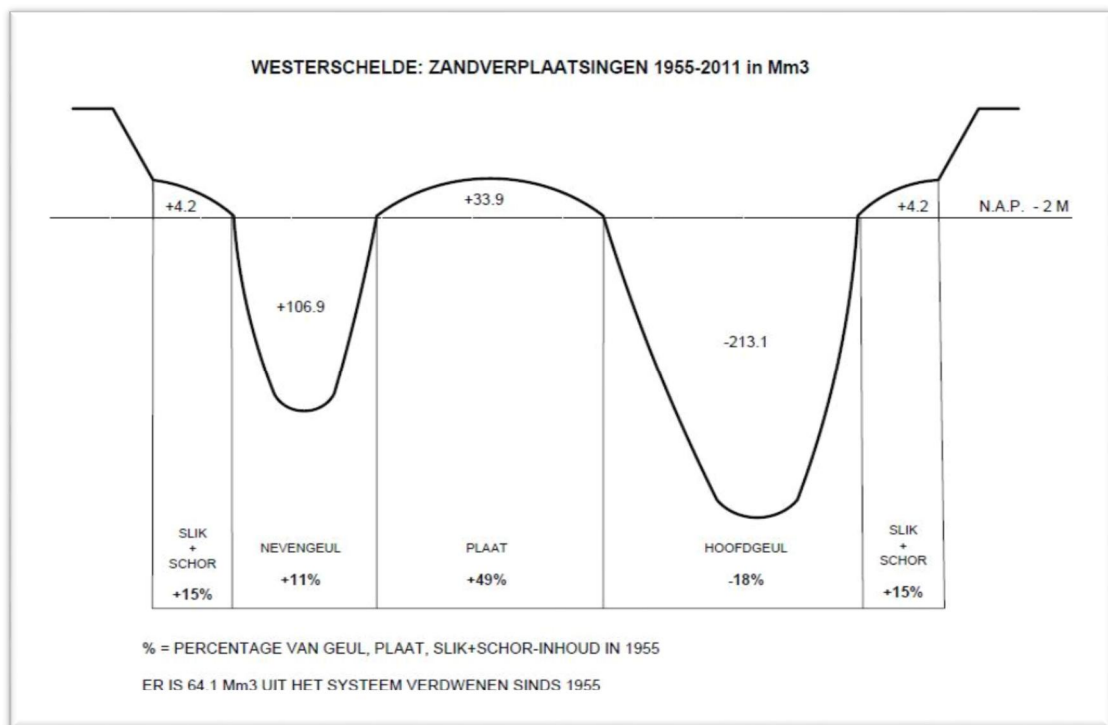
De ontwikkeling van de doorstroomoppervlakte wordt per macrocel (zie Figuur 4.1) beschreven. Hierbij is de ontwikkeling van de geul het belangrijkste. In aanvulling op de LTV-V&T-rapporten G-5 en K-17 wordt in de volgende paragraaf eerst uitgebreid verslag gedaan van data-analyse van geuldimensies

4.2 Veranderingen in dwarsdoorsneden en geulvolumes

De herverdeling van sediment tussen hoofdgeul, nevengeul en intergetijdegebieden is de laatste halve eeuw ingrijpend geweest. Als voorbeeld geldt Figuur 4.2, die voor macrocel 5 (recente data Rijkswaterstaat, dienst Zeeland, ontleend aan K-17) toont dat de afname van sedimentvolume zich veelal in de hoofdgeul voordoet en dat de andere morfologische elementen een toename laten zien. Deze verschuiving geldt ook wanneer deze balans voor de hele Westerschelde wordt opgesteld (zie Figuur 4.3), maar niet voor alle afzonderlijke cellen.



Figuur 4.2 Sedimentverplaatsingen laatste 50 jaar, macrocel 5 (data van Rijkswaterstaat Dienst Zeeland)



Figuur 4.3 Sedimentverplaatsingen laatste 50 jaar (bron: mond. mededeling Leen dekker, RWS Dienst Zeeland)

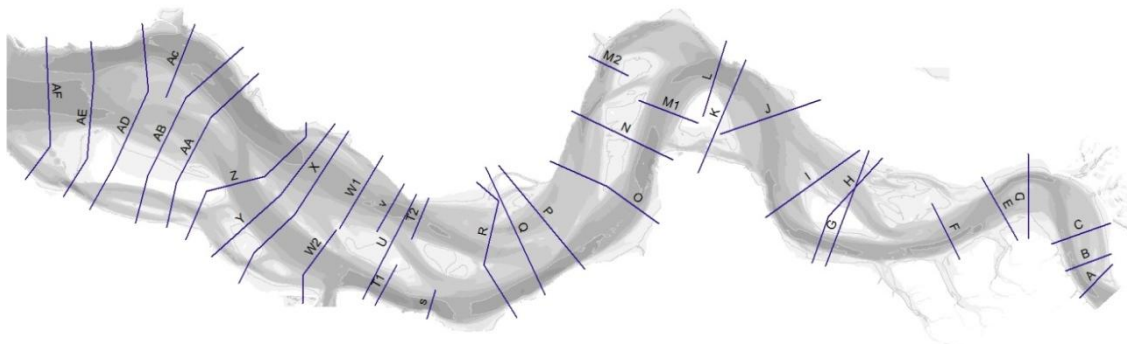
In LTV-V&T-rapport K-17 zijn deze figuren gepresenteerd voor alle macrocellen. Daaruit is op te maken dat in de oostelijker gelegen macrocellen ook de nevengeulen sediment hebben verloren en dat de cellen als geheel, zeker in relatie tot de oorspronkelijke volumes, veel ruimer werden.

In Figuur 4.2 en Figuur 4.3 is ook zichtbaar dat de hoeveelheid sediment die op de platen terecht is gekomen beperkt is in vergelijking met de veranderingen in de geulen. Het totaal aan sediment dat met verhoging van platen verband houdt is klein in vergelijking met de totale volumeveranderingen in het estuarium en ook de omvang van de stortingen op plaatranden zijn klein in vergelijking met het totaal aan stortingen. Het gaat in de geulen dus om veel meer sediment

Gedetailleerdere analyse van specifieke dwarsdoorsneden

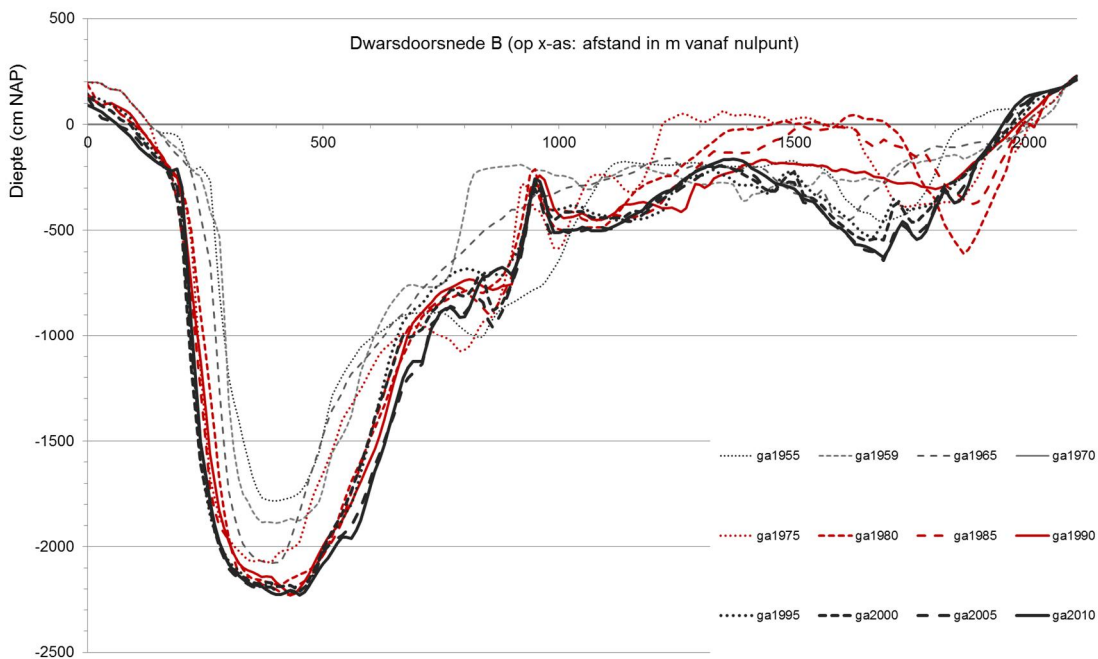
Er is gekeken naar dertig dwarsdoorsneden in de Westerschelde (Figuur 4.4). Deze doorsneden zijn gebruikt om de ontwikkeling van de doorstroomoppervlaktes in de periode van 1955 tot heden te analyseren¹⁵. De volledige resultaten staan in Figuur 4.8 en Figuur 4.9.

15. In dit rapport worden doorstroomoppervlaktes gebruikt, in plaats van gemiddelde waterdieptes per macrocel (zoals in LTV V&T G-5). De gemiddelde waterdieptes worden sterk beïnvloed door de drempelgebieden, waar doorstroomoppervlaktes relatief groot zijn. Dit maakt ontwikkelingen minder zichtbaar. De doorstroomoppervlaktes laten een meer uitgesproken ontwikkeling zien. Nadeel is wel dat de doorstroomoppervlaktes ook afhankelijk zijn van de aansnede van de geul (liefst een hoek van 90° en in ieder geval voor ieder jaar dezelfde hoek) en van de aan- of afwezigheid van kortsluitgeulen. De keuzes van Figuur 4.4 houden daar rekening mee.

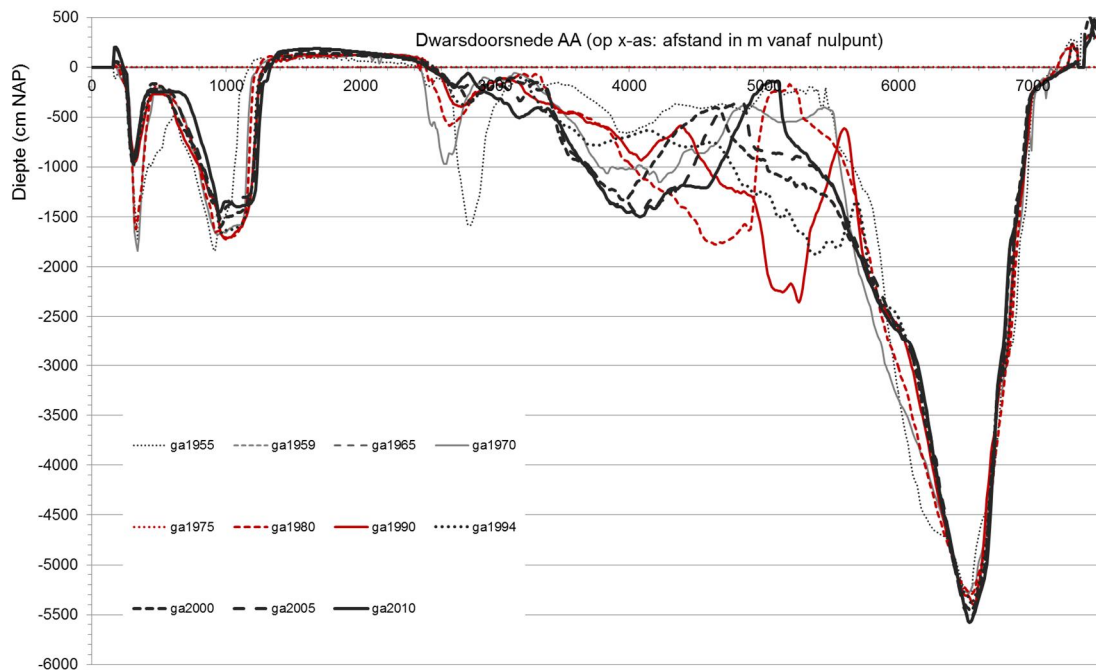


Figuur 4.4 Locatie van dwarsdoorsneden in de Westerschelde

In LTV-V&T-rapport K-17 is ook de ontwikkeling van de sedimentinhoud van de hoofd- en nevengeulen per macrocel gedurende de laatste vijftig jaar opgenomen, evenals de relatieve verandering van het watervolume per cel. Daaruit blijkt dat de morfologische veranderingen er toe hebben geleid dat de doorstroomoppervlakte van de Westerschelde vooral in het oostelijke deel is toegenomen. Dat wordt, in extra detail, geïllustreerd in Figuur 4.5 en Figuur 4.6, via doorsneden die representatief zijn voor het meest oostelijke en het meest westelijke deel van de Westerschelde. Dit inzicht helpt bij de interpretatie van de resultaten van de ontwikkeling van de doorstroomoppervlaktes. Let daarbij op dat de assen bij beide figuren verschillen, omdat de dwarsdoorsneden in het westen veel groter zijn dan in het oosten. De doorstroomoppervlakte onder NAP – 2 m in 1955 van dwarsdoorsnede B in de oostelijke helft bedraagt 7.500 m² en die van dwarsdoorsnede AA in de westelijke helft 57.500 m². Dit verschil in omvang betekent dat de potentiële invloed van de veranderingen in de sedimentvolumes in het oosten beduidend groter is dan het westen. Eenzelfde absolute af- of toename van het sedimentvolume heeft meer effect bij kleinere doorstroomoppervlakte.



Figuur 4.5 Ter illustratie: dwarsdoorsnede B in oostelijke Westerschelde, nabij grens (locatie: Figuur 4.4).



Figuur 4.6 Ter illustratie: dwarsdoorsnede AA in westelijke Westerschelde, nabij Munding (locatie: Figuur 4.4).

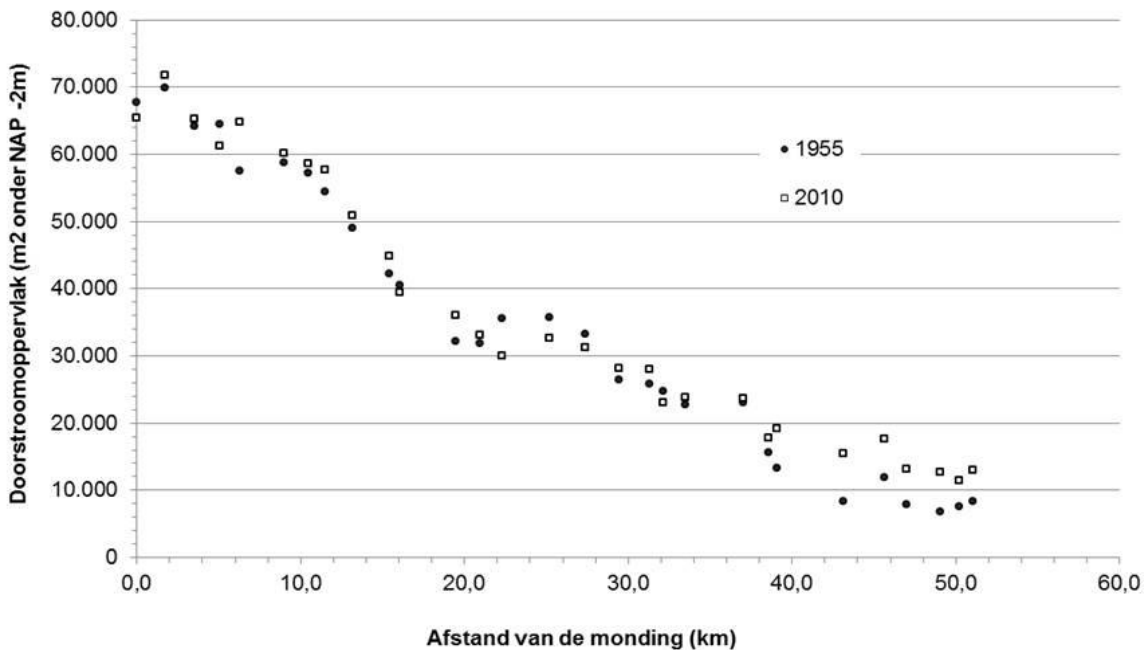
De verandering in de vorm en de grootte in Figuur 4.5 (in het oosten) is aanzienlijk. De doorstroomoppervlakte van dwarsdoorsnede B neemt toe van 7.500 m² in 1955 tot 11.500 m² in 2010. De doorstroomoppervlakte in 2010 is daarmee ruim 150% van de doorstroomoppervlakte in 1955. De raaien in het westen hebben gemiddeld in 2010 een omvang van 102% ten opzichte van 1955.

De relatieve omvang van de doorstroomoppervlaktes ten opzichte van 1955, zoals hierboven geïllustreerd, is in Figuur 4.8 weergegeven voor alle dwarsdoorsneden, voor alle jaren. Voor de vergelijkbaarheid zijn voor alle grafieken de assen hetzelfde gehouden, zodat in één oogopslag zichtbaar is dat de grote veranderingen in de doorstroomoppervlaktes plaatsvinden in de oostelijke helft van de Westerschelde. Die veranderingen zijn hoogstwaarschijnlijk al begonnen voor de start van de gebruikte waarnemingenreeks in 1955. Meer westelijk is de toename kleiner en, voor zover waarneembaar, ook later begonnen.

Voor de oostelijkste cellen (zie voor ligging Figuur 4.1) zijn de belangrijkste observaties:

- In macrocel 7 (de raaien A, B en C) is de toename van de doorstroomoppervlakte al bezig sinds 1955.
- In macrocel 6 (de raaien D, E en F) start de toename aan het eind van de jaren zestig. De tijdelijke toename in raai D is het gevolg van het aansnijden van een kortsluitgeul en geen grootschalig effect.
- In macrocel 5 (de raaien G, H en I) begint de toename van de doorstroomoppervlakte eind jaren tachtig en deze toename vlakkt weer af rond 2005.

Het verschil tussen oost en west, in doorstroomoppervlakte en in de ontwikkeling gedurende de laatste halve eeuw is samengebracht in Figuur 4.7. Conclusie: Tot ca km 37 is de doorstroomoppervlakte niet belangrijk toegenomen, maar oostelijker is dit wel het geval. De vergroting van het doorstroomoppervlakte is in die zone ordegrrootte 40%.



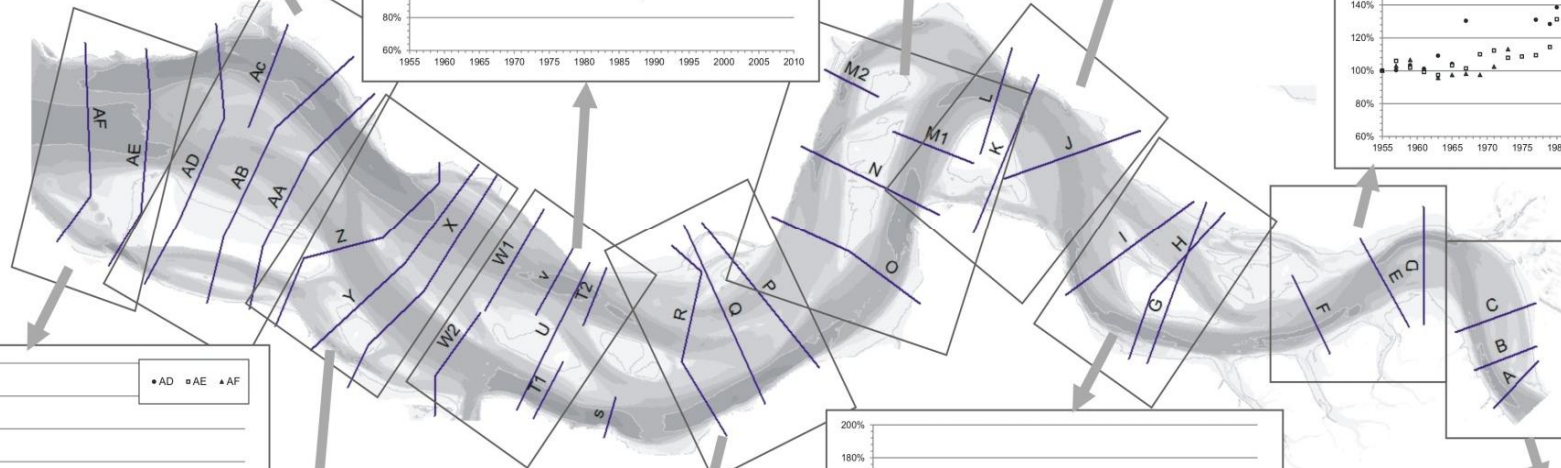
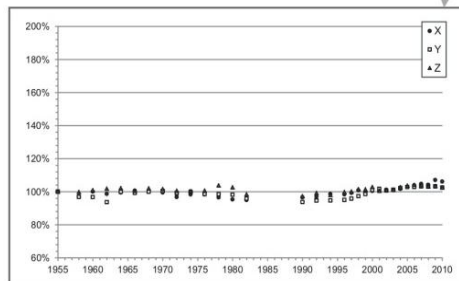
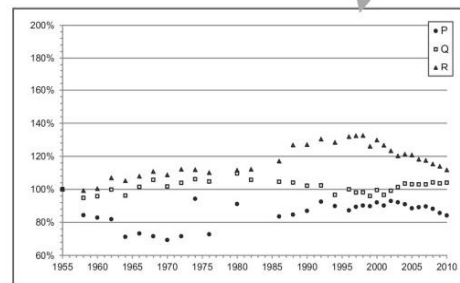
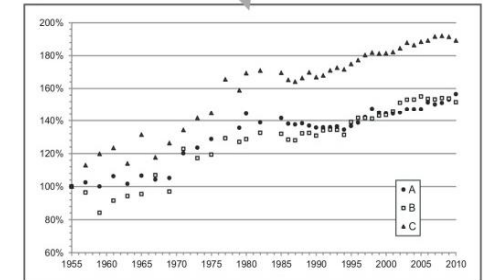
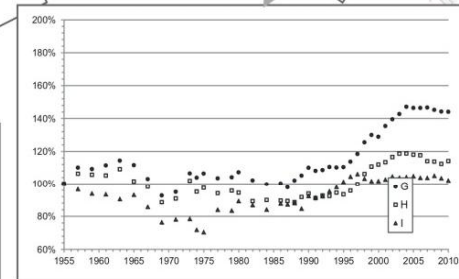
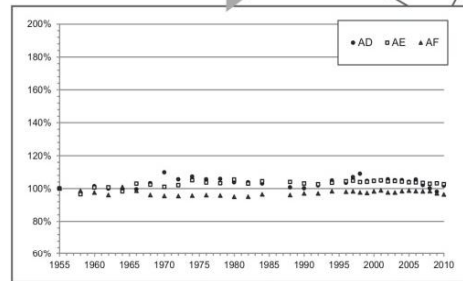
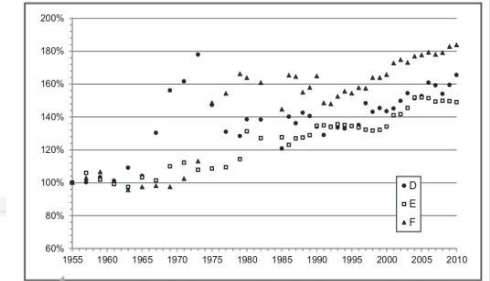
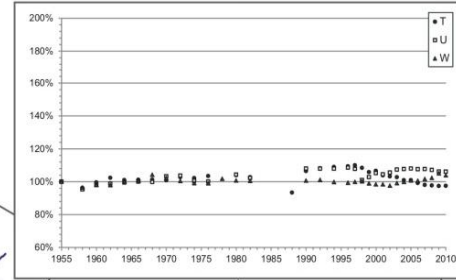
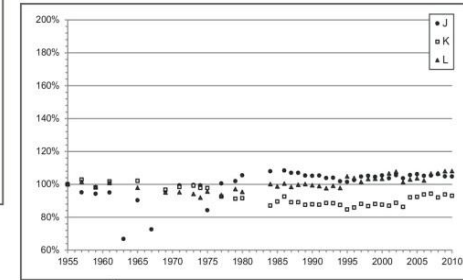
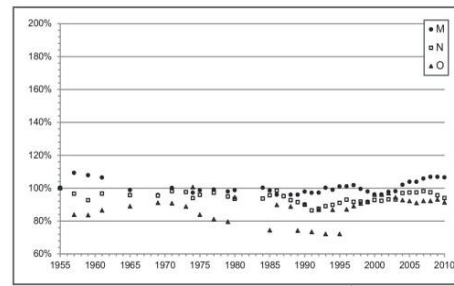
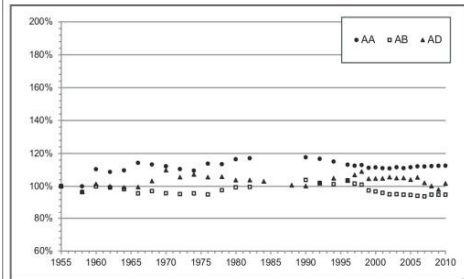
Figuur 4.7 Geobserveerde toename van doorstroomoppervlakte van 1955 tot 2010 in Westerschelde. Vanaf km 37 (voorbij Hansweert) is de doorstroomoppervlakte sterk toegenomen.

Voor een goede interpretatie van de waarnemingen moet ten slotte bekend zijn of de veranderingen van de doorstroomoppervlakte plaatsvonden in hoofd- of nevengeul. Hiertoe is Figuur 4.9 gemaakt, die van een aantal dwarsdoorsneden aangeeft wat de doorstroomoppervlaktes in hoofd- en de nevengeul zijn geweest. Uit deze figuren blijkt dat de toename van de doorstroomoppervlaktes in de oostelijke helft weliswaar zowel in hoofd- als nevengeul plaatsvindt, maar dat de grootste toenames in de hoofdgeul te vinden zijn.

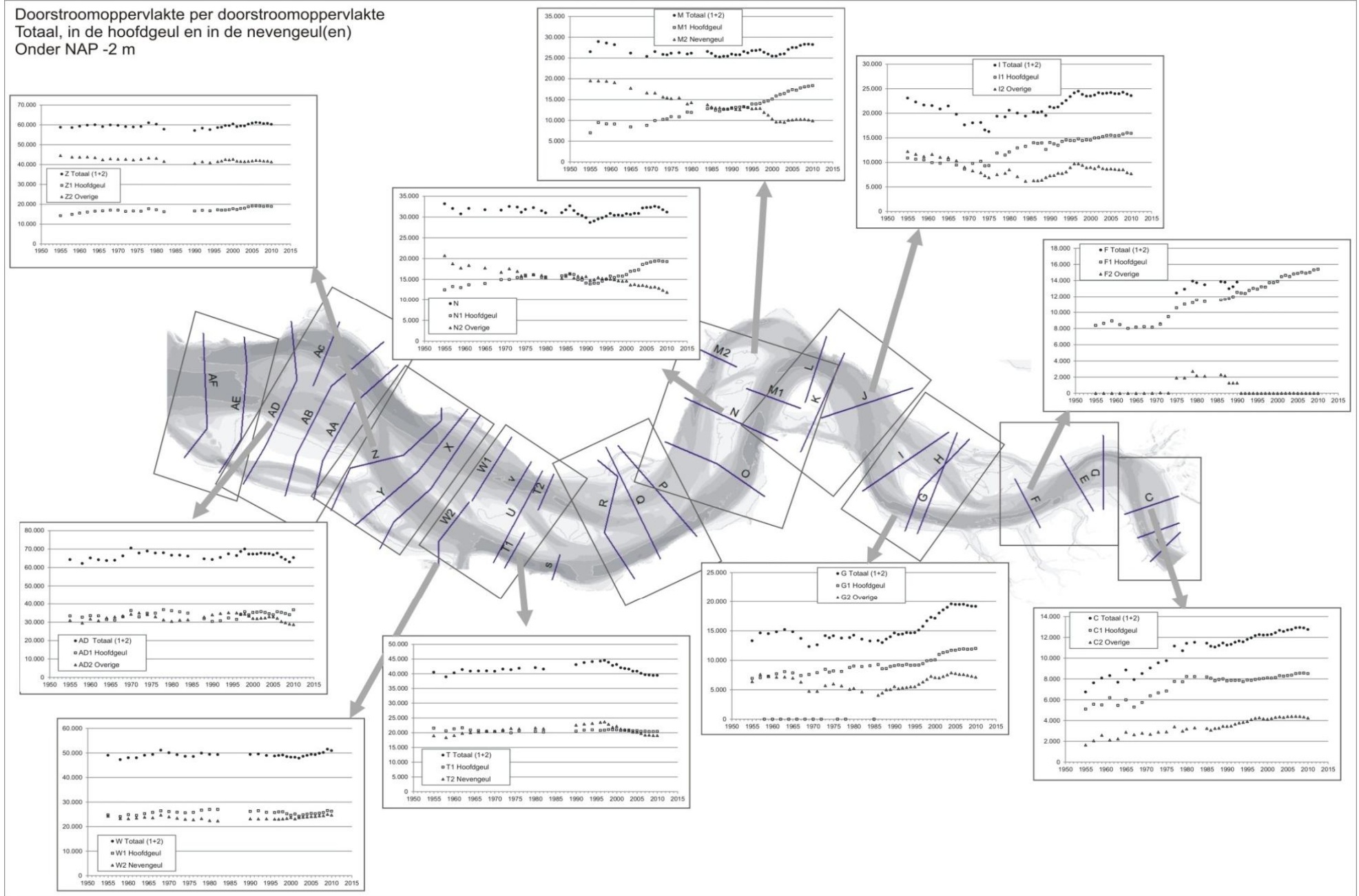
De knik in de ontwikkeling van de sedimentvolumes, zichtbaar rond 1994 (beschreven in LTV V&T-rapport G-2 en in dit rapport zichtbaar in Figuur 5.2), die samenhangt met de verandering in grootschalige stortstrategie, is niet duidelijk terug te vinden in de ontwikkelingen van deze dwarsdoorsneden (Figuur 4.8 en Figuur 4.9), met uitzondering van de nevengeul 'de Schaar van Waarde' (in doorsnede G uit die figuren). Dit suggereert dat het invoeren van zogenaamde oost-west strategie rond 1994 zijn grootste invloed heeft op de verdeling van sediment over de hoofd- en nevengeul in macrocel 5.

Figuur 4.8 (volgende bladzijde): Doorstroomoppervlakte relatief ten opzichte van 1955 voor dwarsdoorsneden in de gehele Westerschelde

Doorstroomoppervlakte per dwarsdoorsnede
Weergegeven als percentage t.o.v. 1955



Doorstroomoppervlakte per doorstroomoppervlakte
Totaal, in de hoofdgeul en in de nevengeul(en)
Onder NAP -2 m



Figuur 4.9 Absolute doorstroomoppervlaktes van de hoofd- en nevengeulen voor een aantal dwarsdoorsneden in de Westerschelde.

Samenvattend: veranderingen in geulen Westerschelde sinds 1955

In de **westelijke helft** van de Westerschelde hebben zich op geulgebied geen grootschalige veranderingen voorgedaan, met uitzondering van de afname van het Vaarwater onder de Hoofdplaat. De doorgaande afname van het Vaarwater is een relatief gelokaliseerde ontwikkeling, die waarschijnlijk samenhangt met de ontwikkeling van de Braakman. De Braakman heeft in eerste instantie een afname van de komberging ondergaan door natuurlijke sedimentatie, die in tweede instantie is versterkt door inpolderingen. Uiteindelijk is de komberging tot nul gereduceerd door de afdamming. Zie ook Deltares, 2011 en LTV V&T-rapport K-16.

In het **midden (macrocel 4)** domineert de 'switch' van de hoofdgeul, van oorspronkelijk het Middelgat naar tegenwoordig de Overloop van Hansweert. De totale doorstroomoppervlakte is niet daadwerkelijk veranderd, maar de verdeling over de beide geulen is wel gewijzigd, zie LTV V&T-rapportages G-5 en K-16. Die 'switch' is waarschijnlijk een autonome ontwikkeling, hoewel het 'waarom', in termen van de aandrijvende krachten en processen nog niet helemaal duidelijk is. De afname van het doorstroomoppervlakte van het Middelgat heeft de stortingen van baggerspecie die plaatsvonden niet als hoofdoorzaak. Het is waarschijnlijk dat ze wel de tijdschaal van de verondieping beïnvloeden.

In de **oostelijke helft van de Westerschelde** heeft de afname van de sedimentvolumes geleid tot een geleidelijke toename van de dwarsdoorsnede van de geulen. Dit blijkt uit het voorafgaande in deze paragraaf 4.2.

De toename van de dwarsdoorsnede in de meest oostelijke helft van de Westerschelde is zeer waarschijnlijk gestuurd door het op diepte houden van de vaarweg, in combinatie met het stelselmatig onttrekken van sediment aan dit deel. De onttrekking is zowel het gevolg van het winnen van zand als het meer westelijk storten van baggerspecie. Paragraaf 3.2 en 4.3 beschrijven dat ruimere geulen een versterkend effect hebben op de getij-indringing. Hierop wordt nog verder ingegaan in hoofdstuk 6

Conclusie:

De essentie van de waargenomen veranderingen is dat de structurele afname van de sedimentvolumes in de oostelijke helft van de Westerschelde heeft geleid tot een geleidelijke toename van de doorstroomoppervlakte in de oostelijke helft. Die toename heeft zich in de loop van de tijd uitgestrekt naar het westen, maar is niet verder gekomen dan macrocel 4. In de westelijke helft van het estuarium hebben zich (op hoofdlijnen) geen veranderingen voorgedaan in de morfologie.

Implicaties voor verklaringen van wijzigingen in het getij

De toename van de omvang van de geulen aan de oostzijde betekent dat ook de grootschalige veranderingen van de sedimentvolumes effect hebben op de voortplanting van het getij, want de doorstroomoppervlaktes bepalen de ontwikkeling van het getij (zie o.m. het conceptuele model in hoofdstuk 3, LTV-V&T-rapport G-5, G-8, Van Rijn, 2011). De veranderingen in het getij wijzigen de sedimenttransporten op hun beurt. Op deze wijze moeten (zoals in paragraaf 1.1 uiteen is gezet) de waarnemingen verklaard worden in paragraaf 4.4.

4.3 Veranderingen in het getij

De ontwikkeling van het getij op basis van dagwaarden is in LTV V&T-rapport G-1 beschreven en op basis van jaargemiddelden in de LTV V&T-rapporten G-5, G-6 en G-8. Een

aantal ontwikkelingen zijn in hoofdstuk 1 samengevat via Figuur 1.2 die is ontleend aan LTV V&T-rapport G-8. Meer detail in de veranderingen volgt uit de analyse van de dagwaarden. Van bijzonder belang is de ontwikkeling van het getij tussen Hansweert en Bath

Fourieranalyse: Ontwikkeling getij-asymmetrie Hansweert – Bath

Uit deze analyse (LTV V&T-rapport G-1) blijkt dat de grootste veranderingen van de asymmetrie van het verticale getij in het oostelijke deel van de Westerschelde zijn opgetreden. De veranderingen bij de stations Hansweert en Bath zijn veel groter dan bij de stations Vlissingen en Terneuzen. Opvallend is dat de veranderingen bij Hansweert en Bath tegengesteld blijken.

Bij Hansweert was het verticale getij ebdominant in het begin van de analyseperiode, met een relatief faseverschil tussen viermaaldaags getij en dubbeldaags getij van ongeveer 25 graden in begin jaren 1970. Dit faseverschil is afgenomen tot ongeveer 8 graden in de periode tot midden jaren 1980. Daarna is het ongeveer constant gebleven tot eind jaren 1990 en daarna langzaam afgenomen tot ongeveer 5 graden. Dit betekent dat het verticale getij in Hansweert van ebdominant tot bijna symmetrisch is veranderd.

Bij Bath is dit omgekeerd. Het verticale getij daar was vloeddominant, met een relatief faseverschil tussen viermaaldaags getij en dubbeldaags getij van ongeveer -20 graden in begin jaren 1970. Dit faseverschil is sindsdien langzaam toegenomen tot ongeveer 5 graden aan het eind van de analyseperiode. Het getij is dus van vloeddominant in het begin van jaren 1970 veranderd tot licht ebdominant nu.

Conclusie: In begin jaren 1970 was de asymmetrie van het verticale getij bij Bath en Hansweert tegengesteld, maar tegenwoordig is het ongeveer hetzelfde bij de twee stations.

In deze paragraaf wordt nu een begin gemaakt met het verklaren van de waargenomen veranderingen. Het stappenplan dat in Figuur 1.1 is geïntroduceerd vraagt erom eerst te onderzoeken welke verklaringen er mogelijk zijn door veranderingen in de waterbeweging buiten de Westerschelde in beschouwing te nemen.

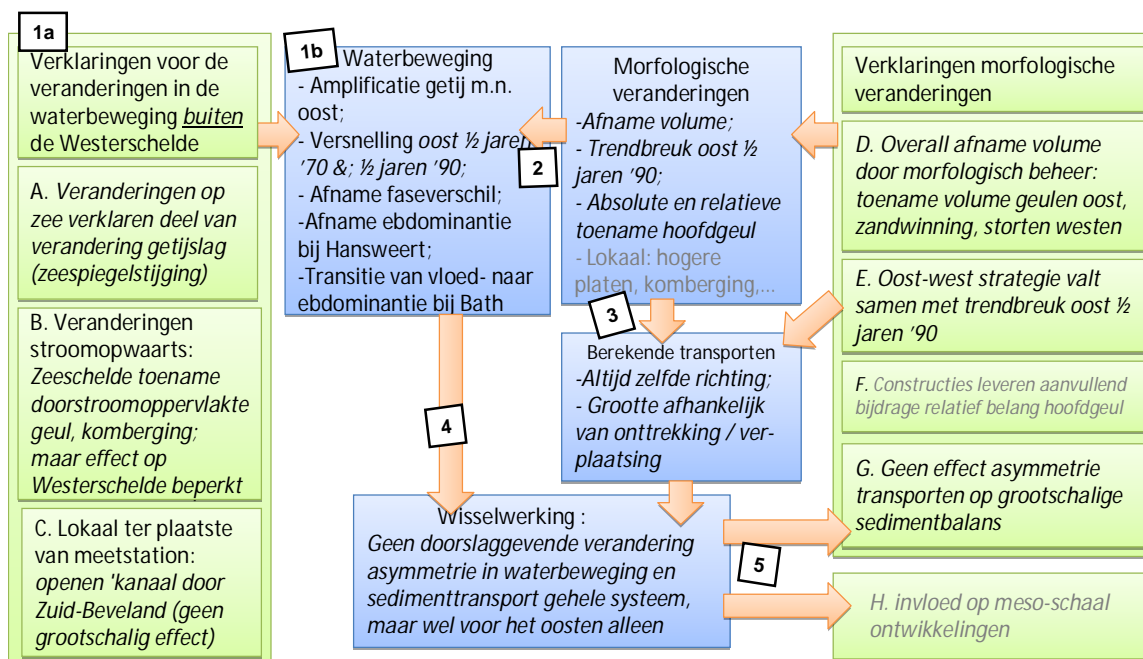
Externe verklaringen voor veranderingen in de waterbeweging

(A) Bij de monding (Vlissingen) zijn de veranderingen in het getij relatief klein. Er is sprake van een stijging van de zeespiegel en van een grotere stijging van de niveaus van hoogwater. Deze veranderingen treden op in de gehele Noordzee. Modellsimulaties (LTV-V&T-rapporten G-4, G-5 en G-7) laten zien dat deze veranderingen in de zeewaartse randvoorwaarden weliswaar versterkt worden in het Schelde-estuarium, maar tonen ook dat deze veranderingen kleiner zijn dan de waargenomen veranderingen.

(B) De veranderingen in het getij en in de morfologie die in de Zeeschelde plaatsvonden zijn groot (LTV-V&T-rapport G-6, Van Braeckel 2007). Ten opzichte van de veranderingen in de veel bredere Westerschelde zijn ze echter relatief klein en ze bieden daarom geen afdoende verklaring voor de opgetreden veranderingen daar. Die beperkte invloed is conform het conceptuele model.

(C) De opgetreden lokale veranderingen bieden verklaringen voor tijdelijke veranderingen (bijvoorbeeld een tijdelijke verandering door het 'openzetten' van het kanaal door Zuid-Beveland), maar niet voor veranderingen over langere perioden en bij meerdere stations.

Deze eerste stap in het verklaren is opgenomen in Figuur 4.10



Figuur 4.10 : Verklaringen waarnemingen in waterbeweging en sedimentvoorraden

Na het uitsluiten van sturend effect van buiten de Westerschelde kan vastgesteld worden dat de verklaring van de ontwikkelingen in de getij-asymmetrie bij Hansweert en Bath in de morfologische veranderingen binnen de Westerschelde gezocht moeten worden.

Voordat daarmee begonnen wordt, behoort nog, zie de rechterzijde van Figuur 4.10, gekeken te worden of de waargenomen morfologische veranderingen verklaard kunnen worden. De aspecten D, E uit de figuur hoeven op deze plaats geen nadere toelichting. Verwezen wordt naar bijlage 3 voor een uitgebreid overzicht van uitgevoerd morfologisch beheer.

4.4 Veranderingen in het getij in relatie tot veranderde geuldimensies

Pijl 2: veranderingen in de morfologie sturen veranderingen in getijslag

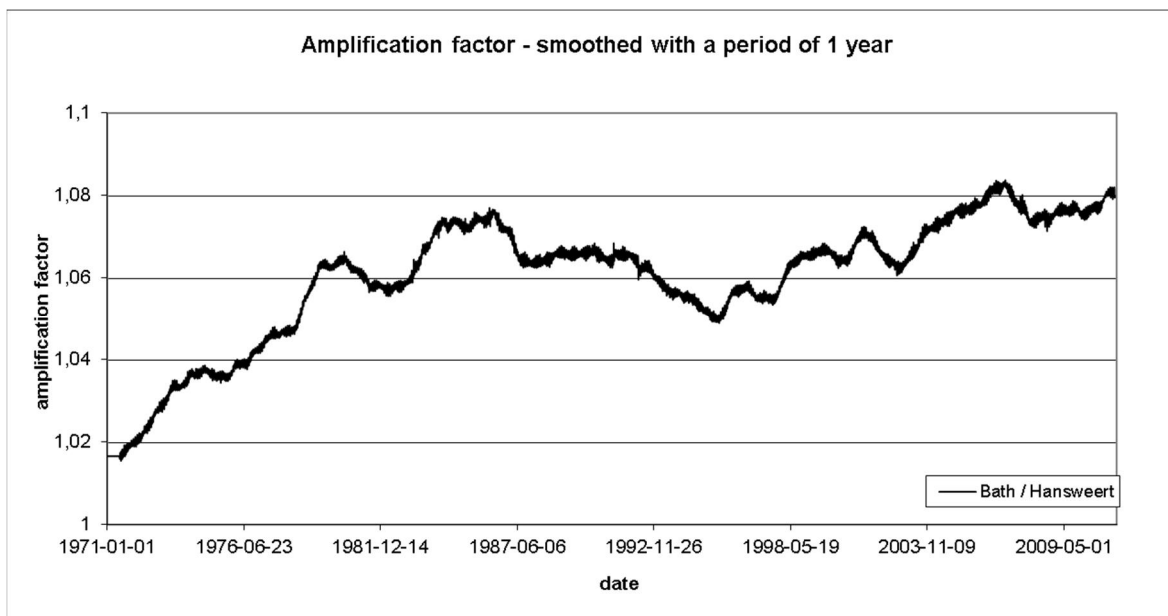
In LTV V&T-rapport G-2 en in paragraaf 4.2 is beschreven dat in het oostelijke deel van de Westerschelde het sedimentvolume is afgenomen, waarbij de omvang van de geulen, en vooral de hoofdgeul, is toegenomen. Tegelijkertijd is het sedimentvolume van de platen toegenomen, al gaat het daarbij in absolute zin om minder volume.

Op basis van het conceptuele model (hoofdstuk 3) wordt verwacht dat toename van de doorstroomoppervlakte een verklaring voor (een deel van) de vergrote getijslag is. In LTV V&T-rapport G-5 is de zeer waarschijnlijke bevestiging van dit verband gevonden voor het traject Hansweert-Bath en de ontwikkelingen ten tijde van de eerste verdieping (jaren '70). Deze verklaring wordt verder besproken door de dagwaarden uit LTV V&T-rapport G-1 (Figuur 4.11) te leggen naast de ontwikkeling van de geulen (Figuur 4.12) in Hansweert-Bath.

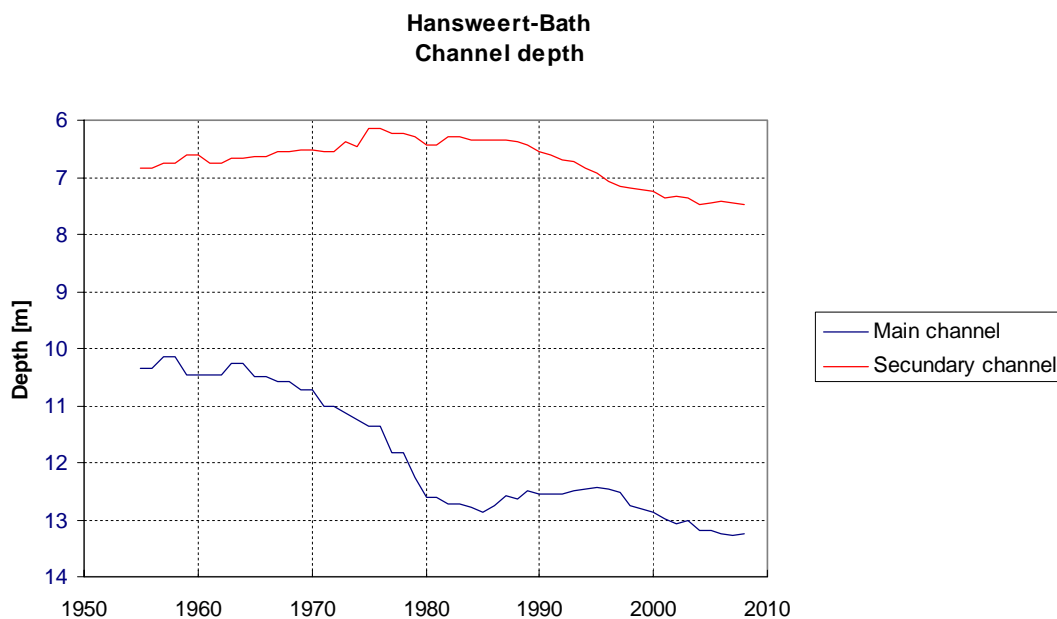
In Figuur 4.11, met de ontwikkeling van de getijslag op basis van de dagwaarden, zijn, net als in de analyse van de jaargemiddelden, meerdere duidelijke trendbreuken waarneembaar. Een eerste periode met toename van de getijslag loopt tot en met eind jaren zeventig / begin jaren tachtig. Een tweede trendbreuk, met opnieuw toename getijslag, begint midden of eind jaren negentig en duurt ca. 10 jaar.

Wanneer we deze waarnemingen leggen naast de ontwikkeling van de gemiddelde geuldiepte (Figuur 4.12) kan geconstateerd worden dat de trendbreuken daarin rond hetzelfde moment waargenomen worden.

Figuur 4.12 laat zien dat in de periode 1955-2008 de gemiddelde diepte van de hoofdgeul toeneemt met bijna 3 m (+30%), waarvan ca. 2 m plaats vond tussen ca. 1970 en 1980 en bijna een meter tussen ca. 1995 en 2005. Opvallend hierbij is dat in deze tweede periode ook de diepte van de nevengeul met bijna een meter toenam. De periodes met dieptetoename van de geulen vallen dus samen met de periodes van toename in amplificatie van de getijslag. Hiermee worden deze veranderingen in het getij verklaard en het conceptuele model en theorie, zoals uiteengezet in hoofdstuk 3, van toepassing geacht.



Figuur 4.11 : Ontwikkeling amplificatie getijslag in sectie Hansweert-Bath



Figuur 4.12 (Uit LTV V&T-rapport G-5): Geuldiepte t.o.v. NAP van hoofd- en nevengeul tussen Hansweert en Bath

Een volgende stap is om de ontwikkeling van de geulen te verbinden aan morfologisch beheer. Het is bekend dat eind jaren zeventig de eerste verdieping was afgerond, dat midden jaren negentig de strategie werd veranderd waarbij veel sediment van het oosten naar het westen bracht (zie ook bijlage 3) en dat eind jaren negentig er een tweede verdieping is uitgevoerd. Andere verklaringen voor de trendbreuken, die tegelijkertijd in morfologische ontwikkeling en ontwikkeling getijslag plaatsvinden, zijn niet voorhanden.

Pijl 2: veranderingen in de morfologie sturen veranderingen in getij-asymmetrie

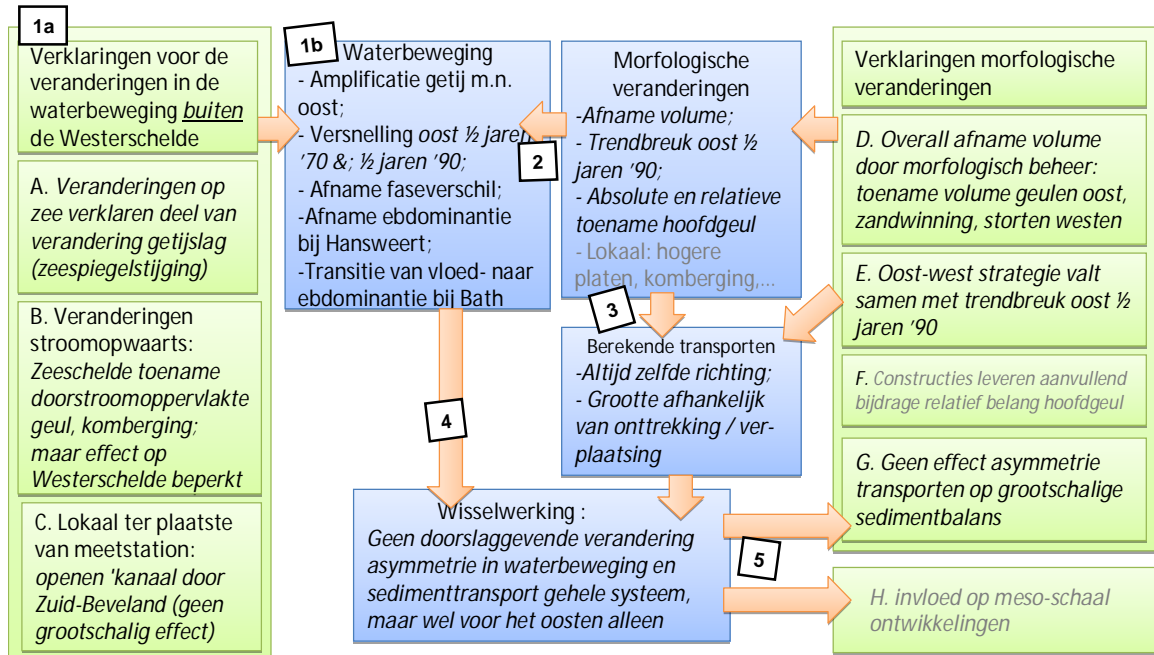
Uit de analyse is een opvallende ontwikkeling in de getij-asymmetrie van Hansweert en Bath gebleken (LTV V&T G-1). Die waarnemingen van waterstanden vertellen ook dat de vervorming van de getijgolf in het oostelijke deel van de Westerschelde (tussen Hansweert en Bath) verminderd is. Dit suggereert dat de morfologische parameters bij hoog en laag water tegenwoordig bijna niet meer verschillen. Uit een analyse met het vereenvoudigde 1D model (zie LTV V&T-rapport G-8) volgt dat dit vooral een gevolg kon zijn van de verschillen in mate van trechtering (convergentielengtes) bij de verschillende waterstanden.

Volgens theorie (Dronkers, 1986, Friedrichs en Aubrey, 1988, V&T G-7) zijn de morfologische verandering van intergetijdegebied en de relatieve verandering van intergetijdegebied en geul belangrijke verklarende factoren voor de getijvoortplanting.

5 Sedimenttransporten: waarnemingen en verklaringen

5.1 Van veranderingen in morfologie en waterbeweging naar transporten

Deze paragraaf zet de volgende stap in het verklaren van de waarnemingen, zie Figuur 5.1, door de berekende transporten, uit sedimentbalansen en numerieke analyses te bespreken.



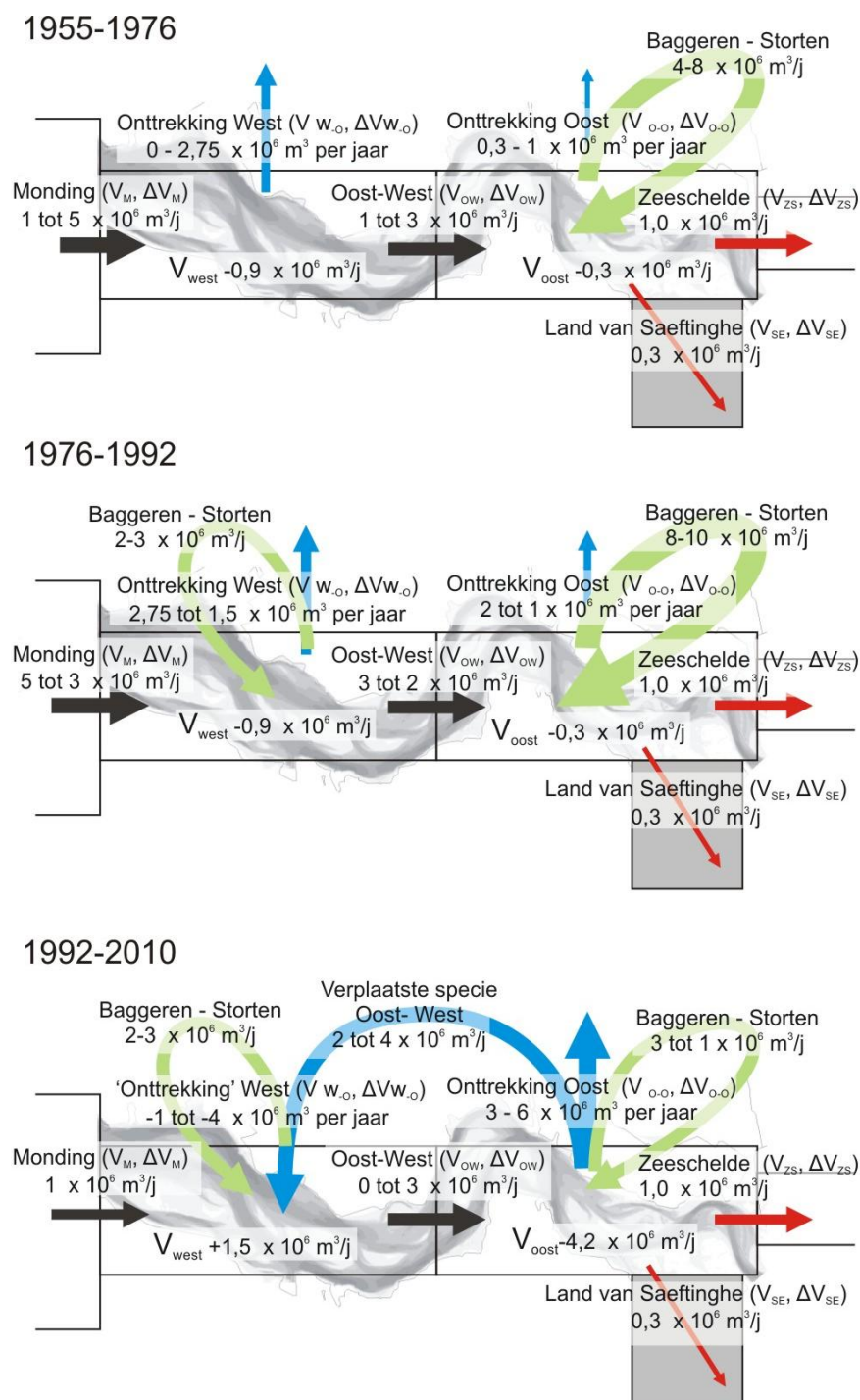
Figuur 5.1 : Verklaringen waarnemingen in waterbeweging en sedimentvoorraden (gelijk aan Figuur 4.10)

5.2 Conclusies sedimenttransporten uit data-analyse

In LTV V&T-rapport G-2 zijn de ontwikkelingen in sedimentvolumes, bagger-, stort- en zandwingegevens en transporten naar het Land van Saefinghe en de Zeeschelde gebruikt in sedimentbalansen met één en twee compartimenten. Hieraan is Figuur 5.2 ontleend, die de uitkomsten van de berekening betreffende transporten tussen monding, Westerschelde-West en Westerschelde-Oost weergeeft met zwarte pijlen. Pijlen met andere kleuren geven randvoorwaarden of ingevoerde gegevens weer.

Figuur 5.2 onderscheidt drie perioden op basis van de geobserveerde trendbreuken in de sedimentbalansen van het gehele estuarium. Ze wijken af van perioden uit andere studies, wat is gemotiveerd door de nauwkeurigheid van de bodemliggingsgegevens.

Uit paragraaf 4.4 volgt dat voor de ontwikkeling in dwarsdoorsneden de start van verruiming van de vaargeul bepalend lijken voor het optreden van trendbreuken. Voor de grootschalige sedimentvolumes van oostelijk en westelijk deel van de Westerschelde is dat eerder de grootschalige stortstrategie. De hoofdconclusie van LTV V&T-rapport G-2 was dat veranderingen in de sedimentbalans worden gedomineerd door grote veranderingen in de onttrekking en verplaatsing van sediment.



Figuur 5.2 Schematische weergave van de sedimenttransporten zoals berekend met een sedimentbalans met twee vakken (uit deelrapport II, in rood de randvoorwaarden, in blauw de netto onttrekking, in groen de verplaatsing van sediment binnen het vak en in zwart de uitkomst van de balans berekeningen).

Conclusies in meer detail uit LTV V&T-rapport G-2 aangaande sedimenttransporten zijn:

- De netto menselijke ingrepen *in de westelijke helft* van de Westerschelde domineren het beeld of het transport van de monding naar de Westerschelde verandert;
- De uitkomst van de berekening van netto transport over de grenzen van de Westerschelde wordt *vooral* gestuurd door de randvoorwaarden;

- De berekende uitwisseling (netto transport) van sediment van west naar oost is relatief constant, uitgaand van plausible randvoorwaarden voor de transporten naar de Zeeschelde en het Land van Saeftinghe;
- De trendbreuken in de ontwikkelingen van het sedimentvolume gaan gelijk op met veranderingen in de netto ingrepen. Het meest duidelijk is dit bij het in het westen storten van in het oosten gebaggerde specie (vanaf midden jaren negentig).

Periode 1955-1976

- Berekende toename van het transport van monding naar Westerschelde van ongeveer 1 tot $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar;
- Berekende toename van het transport van west naar oost van ongeveer 1 tot $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar.

Periode 1976-1992

- Berekende afname van het transport van monding naar Westerschelde van ongeveer 5 tot $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar;
- Berekende afname van het transport van west naar oost van ca. 3 tot $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar.

Periode 1992-2010

- Berekend transport van monding naar Westerschelde stabiel op ongeveer $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar;
- Berekend transport van west naar oost van ongeveer $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar.

Twee aspecten van de veranderingen in de transporten worden het belangrijkste geacht:

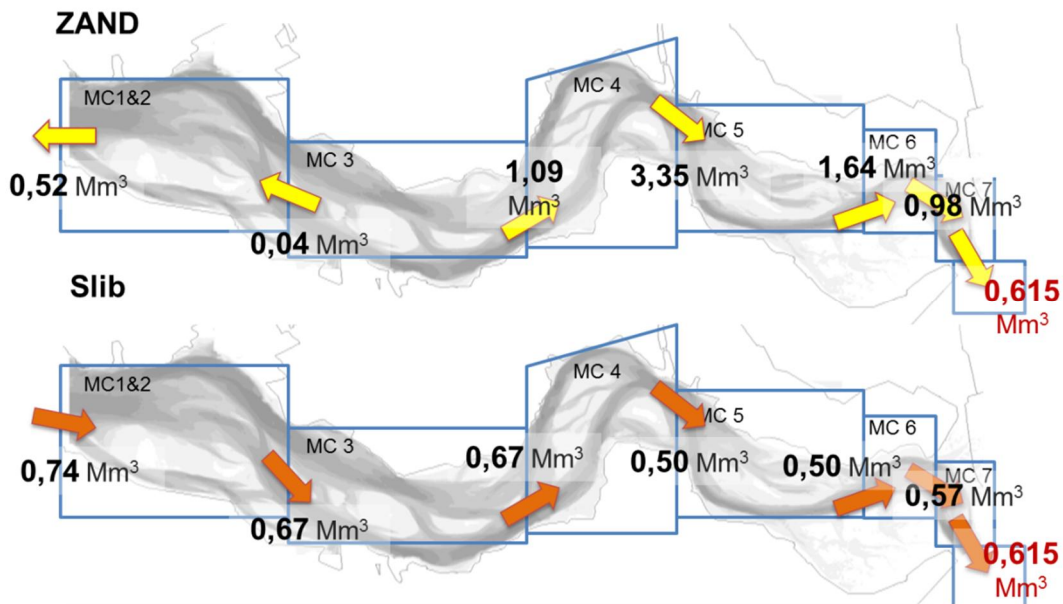
1. De grootte van de transporten varieert voornamelijk door onttrekkingen en verplaatsingen en gaan in de tijd niet gelijk op met waargenomen morfologische veranderingen;
2. De richting van de berekende transporten is niet veranderd voor de periodes die zijn gebruikt in LTV V&T-rapport G-2¹⁶.

De conclusie wat betreft de richting van het transport tussen het westelijk en oostelijk deel van de Westerschelde wordt ondersteund door recente monitoring van stortingen in diepe delen van macrocel 4 (IMDC, 2012). Hierin wordt geconstateerd dat, ondanks baggeractiviteiten in het Gat van Ossensisse, het sedimentvolume in macrocel 4 maar beperkt afneemt en dat de sedimentaanvoer vermoedelijk vanuit macrocel 3 plaatsvindt. De zandbalans ondersteunt dit met de waarneming dat, gemiddeld genomen, er een sterke aanvoer van sediment bestaat van macrocel 4 naar macrocel 5. Morfologische verschilkaarten wijzen op een overheersend vloedgerichte transportrichting (waargenomen migratierichting bodemvormen).

5.3 Conclusies slib- versus zandtransporten uit data-analyse

In LTV V&T-rapport G-3 zijn de berekende transporten in verder perspectief geplaatst door de volumebalans waarop ze gebaseerd zijn nader te bestuderen door de bijdrage van zand en slib apart te beschouwen. De resultaten van de zand- en slibbalans staan in Figuur 5.3. Het belangrijkste verschil tussen transporten in de zand- en slibbalans is dat het berekende zandtransport van macrocel 1 en 3 naar de monding is gericht en het berekende slibtransport in die macrocellen van west naar oost is gericht.

16. Er zijn wel kortere periodes bekend, die een andere berekende richting geven voor de totale sedimentuitwisseling tussen Westerschelde en monding, vooral tussen 2000 en 2005, zie onder meer Haecon, 2006.



Figuur 5.3 Berekende transporten per jaar uit de zand- en slibbalans (trends 1994-2000, LTV V&T-rapport G-3).

De omvang van de transporten in Figuur 5.3 moet worden gezien als een eerste indicatie. De getallen die zijn gebruikt voor de sedimentatie van slib en voor de transporten van zand en slib naar het Land van Saeftinghe en naar de Zeeschelde hebben een betere onderbouwing nodig. Verder zijn de omvang en de locaties die bij bepaling van erosie en sedimentatie van slib zijn gebruikt afhankelijk van de gebruikte jaren.

Hoewel de exacte getallen dus ter discussie staan, is de belangrijke uitkomst van de zand- en slibbalans dat de berekende zandtransporten deels een andere richting hebben dan de slibtransporten. Slib levert hoogstwaarschijnlijk een netto positieve bijdrage aan de sedimentbalans van het Schelde-estuarium.

Wat aan slib sedimenteert in de Westerschelde, het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde maakt een verschil tussen de totale sedimentbalans en de zandbalans. Daarmee verloopt de omvang en het patroon van de zandtransporten anders dan wanneer naar de complete sedimentbalans wordt gekeken. Waarschijnlijk wordt er netto zand naar de monding getransporteerd, terwijl slib netto de andere kant op gaat, van de monding naar de Westerschelde. De fysische verklaring hiervoor wordt besproken in paragraaf 5.4.

5.4 Mechanismen die verschillen in netto sediment transport bij de monding verklaren

Op basis van data-analyse en modelstudies is de conclusie / hypothese geformuleerd dat bij de monding (raai Vlissingen – Breskens) er export van zand en import van slib optreden. In deze paragraaf wordt ingegaan op de fysische processen en mechanismen die deze constatering kunnen verklaren. Interessant is om na te gaan welke processen / mechanismen tot het tegengestelde netto transport van zand en slib kunnen leiden.

Processen en mechanismen die kunnen leiden tot netto sedimenttransport door een bepaalde raai zijn:

- 1 Reststroming veroorzaakt door rivierafvoer. Dit veroorzaakt een zeewaarts transport voor alle fracties van het sediment.
- 2 Reststroming door het effect van Stokes drift. Doordat het faseverschil tussen het verticale getij en het horizontale getij niet precies 90 graden is, is de waterstand tijdens

- vloed hoger dan tijdens eb. Dit heeft tot gevolg dat er een reststroomsnelheid in de zeewaartse richting ontstaat, zelfs als er geen rivierafvoer zal zijn.
- 3 Asymmetrie van het getij in maximale stroomsnelheid tijdens vloed en tijdens eb. Dit hangt samen met de asymmetrie in vloeduur en ebduur en de asymmetrie in perioden van stijgend en dalend tij.
 - 4 Asymmetrie van het getij in HW en LW kenteringsduur. Als de HW - kentering langer duurt dan de LW – kentering treedt er een netto landwaarts transport op van sediment in suspensie.
 - 5 Estuariene circulatie t.g.v. dichtheidsstroming door zoutindringing in het estuarium. T.g.v. deze circulatie is de reststroming dicht bij de bodem landwaarts gericht en aan het wateroppervlak zeewaarts gericht. Dit veroorzaakt een netto transport van sediment in landwaartse richting omdat er meer sediment in het onderst deel van de waterkolom bevindt.
 - 6 Horizontale circulatie. Doordat de verdeling in de dwarse richting van de stroming over de raai tijdens vloed anders is dan tijdens eb ontstaat er een netto circulatie in de horizontale richting. Dit kan tot netto sedimenttransport door de raai leiden.
 - 7 Dispersie. Hiermee wordt bedoeld menging op verschillende tijd- en ruimteschalen. Als wij naar het getij - gemiddeld (of netto) transport bekijken dan kan de heen- en weergaande getijstroming ook als menging mechanisme worden beschouwd. Hierdoor ontstaat er een netto sedimenttransport van gebieden met hogere sedimentconcentratie naar gebieden met lagere sedimentconcentratie.
 - 8 Asymmetrie in de depositie en erosie van slib (eigenlijk cohesief sediment), door 'lag-effecten' en biologische activiteit. 'Lag-effecten' is de samenvattende term voor de aanrijking van fijn sediment die optreedt doordat slib op de bodem aan elkaar kleeft en daardoor relatief moeilijk erodeert¹⁷. Biologische activiteit heeft onder andere betrekking op de vorming van 'faecel pellets' door schelpdieren, die het fijn sediment uit de waterkolom filteren en samenkleven. Het fijne sediment komt hierdoor in de vorm van korreltjes, met een korreldiameter van fijn zand op de bodem en vertoont ander gedrag bij erosie, transport en sedimentatie dan het oorspronkelijke slib¹⁸. Ook de aanwezigheid van vegetatie op de schorren (voor de aanwezigheid van zeegras in het litoraal en sublitoraal geldt dit ook, maar in het Schelde-estuarium is zeegras vrijwel afwezig) kan leiden tot andere afzettingscondities, die kunnen leiden een verschil in de depositie en erosie van zand en slib.

Hieronder wordt per mechanisme bekeken of het geconstateerde verschil in netto transport van slib en zand kan worden verklaard.

- 1 Reststroming door rivierafvoer werkt voor zowel zand als slib. Het is zeer onwaarschijnlijk dat dit proces zandexport en slibimport tegelijk kan veroorzaken.
- 2 Anders dan rivierafvoer veroorzaakt de reststroming door Stokes drift geen netto flux van water, alleen een reststroomsnelheid. De werking hiervan op zand en slib kan anders zijn maar het is onwaarschijnlijk dat dit zandexport en slibimport tegelijk kan veroorzaken.

¹⁷ Zie voor beschrijvingen van *settling lag* en *scour-lag* effecten bijvoorbeeld de klassieke publicaties van Van Straaten, Kuenen en Postma, b.v. Van Straaten, L. M. J. U. & Kuenen, P. H. (1957): *Accumulation of Fine-grained Sediments in the Dutch Wadden Sea. Geologie en Mijnbouw (NW. Ser.) Vol 19, p. 329-35* en Postma, H. (1967): *Sediment Transport and Sedimentation in the Estuarine Environment. In: Estuaries. Ed. Lauff, H. G., Washington D. C, p. 158-179.*

¹⁸ De vorming van 'faecel pellets' of 'pseudo faeces' wordt een belangrijke rol toegedicht in de aanrijking van slib rond mosselbanken en de rol van mosselen als 'bio-engineers'. Ook kokkels vormen slibkorrels. Een zeer toegankelijke beschrijving staat in het Waddenboek

- 3 De asymmetrie in maximale stroomsnelheid heeft kwalitatief dezelfde werking op zand en slib qua netto transport. Dit is hoogstwaarschijnlijk niet de verklaring van het tegengestelde netto transport van slib en zand bij de monding.
- 4 Asymmetrie van het getij in HW en LW kenteringsduur werkt alleen voor zwevend sedimenttransport en heeft dus vooral effect op fijne fracties van het sediment. Dit kan dus eventueel een deel van de verklaring zijn voor het tegengestelde netto transport van slib en zand bij de monding.
- 5 Estuariene circulatie veroorzaakt een landwaarts transport voor alle fracties van het sediment en de werking is sterker voor grovere fracties. Het kan dus zeker niet de verklaring zijn voor het tegengestelde netto transport van slib en zand bij de monding.
- 6 Horizontale circulatie. Er kunnen verschillende redenen zijn voor horizontale circulaties. Eén daarvan is de variatie van waterdiepte langs een dwarse raai samen met het verschil in waterstand tijdens vloed en tijdens eb. De circulatie hierdoor is zodanig dat in dieper deel van de raai de stroming zeewaarts gericht is en in ondieper deel landwaarts. Dit kan de verklaring zijn als in dieper deel relatief meer zandtransport optreedt terwijl in ondieper deel relatief meer slibtransport optreedt.
- 7 (en 8) Dispersie, 'lag effecten' en biologische activiteit kunnen de verklaring geven. Het belangrijke verschil tussen zand- en slibtransport hierbij is dat de aanpassingslengte en –tijd voor slibtransport relatief groter is. Een verschil in slibconcentratie kan ontstaan door het feit dat er kalme gebieden in het estuarium zijn, bijvoorbeeld de havenbekkens, waar het slib kan bezinken en inactief wordt gemaakt. Dit veroorzaakt een verlaging van de slibconcentratie binnen het estuarium, die leidt tot een netto slibtransport van buiten naar binnen. Voor zand is dit effect minder omdat zand minder gemakkelijk naar deze kalme gebieden kan worden getransporteerd. Ook de 'lag effecten' en biologische activiteit kan leiden tot sedimentatie van slib en daarmee via de verlaging van de concentratie een netto transport van slib genereren. In het bestaande slibtransport model is dispersie een belangrijk mechanisme voor slibimport, biologische activiteit is in de modellen niet opgenomen.

Samenvattend, de mogelijke processen / mechanismen, die tot het tegelijk optreden van zandexport en slibimport kunnen leiden, zijn asymmetrie van het getij in HW en LW kenteringsduur, horizontale circulatie en dispersie in combinatie met 'lag effecten' en biologische activiteit.

5.5 Sedimenttransporten volgend uit de veranderde waterbeweging

Deze paragraaf betreft pijl 4 van Figuur 5.1 en beschrijft op basis van theorie en simulaties hoe de veranderingen in de bodem, leidend tot veranderingen in de waterbeweging ook weer effect hebben gehad op het sedimenttransport (zie schematisatie in Figuur 2.1).

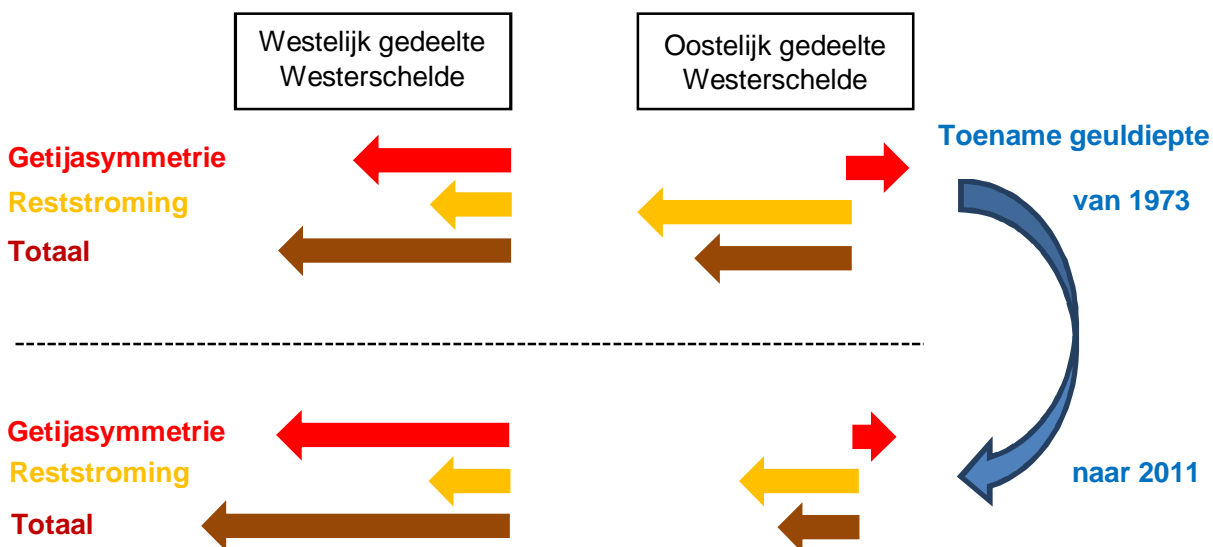
Om de consequenties van de waargenomen veranderingen in de getij-asymmetrie voor het netto sedimenttransport te begrijpen moet de asymmetrie van het horizontale getij (debiet en stroomsnelheid) worden geanalyseerd.

Hiervoor is de kombergingsbeschouwing uit Hoofdstuk 2 (en bijlage 1) te gebruiken, evenals de analyse van de waterbeweging bij historische bodems (LTV V&T-rapport G-4). Hierin wordt beredeneerd dat het horizontale getij bij een bepaalde raai beïnvloed wordt door het verticale getij in het hele gebied landwaarts van de raai. Voor een raai tussen Bath en Hansweert wordt het horizontale getij in belangrijke mate bepaald door het verticale getij en de komberging bij Bath. Voor die raai is het horizontale getij veranderd van vloeddominant in het begin jaren 1970 tot mogelijk licht ebdominant nu. Dit betekent dat ter plekke van die raai het netto sedimenttransport mogelijk is veranderd van landwaarts naar een klein netto transport zeewaarts.

Voor raaien zeewaarts van Hansweert wordt het horizontale getij door het verticale getij bij zowel Bath als Hansweert (en in de Zeeschelde) beïnvloed. Door de tegengestelde ontwikkelingen bij de twee stations is het moeilijker te zeggen of de veranderingen tot meer netto landwaarts dan wel zeewaarts transport hebben geleid. Dit verklaart de waarneming (blok "Wisselwerking" in Figuur 5.1) dat er 'geen doorslaggevende verandering in de asymmetrie van de waterbeweging en sedimenttransport' is gevonden. Deze waarneming betreft de grootschalige ontwikkelingen.

Waarschijnlijk heeft de verandering van de getij-asymmetrie wel invloed gehad op de mesoschaal in het oostelijke deel van de Westerschelde. Verder lijkt het verloop in de tijd van de veranderingen in het netto sedimenttransport tussen het westelijke deel en het oostelijke deel van de Westerschelde (Figuur 5.2) wel overeen te komen met het verloop in de tijd van de getij-asymmetrie bij Bath en Hansweert. Het netto transport is in alle drie de deelperioden landwaarts, met een waarde die maximaal is in de tweede periode (1976-1992). Dit heeft er mogelijk te maken dat in deze periode de ebdominantie bij Hansweert al grotendeels is afgenomen maar de vloeddominantie bij Bath nog voor een aanzienlijk deel aanwezig is.

Het netto sedimenttransport wordt ook nog door andere factoren beïnvloed, zoals het reststromingsveld en de snelheidsverdeling langs een raai (die in hoge mate door de vorm van het dwarsprofiel wordt bepaald, met inbegrip van de verdeling over eb- en vloed gedomineerde geulen en geuldelen). Voor de reststroomsnelheid kan worden gezegd dat door de snellere indringing het getij meer op een staande golf gaat lijken. Dit heeft als gevolg dat zeewaarts gericht reststroomsnelheid ter compensatie van de Stokes drift zwakker wordt. Een kortere looptijd van de golf gaat dus samen met minder zeewaarts transport.



Figuur 5.4 Schematische weergave invloed toegenomen geuldiepte op het residuele zandtransport door getijasymmetrie, reststroming en het totaal van beide.

De veranderingen in sedimenttransporten, volgend uit de veranderde waterbeweging, zijn ook gericht onderzocht met behulp van een viertal historische bodems (uit 1973, 1983, 2006 en 2011, zie LTV V&T-rapport G-4). In Figuur 5.4 is het belangrijkste resultaat daarvan weergegeven. Op basis van de historische bodems kon worden vastgesteld dat de verschillen aangaande zandtransport tussen het Westen en Oosten van de Westerschelde tussen 1973 en 2011 zijn toegenomen.

In de loop der tijd lijkt het netto zandtransport in het westelijke gedeelte meer ebgedomineerd te worden, terwijl de ebdominantie juist lijkt af te nemen in het oostelijke gedeelte. De overgang tussen beiden ligt tussen Terneuzen en Hansweert. De uitkomsten van de modelsimulaties komen overeen met Figuur 5.3 en LTV V&T-rapport G-2.

5.6 Van transporten naar (veranderingen in) grootschalig gedrag

De laatste stap die beredeneerd moet worden (pijl 5 in Figuur 5.1) is de vraag of er zodanige veranderingen in het estuarium zijn opgetreden dat de wisselwerking tussen getij en morfologie, via veranderingen op de grootschalige sedimentbalans, tendeert naar een andere (dan voorheen) situatie van geometrie met bijbehorend getij, op lange termijn.

De analyse van het getij en de met de sedimentbalansen berekende sedimenttransporten laten geen grootschalige veranderingen zien in de richting van de sedimenttransporten. Geconcludeerd wordt dat in het huidige Schelde-estuarium deze terugkoppeling niet van belang is voor de lange termijn en grootschalige ontwikkeling van het estuarium.

Er zijn met het onderzoek wel belangrijke verbeteringen in het conceptueel model bereikt.

1. Gebruik import/export niet als indicator;
2. Historisch gezien is het verlies van (zandig) sediment en toename getijslag al veel langer aan de gang;
3. Er zijn wel belangrijke verschuivingen in sedimentinhoud in delen van estuarium;
4. Menselijke ingrepen blijken hierin te domineren.

Ad 1: Import/ export is geen indicator van veranderingen in het sedimenttransport en ook geen indicator van grootschalige ontwikkelingen van het Schelde-estuarium. Het is betekenisvoller om de ontwikkelingen van de sedimentvolumes en doorstroomoppervlaktes te beschouwen.

Ad 2, 3 en 4: in hoofdstuk 6 zal, met de lange termijn historische ontwikkeling als logisch startpunt, een grootschalige ontwikkeling worden beschreven waarbij de rol van menselijke ingrepen, door de eeuwen heen, richting heeft gegeven. Het nu verbeterde conceptuele model kan op basis daarvan, samen met lange termijn simulaties, een toekomstperspectief schetsen.

6 Historische ontwikkeling en toekomstperspectief Westerschelde

6.1 Inleiding

Hoofdstuk 3 beschreef een conceptueel model voor een trechtervormig estuarium met een meergeulensysteem, platen, slikken en schorren. Dit is vervolgens verbijzonderd voor het Schelde-estuarium en vooral de Westerschelde. Hierbij zijn de waarnemingen aan, vooral, de Westerschelde sinds 1955 gebruikt om het model te toetsen en verbeteren.

Een systeembeschrijving begint met de historie en ontstaansgeschiedenis van het estuarium. Door deze te bestuderen worden de oorsprong en richting van veel grootschalige processen tussen water, zand en slib duidelijker. Hierover is al gerapporteerd in eerdere systeembeschrijvingen (o.a. Deltares, 2011; Consortium Arcadis-Technum, 2007a, b; van der Spek, 1994). Ook in LTV Veiligheid en Toegankelijkheid is een historisch perspectief gerapporteerd, vanuit het perspectief van sedimentbronnen en –putten, in rapport K-17.

In dit rapport en hoofdstuk worden de feiten samengevat die nodig zijn om de richting te schetsen waarin het estuarium zich (grootschalig) ontwikkelt. Dit leidt tot een systeembeschrijving die een duidelijke rol toekent aan de menselijke ingrepen, door de eeuwen heen. Aanvankelijk waren dit de bedijkingen. Sinds tenminste een halve eeuw is daar het beheer van de vaargeul bij gekomen. Deze beschrijving geeft, samen met extra inzichten die uit lange termijn simulaties komen, een perspectief voor toekomstige ontwikkeling, redenerend vanuit het huidige gebruik van het estuarium.

6.2 Historisch perspectief, daaruit voortvloeiende ‘eigen’ evolutie

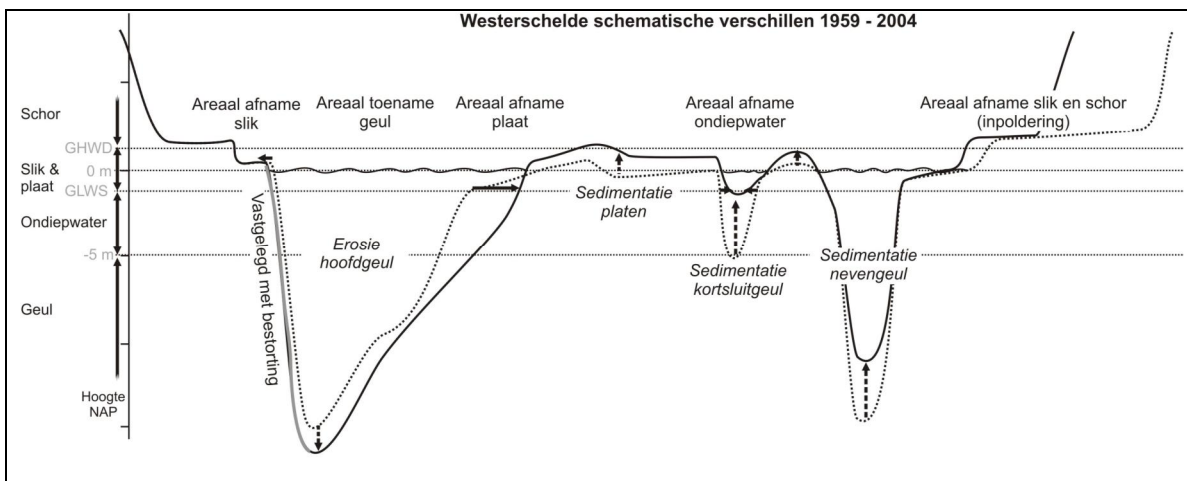
Het Schelde-estuarium, en zeker de Westerschelde, heeft zich anders ontwikkeld dan meeste ‘estuaria (zie Van der Spek, 1994, Deltares, 2011). Een belangrijk moment in de ontwikkeling was het moment dat de Westerschelde (toen nog Honte geheten) verbonden raakte met de Schelde rivier en steeds belangrijker werd als monding van die rivier (ten koste van de Oosterschelde). Deze nieuwe situatie en de menselijke ingrepen (denk aan inundaties, inpolderingen, bedijkingen) gingen de honderden jaren daarna een sturende rol spelen. Door de natuurlijke opslibbing van de intergetijdegebieden ontstond in de loop van de eeuwen steeds meer de voor estuaria kenmerkende trompetvorm. Een meergeulensysteem kon ontstaan (bleef aanwezig) waar de ruimte tussen de dijken (die de externe harde begrenzing van het estuarium zijn) voldoende is voor elkaar ontwijkende eb- en vloedgeulen.

De ontwikkeling van de Westerschelde is daarmee een relatief ‘jonge’ ontwikkeling (wetend dat de tijdschaal van estuaria veelal duizenden jaren omvat). Hierbij hebben eerder de geulen de dijken gevolgd dan omgekeerd. De bochten in de Westerschelde lijken op meanders, maar zijn het niet¹⁹. Bovendien worden de geulen in hun beweging beperkt door harde lagen in de ondergrond (zie LTV V&T-rapport A-28 en A-29). De Westerschelde is dus feitelijk ingebed in een systeem van harde zijkanten, zowel bij de dijk als (deels) langs de geulen zelf.

Al het voorafgaande stuurde de afgelopen eeuw de keuzes in het vaarwegbeheer. Dit leidde tot de huidige ligging van de hoofdgeul, inclusief bijbehorend drempelonderhoud. Momenteel beperken dus zowel vaarwegligging en harde lagen (beiden intern) als de dijken (extern) de bewegingsruimte voor (grootschalige) morfologische dynamiek.

¹⁹ Ondanks de vergelijkbare geometrie is de Westerschelde dus geen ‘incised valley system’, een door rivier en zijriviertjes in de loop van duizenden tot miljoenen jaren in de harde ondergrond ingesleten vallei die tijdens het Holoceen is ‘verdrongen’. De oorsprong en daarmee de geometrie van veel andere estuaria is wel zo vastgelegd.

De afgelopen decennia vonden tegelijkertijd structurele wijzigingen plaats in omvang en structuur van platen en geulen. Figuur 6.1 geeft een overzicht. De hoofdgeulen zijn ruimer geworden. Het daaruit verdwenen sediment is verwijderd (zandwinning), in de nevengeulen beland (vooral de Schaar van Waarde, het 'Vaarwater langs Hoofdplaat' en het Middelgat) of op intergetijdegebieden gekomen. Hierbij kwamen de hoogste delen van de platen steeds verder boven 'hoog water' uit en overstromen daardoor minder vaak. Kortsluitgeulen verdwenen hierbij, wat zeer waarschijnlijk een zelfversterkend proces is geweest (zie LTV V&T-rapporten K-16 en K-17).



Figuur 6.1 Schematische voorstelling van de veranderingen op de mesoschaal, voor hele Westerschelde

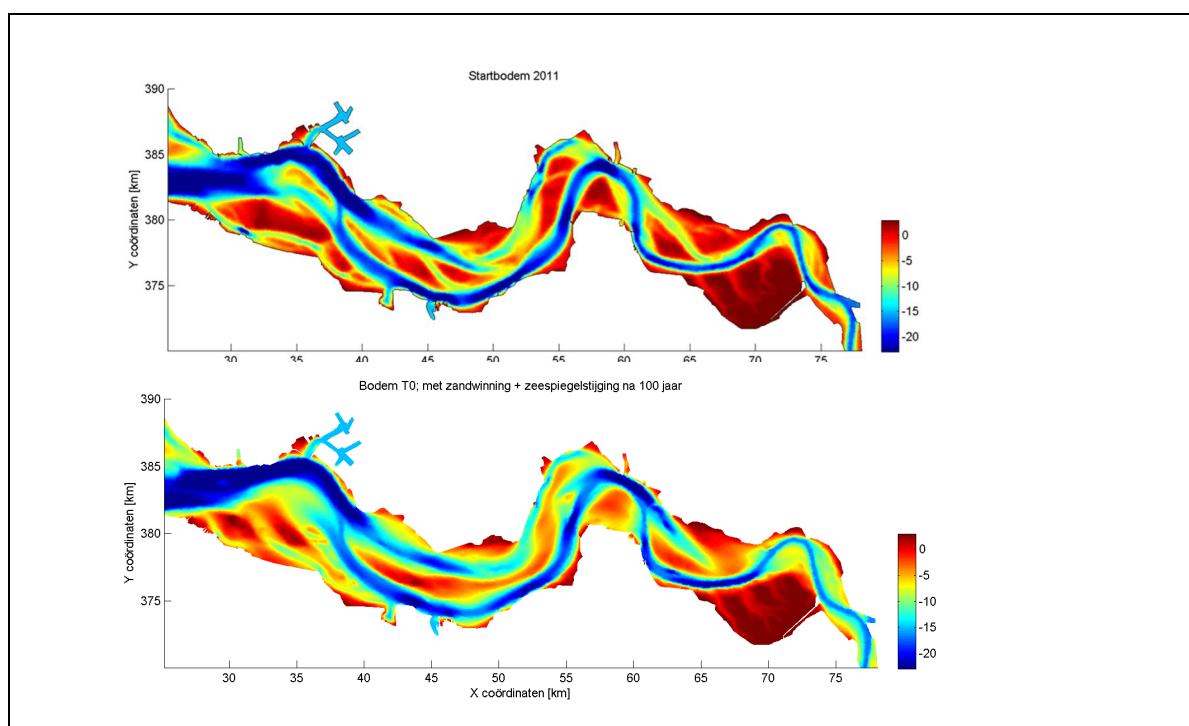
Tegelijkertijd met voorafgaande ontwikkelingen kende de Westerschelde vrijwel voortdurend een toename van de waterinhoud. Voor het westelijk deel lijkt dit voornamelijk veroorzaakt door de toegenomen getij-indringing (er moet meer water naar bovenstrooms worden vervoerd per getij). Voor het oosten lijkt dit in de eerste plaats veroorzaakt door het vaarwegbeheer (mens verwijdert sediment via zandwinning en stortbeleid), terwijl door de verdieping zelf de aangrenzende geuldelen zullen uitruimen, zie paragraaf 3.7 en Figuur 3.12.

Al het bovenstaande impliceert een 'eigen' evolutie van de Westerschelde, die in ieder geval een richting uitgaat die qua grootschalige dynamiek niet vergelijkbaar is met het verleden, met als belangrijkste trends het toegenomen belang van de hoofdgeul en de afname van migratie van geulen en platen.

6.3 Toekomstperspectief (lange termijn)

Een realistisch toekomstperspectief kan het best beredeneerd worden vanuit het historisch perspectief, met een min of meer stabiele voortzetting, op hoofdlijnen, van het huidige gebruik van het estuarium. Dat betekent uitgaan van een begrenzing (dijken) op basis van de huidige geometrie en van een vaargeul met de huidige onderhoudsdiepte. Ook worden geen grootschalige veranderingen in de arealen van schorren, tidale en subtidale habitats aangenomen.²⁰ Om een verwachte ontwikkeling (toekomstige configuratie) te kunnen schetsen kan gebruik worden gemaakt van de numerieke simulaties (gerapporteerd in zie LTV V&T-rapport G-11) waarbij 100 jaar is doorgerekend. Ter illustratie dient Figuur 6.2.

²⁰ In de Zeeschelde leveren de aanleg en ingebruikname van GOG-en en GGG-en wel gebieden die een relatief grote omvang ten opzichte van het estuarium ter plaatse hebben.



Figuur 6.2 Bodems aan begin (2011) en eind van een 100-jarige simulatie gebaseerd op huidig beleid

Het toekomstperspectief op hoofdlijnen dat hieruit volgt is:

- i) Het meergeulenstelsel in de definitie van de aanwezigheid van zowel een eb- als een vloedgeul zal nog lange tijd in stand blijven, maar
- ii) met minder grootschalige dynamiek dan de afgelopen eeuw.
- iii) De trend dat de hoofdgeul steeds dominantier wordt in het profiel zal zich voortzetten.
- iv) Een waarschijnlijke consequentie hiervan zal zijn dat plaatcomplexen minder zullen verjongen en meer aaneengesloten zijn / blijven. Negatieve effecten van verhoogde plaatcomplexen zullen niet eenvoudig verdwijnen, want bij meer getijslag past in theorie meer sediment op de platen (zie paragraaf 3.2), al is niet duidelijk voor welke delen van de Westerschelde dit volledig opgaat.

De historische en toekomstige verkenningen leren ook dat de ontwikkeling van de zeespiegelstijging (en de autonome toename van de getijslag op de Noordzee, zie LTV V&T G-5) minder sturend is voor het grootschalig gedrag dan de vastgelegde geometrie (bedijkingen, vaargeul). De zeespiegelstijging heeft vooral effect op de toekomstige configuratie vanwege de invloed op de sedimentbehoefte (zie LTV V&T-rapport K-17). De sedimentbehoefte in de monding (meegroeien met de zeespiegelstijging) is een belangrijk gegeven. Anderzijds mag verwacht worden dat er beleid gaat ontstaan om verdere amplificatie van het getij tegen te gaan, omdat een dergelijke ontwikkeling, uitgaand van behoud van kenmerkende processen en morfologische en ecologische diversiteit, onwenselijk is. Zulk beleid vraagt extra sediment om via minder ruime geulen de getijgolf te dempen, dan wel op andere plaatsen dit te laten gebeuren. Dat betekent actief tegengaan wat volgens paragraaf 3.6 kan gebeuren (toename doorstroomoppervlakte als reactie op meer getijprisma) bij een verdere stijging van de zeespiegel. Het sediment is in alle delen van het estuarium nodig, maar in het westen gaat het om het grootste volume. De enige wijze waarop een dergelijk beleid is meegenomen in de verkenningen is via het stoppen van zandwinning.

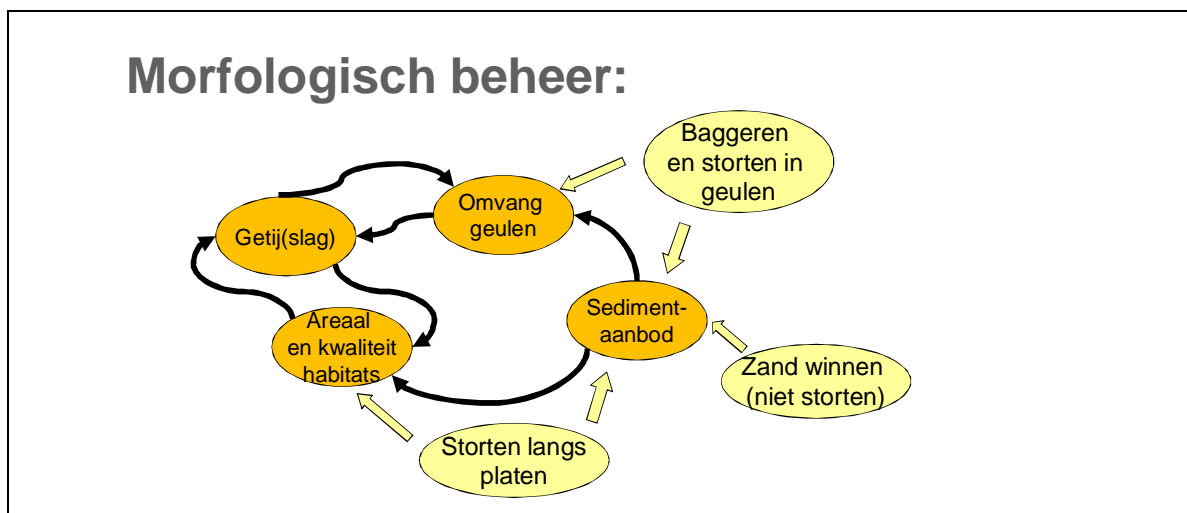
Consequenties voor doelstellingen natuurlijkheid?

Het hiervoor geschetste perspectief zou een plaats moeten krijgen in de doelstellingen voor natuurlijkheid voor de Westerschelde²¹. Het lijkt namelijk niet mogelijk een natuurdoelstelling te bereiken die is gebaseerd op het vasthouden van de actuele waarden en soorten of terugkijkt naar de morfologische dynamiek die een halve eeuw geleden nog kon optreden.

Een studie naar uitwerking van alternatieven van buitendijks natuurherstel (Deltares, 2013) levert het inzicht dat de verandering die een natuurherstelproject veroorzaakt een orde kleiner is dan de natuurlijke veranderingen. Dit maakt kwantificeren van natuurwinst via arealen (ha's van verschillende habitats) moeilijk te onderbouwen. Het begrip van de estuariene processen dat via de rapportages van LTV V&T wordt geleverd maakt het in principe mogelijk de werkwijze waarbij gepoogd wordt natuurwinst in ha's uit te drukken te vervangen door een die gebaseerd is op behoud van estuariene processen, zowel op grote als op kleine schaal.

6.4 Mogelijkheden beïnvloeding getij

In paragraaf 1.2, bij het bespreken van de beheervragen, en in de voorafgaande paragraaf 6.3, vanuit de lange termijn ontwikkelingen, is het belang van beperking van de indringing (amplificatie, voortplantingssnelheid, afname asymmetrie) van het getij besproken.



Figuur 6.3 Wijze waarop morfologisch beheer ingrijpt

Morfologisch beheer grijpt tegelijkertijd in op morfologie / sedimentvoorraden en getij (Figuur 6.3). Het getij representeert de grootschalige beheerdoelstelling, het areaal en kwaliteit van habitats de doelen op korte termijn en kleine schaal. De aangrijpingspunten daarvoor zijn het sedimentaanbod en vooral de ontwikkeling van de geulen.

In paragraaf 3.7 en bijlage 2 zijn de algemene mechanismen uiteengezet voor ingrepen die het getij trachten te beïnvloeden. Samengevat komen deze er, voor wat betreft de amplificatie van het getij, neer op twee relatief eenvoudig te begrijpen principes:

- Meer / minder komberging (de hoeveelheid water die nodig is om tot waterstandsverandering te leiden) leidt tot zwakkere / sterkere amplificatie van het getij. Hier is voor een bepaalde locatie het landwaartse deel van belang
- Verkleining / vergroting van het stroomvoerende vermogen (hoe makkelijk of moeilijk het water aan- en afgevoerd kan worden) leidt tot zwakkere / sterkere amplificatie van het getij. Hier is voor een bepaalde locatie het zeewaartse deel van belang.

²¹ Bovendien zijn natuurwaarden in een estuarium per definitie al veranderend.

Voor de dubbele doelstelling (grote en kleine schaal) moet het subtiële spel van de lokale geometrieën goed worden begrepen, om een sedimentstrategie per deel van het estuarium te ontwerpen.

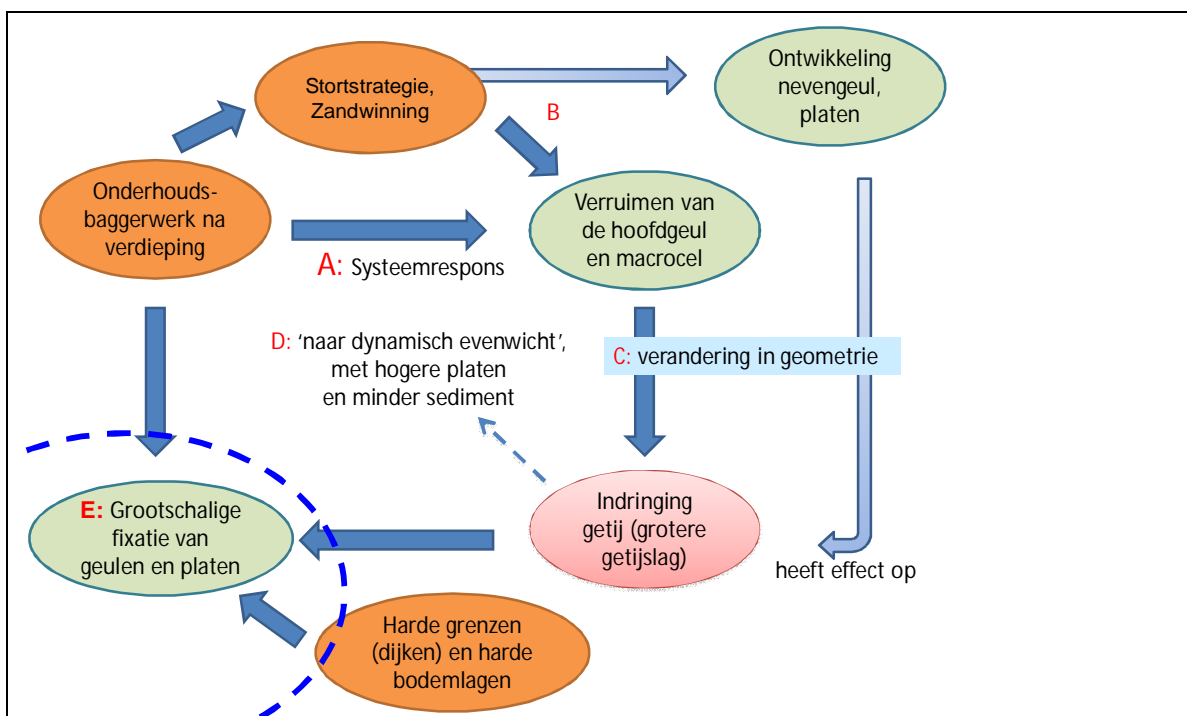
Dit rapport suggereert dat enkelvoudige maatregelen die grote wijzigingen in de getijslag bereiken niet voor de hand liggen, maar dat, wanneer het effect op de getijslag steeds in de afweging wordt meegenomen, er in totaliteit en op termijn wellicht toch een substantieel effect kan worden bereikt. In LTV-V&T-rapport G-12 is bovendien onderzocht wat de rol van de monding is in de ontwikkeling van het getij.

6.5 Conceptueel model reactie op sediment management geulen

De in dit rapport gepresenteerde resultaten komen samen in Figuur 6.4. Het verklaart de waarnemingen die leiden tot het in paragraaf 6.3 geschetste perspectief dat de hoofdgeulen steeds prominenter in het profiel komen en dat de grootschalige dynamiek verder afneemt in een systeem dat wel uit meerdere geulen blijft bestaan.

Het eindbeeld (E in de figuur) wordt bereikt door drie gezamenlijke aandrijvende krachten:

- Het vaargeulonderhoud zelf
- De sterkere indringing van het getij, op zich ook deels versterkt door vaargeulbeheer
- De harde begrenzingen in de bodem (harde lagen) en langs de oevers (dijken)



Figuur 6.4 Conceptueel model voor invloed vaargeulbeheer op grootschalige ontwikkeling meergeulenstelsel

Nadere toelichting op de figuur per stap is:

- A. De reactie op verdieping en onderhoudsbaggerwerk is dat de aanliggende delen van de hoofdgeul ook verruimen, door herverdeling van sediment (zie paragraaf 3.7). Sediment verplaatst zich naar de drempel en wordt van daaruit weer verwijderd. De bestemming van het sediment dat op deze wijze uit de geulen is verdwenen kan (i) buiten de macrocel liggen (door zandwinning of een grootschalige stortstrategie die het elders brengt, b.v. Oost-West) of (ii) in (verdwenen) kortsluitgeulen en op de intergetijdegebieden (vooral de platen) zijn gekomen.

- B. Het is afhankelijk van de stortstrategie hoe de omvang van hoofdgeul en nevengeul zich daadwerkelijk ontwikkelen. Het is (gezien A) lastig om verruiming van de hoofdgeul tegen te gaan, tenzij er hoge baggerinspanningen geaccepteerd worden (dichtbij de baggerlocatie storten betekent een hoge omloopsnelheid van het materiaal). Een afname van de omvang van de nevengeul beperkt het getij (maar mogelijk niet zo sterk als een afname van de omvang van de hoofdgeul), maar kan op gespannen voet staan met de doelstelling de verhouding tussen hoofd- en nevengeul in stand te houden.
- C. De veranderingen in de geometrie hebben invloed op de indringing van het getij. Tot nu toe zijn de geulen vooral in omvang toegenomen en hebben geleid tot een grotere getijslag (zie paragraaf 4.4)
- D. Uit hoofdstuk 3 volgt dat een efficiënte manier om een nieuw (semistabiel) evenwicht te bereiken (met een versterkt geamplificeerd getij) een combinatie van erosie van geulen en sedimentatie van platen is. Dit leidt tot de hypothese dat plaatrandstorting, als ze leiden tot toename van zandvolume in het intergetijdegebied, effectief meehelpt aan het verminderen van baggerinspanning, maar wel met instandhouding van versterkte toename van de getijslag.

7 Antwoorden op beheervragen van het Deltaprogramma

1: Op welke tijdschaal zullen binnen het estuarium de veranderde stroming en de zandvoorraden in evenwicht zijn?

Hat antwoord op deze vraag is sterk afhankelijk van de gehanteerde uitgangspunten. Er zal altijd asymmetrie in waterbeweging en sedimenttransport blijven bestaan, evenals sedimentatie in de vaargeul met noodzaak tot baggeren en verplaatsen van de specie.

A. Bij netto onttrekkingen uit de oostelijke helft van de Westerschelde en de Zeeschelde²² (t.b.v. van zandwinning, of vanwege het bagger- en stortbeleid) kan de amplificatie van het getij verder gaan (zie de terugkoppelingen op de megaschaal in hoofdstuk 4) en wordt er ook in die zin geen evenwicht bereikt;

B. Bij beheer dat is gericht op het netto behoud van de sedimentvoorraden en behoud van de bestaande morfologie (omvang hoofd- en nevengeulen blijft in stand) kan op megaschaal een evenwicht worden bereikt tussen getij en sedimentvoorraden, omdat er geen verdere versterking van het getij plaatsvindt. Dit betekent dat er voldoende stortruimte gevonden moet worden in het oosten van de Westerschelde (bijvoorbeeld in de diepere delen van de hoofdgeulen), zonder dat deze stortingen de bestaande morfologie wijzigen. Dit kan betekenen dat de bagger- en stortvolumes in het oosten (weer) omhoog gaan.

C. De stijgende zeespiegel is bij voorgaande punten nog buiten beschouwing gebleven. Deze komt bovenop de al in gang gezette veranderingen.

D. Ten aanzien van morfologische elementen op de mesoschaal, zoals kortsluitgeulen en platen moet het begrip 'evenwicht' zeer waarschijnlijk gelezen worden in de lijn van de evaluatiemethodiek (paragraaf 1.2). Dit betekent in ieder geval 'geen verdere achteruitgang in areaal en aanwezigheid van bijbehorende gradiënten en ontwikkelingsdynamiek'. Het bereiken daarvan is afhankelijk van de invulling van het beheer op mesoschaal. De bijbehorende tijdschalen qua 'evenwicht' zijn als bij punt B.

2: Hoe belangrijk is sedimenttransport via de monding van het estuarium voor de ontwikkeling van de Voordelta? Zijn er relaties met de andere Deltabekkens?

Het relatieve belang van het sedimenttransport van de Monding naar de Westerschelde is klein, gezien vanuit de oppervlakte van de monding en de berekende transporten naar de Westerschelde. En het beperkte relatieve belang geldt helemaal wanneer de grootte van de Voordelta wordt beschouwd. Er is geen duidelijke relatie tussen de waargenomen ontwikkelingen (in de sedimentvolumes) in de monding en de Voordelta en veranderingen in de Westerschelde.

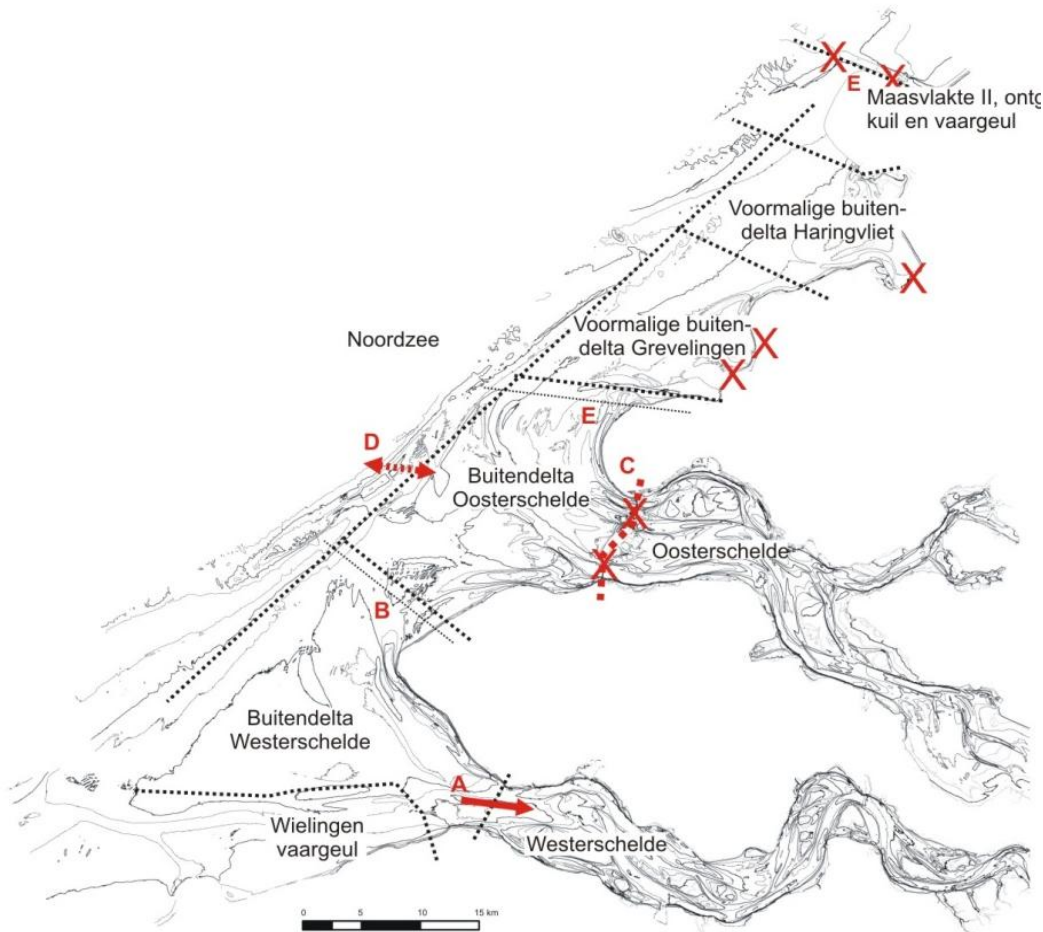
3. Wat is het effect van zeespiegelstijging op de sedimentbalans tussen de Voordelta en de Deltawateren? Wat is het effect van maatregelen?

De andere deltabekkens zijn in termen van sedimentuitwisseling (en wat betreft Haringvliet en Grevelingen ook qua wateruitwisseling) losgeknipt van de Voordelta. Er is geen relatie met de ontwikkelingen in de Westerschelde, waarvoor het antwoord al bij vraag 1 is gegeven. Het

22. Vanwege het transport van sediment oostwaarts en vanwege de verandering in de komberging en getijvoortplanting in de Zeeschelde. Dit effect is weliswaar (veel) kleiner dan in de Westerschelde, maar het is er wel.

effect van maatregelen in en voor andere bekkens valt verder niet onder het onderzoek voor het Schelde-estuarium.

Het losgeknipt zijn van de bekkens wordt uiteengezet met behulp van Figuur 7.1:



Figuur 7.1 schematische weergave van de Westerschelde, Monding en Voordelta met de sedimentuitwisseling

- A. De sedimentuitwisseling met de Westerschelde, transport van de monding naar de Westerschelde bij (versnelde) zeespiegelstijging;
- B. Er is momenteel een kleine verschuiving van de monding van het Oostgat naar het noorden, feitelijk een uitbreiding van de invloedssfeer van de monding van de Westerschelde. De monding van de Oosterschelde vertoont overigens eenzelfde ontwikkeling;
- C. Er is geen uitwisseling tussen Voordelta en Oosterschelde vanwege de aanwezigheid van de stormvloedkering;
- D. Er wordt aangenomen dat er geen uitwisseling is met de Noordzee en Zeelandbanken. De houdbaarheid hiervan wordt onderzocht in het kader van het onderzoek binnen B&O kust;
- E. Er is geen uitwisseling met Hollandse kust door combinatie van uitbouw Maasvlakte II, de daarbij horende ontgrondingskuil en de vaarweg.

X: Er is geen uitwisseling zand over deze rand.

Referenties

- Belmans, H. (1988). Verdiepings- en onderhoudsbaggerwerken in Wester- en Zeeschelde. Water nr 43, pp 184-194.
- Cleveringa, J., 2008. Morphodynamics of the delta coast (South-west Netherlands); Quantitative analysis and phenomenology of the morphological evolution 1964-2004, Alkyonreport A1881.
- Consortium Arcadis-Technum, 2007a. Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde. Achtergronddocument Morfologische Ontwikkeling: fenomenologisch onderzoek naar de ontwikkelingen op meso-schaal.
- Consortium Arcadis-Technum, 2007b. Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde. Achtergronddocument Systeembeschrijving Schelde-estuarium - Een visie op de macro-morfologische ontwikkeling.
- Deltares, 2011, Natuurherstel in de Westerschelde: de mogelijkheden nader verkend, 1204087, bijlagerapport
- Deltares, Arcadis en Svasek, 2013, Vervolgonderzoek drie buitendijkse maatregelen voor natuurherstel in de Westerschelde, 1204087
- Dronkers, J., 1986. Tidal asymmetry and estuarine morphology. Netherlands Journal of Sea Research 20, 117–131
- Dronkers, J., 2005, Dynamics of coastal systems, Advanced Series of Ocean Engineering, Volume 25, World Scientific
- EMPHASYS Consortium, 2000, Modelling estuary morphology and processes, Final report produced for MAFF Project FD1401, Report TR 111, HR Wallingford, UK.
- Eysink, W.D., 1990: Morphological response of tidal basins to changes. Proc. 22nd Coastal Engineering Conference, ASCE, Delft, p. 1948-1961.
- Eysink, W.D., 1992: Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function, Report H1300, phase 3.
- Friedrichs, C.T., Aubrey, D.G., 1988. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis, estuarine. Coastal and Shelf Science 27, 521–545.
- Haecon (2006). Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde. Rapport 1249760008/lvp.
- Holzhauser, H, T. Maris, P. Meire, S. van Damme, A. Nolte, K. Kuijper, M. Taal, C. Jeuken, J. Kromkamp, B. van Wesenbeeck, G. Van Ryckegem, E Van den Bergh en S. Wijhoven, 2011. Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium. Deltaresrapport 1204407.
- IMDC, 2012. Monitoringprogramma Flexibel Storten, deelopdracht 7: Analyse van stortingen in de diepe delen van de hoofdgeul. RA11076_Flexibel_Storten_DO7-DiepeDelen_v6

- Jeuken, M.C.J.L., Tanczos, I en Wang Z.B. 2003. Evaluatie van het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning sinds de tweede vaargeulverdieping op basis van veldwaarnemingen en het verbeterde cellenconcept Westerschelde. Z3467
- Jeuken, M.C.J.L., D. Hordijk, S. Ides, C. Kuijper, P. Peeters, B. de Sonnevile, J. Vanlede. 2007, Koploperproject LTV-O&M – Thema Veiligheid – deelproject 1. Z4384
- Jeuken, M.C.J.L., Wang Z.B. and D. Keiller, 2008, Impact of setbacks on the estuarine morphology, In Dohmen-Jansen, C.M. and S.J.M.H. Hulscher (eds.), River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM2007, Taylor & Francis, 2008, London, pp1125-1134.
- Jeuken, M.C.J.L. and Z.B. Wang, 2010, Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems, Coastal Engineering 57 (2010) 553-566, doi:10.1016/j.coastaleng.2009.12.004.
- Kornman, B.A., G.A. Liek en H.K. Schippers, 2002. Baggeren en storten in de Westerschelde: Een nieuwe kijk op onderhoudsbaggerwerk. RIKZ/AB/2002.840x
- Kreeke, J. van de & K. Robaczewska, 1993. Tide induced residual transport of coarse sediment; application to the Ems estuary. Netherlands Journal of Sea Research 31 (3): 209-220, Netherlands Institute for Sea Research.
- Mulder et al, 2012, Sedimentstrategie voor de ZW Delta: een verkenning van kansen. Deltares, rapport 1206856
- Schrijver M. & J van het Westende 2011, Stroommeting Put van Borssele. Rijkswaterstaat Zeeland, Meetadviesdienst. Rapportnr.0542S/ZHHW-2011-10, Middelburg
- StAB, 2008. Afdeling Bestuursrechtspraak van de Raad van State: Advies tracébesluit verruiming vaargeul Westerschelde. StAB/38254/H
- Technische Schelde Commissie, 2001. Langetermijnvisie Schelde-estuarium,– uitgave RWS & AWZ.
- Van Braeckel. A., F. Piesschaert en E. van en Bergh, 2007. Historische analyse van de Zeeschelde en haar getijgebonden zijrivieren. 19e eeuw tot heden, Instituut voor Natuur en Bosonderzoek, Rapport INBO.R.2006.29.
- Van der Spek, A.J.F., 1994. Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands, PhD-thesis, Universiteit van Utrecht.
- Van Rijn, L.C., 2011, Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; part 1: tidal wave propagation in convergent estuaries. Ocean Dynamics 61: 1719-1741. DOI 10.1007/s10236-011-0453-0
- Verbeek, H., F.T.G. Tank en M.D. Groenewoud, 1998. Drempels in de Westerschelde. Rapport RIKZ-98.011.
- Vroom, J. (2011). Tidal divides, A study on a simplified case and the Dutch Wadden Sea. MSc. Thesis, Technische Universiteit Delft
- Wang, Z.B., Jeuken, C., De Vriend, H.J., 1999. Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries. A literature study and applications to the Western Scheldt, WL|Delft Hydraulics report Z2749, Delft, the Netherlands.

- Wang Z.B. and J.C. Winterwerp, 2001, Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Conference RCEM2001 (IAHR), Japan.
- Z.B. Wang, C. Jeuken, H. Gerritsen, H.J. de Vriend, B.A. Kornman, 2002, Morphology and asymmetry of vertical tide in the Westerschelde Estuary, Continental Shelf Research, Volume/Issue 22/17 pp. 2599-2609.
- Wang Z.B., Vroom J., Van Prooijen B. C., Labeur R.J., Stive M.J.F., Jansen M.H.P., 2011. Development of tidal watersheds in the Wadden Sea, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM2011.
- Winterwerp, J.C., Z.B. Wang, M.J.F. Stive, A. Arends, C. Jeuken, C. Kuijper and P.M.C. Thoolen, 2001, A new morphological schematization of the Western Scheldt Estuary, The Netherlands, River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Conference RCEM2001 (IAHR), Japan.

Geciteerde LTV-V&T-rapportages, Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013:

- G-1: Data-analyse waterstanden Westerschelde.
 - G-2: Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde.
 - G-3: De rol van het slib in het Schelde-estuarium
 - G-4: Influence morphology on tide and sand transport.
 - G-5: Data-analysis water levels, bathymetry Western Scheldt.
 - G-7: Tidal Phenomena in the Scheldt Estuary, part 2.
 - G-8: Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij.
 - G-11: Simulaties met effectanalyse op schaal estuarium.
 - G-12: Effect morfologie monding Westerschelde op getij.
 - G-14: Response of tidal rivers to deepening and narrowing.
 - K-16: Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets).
 - K-17: Samenhang ontwikkelingen tijd- en ruimteschalen.
 - K-18: Ontwikkeling mesoschaal Zeeschelde (factsheets).
 - K-20: Simulaties met effectanalyse op mesoschaal.
 - B-21: Analyse havenstortvak W13
 - A-26: Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium.
 - A-27: Actualisatierapport Delft3D Schelde-estuarium.
 - A-28: Harde lagen Westerschelde
 - A-29: Harde lagen Beneden-Zeeschelde
- G-6: Plancke, Y; Maximova, T; Ides, S; Peeters, P; Taverniers, E.; Mostaert, F. (2012). Werkgroep O&M - Projectgroep Veiligheid: Sub project 1: Data Analysis and hypothesis - Lower Sea Scheldt. Version 4.0. WL rapporten, 756/05. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

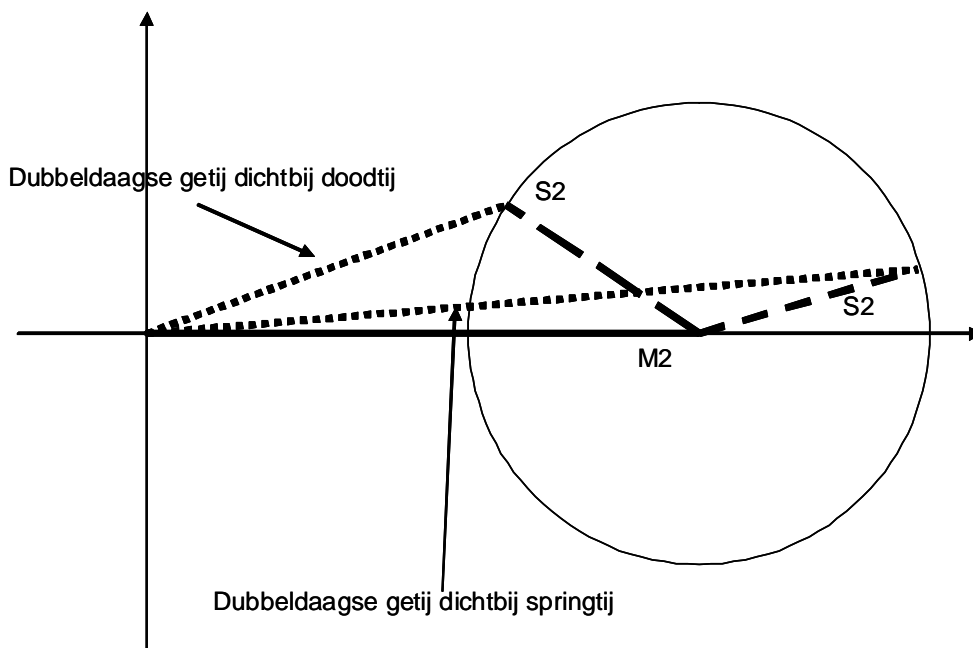
Bijlage 1: Theoretische beschouwingen, uitgebreid

Basisbegrippen over het getij

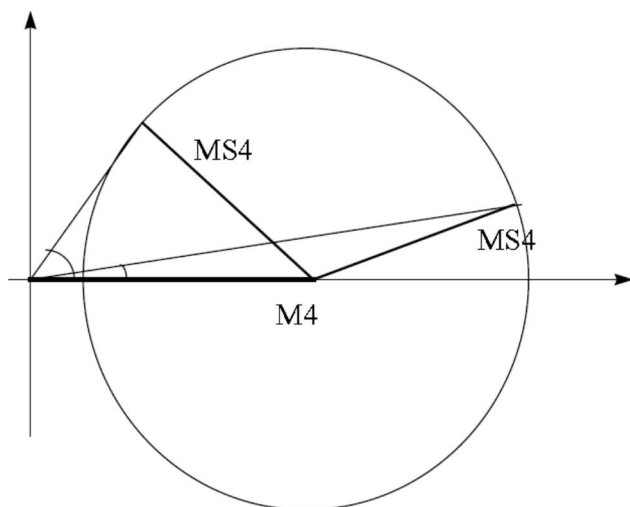
Eerst wordt een aantal basisbegrippen kort uitgelegd om de analyse en de resultaten, zoals in LTV V&T-rapport G-1 zijn gepresenteerd, beter te kunnen begrijpen.

In de analyse beschreven in rapport G-1 zijn Fourier - series bepaald voor elk tijdinterval van 25 uur of 24 uur en 50 minuten. Het enkeldaagse getij, bepaald uit de analyse, heeft dus exact de periode van het tijdinterval (25 uur of 24 uur en 50 minuut). Het dubbeldaagse getij heeft een periode van precies de helft van het tijdinterval. Ze moeten dus niet worden verward met de astronomische getijcomponenten, hoewel het tijdinterval zodanig gekozen is dat het dubbeldaagse getij ongeveer dezelfde periode als de M2 getijcomponent heeft.

Er is wel relatie tussen de Fourier – componenten en de astronomische componenten. In feite is het dubbeldaagse getij het resultaat van het samenspel van alle dubbeldaagse astronomische getijcomponenten (M2, S2, N2, ...). Dit samenspel van componenten is in Figuur 0.1 geïllustreerd voor M2 en S2, en in Figuur 0.2 voor M4 en S4. Hierbij is gebruik gemaakt van de presentatie van een cosinus functie als een complex getal, met de amplitude als modulus en fasehoek als de hoek t.o.v. de reële as. Het samengestelde getij is de som van de verschillende astronomische componenten met ongeveer dezelfde frequenties.



Figuur 0.1 : Samenspel tussen S2 en M2 componenten dat tot spring- doortij variatie leidt. S2 draait een keer rond de cirkel in een springtij doortij cyclus. Doortij heeft niet alleen een veel kleinere amplitude (lengte stippellijn), maar ook een veel sneller variërende fase (hoek tussen stippellijn en horizontale as), dan springtij.



Figuur 0.2 Samenspel tussen M4 en MS4 componenten. Door het feit dat de amplitudes van de twee componenten veel minder van elkaar verschillen, is het verschil tussen de situatie dichtbij springtij en de situatie dichtbij doodtij nog extremer.

De twee figuren laten zien dat de springtij-doodtij cyclus niet alleen een fluctuatie van amplitude van het getij veroorzaakt. Ook de fase van het getij kan sterk fluctueren, vooral in de periode rondom het doodtij. In werkelijkheid zijn er nog veel meer astronomische componenten van zowel dubbeldaagse als viermaaldaagse frequenties. Dit verklaart het enigszins chaotische verloop van de niet-gefilterde resultaten, zoals gerapporteerd in LTV V&T-rapport G-1.

Asymmetrie van verticaal en horizontaal getij

In LTV V&T-rapport G-1 van het rapport worden de veranderingen van het getij in het estuarium geanalyseerd aan de hand van de waterstandgegevens. Een van de eigenschappen van het getij uit de analyse betreft de asymmetrie van het getij, uitgedrukt in de relatie tussen de viermaaldaagse getijcomponent en de dubbeldaagse getijcomponent. De amplitude verhouding a_4/a_2 is een indicatie voor de sterkte van de asymmetrie terwijl het relatieve faseverschil f_4-2f_2 de aard van de asymmetrie bepaalt. Als het faseverschil negatief is dan is het getij vloeddominant en als het faseverschil positief is dan is het getij ebdominant. Vloeddominant betekent dat de periode van stijgend tij korter is dan dalend tij, en ebdominant betekent dat stijgend tij langer duurt dan dalend tij. Het gaat hier om het verticale getij en daarom kan het nog niet direct aan het netto sedimenttransport (import/export) worden gerelateerd.

Om relatie te kunnen maken met het netto sedimenttransport moet de asymmetrie van het horizontale getij worden beschouwd. De asymmetrie van het horizontale getij (debiet of stroomsnelheid) kan worden afgeleid uit die van het verticale getij door gebruik te maken van de continuïteit - vergelijking (vergelijking voor massabalans) van water:

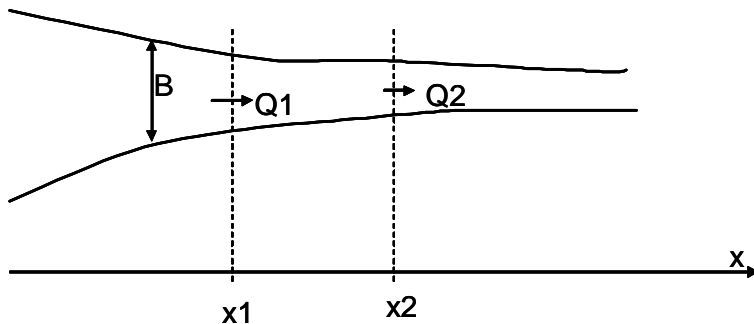
$$B \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{Bijlage 1.1})$$

Hierin:

- B = Bergende breedte van het estuarium
- z = Waterstand
- t = Tijd
- Q = Debiet
- x = Horizontale co-ordinaat langs het estuarium

Door deze vergelijking over een traject van het estuarium te integreren krijgen wij in het algemeen (zie Figuur 0.3) voor de relatie tussen debieten door twee raaien van het estuarium:

$$Q_1 - Q_2 = \int_{x_1}^{x_2} B \frac{\partial \zeta}{\partial t} dx \quad (\text{Bijlage 1.2})$$



Figuur 0.3 : relatie tussen debieten door twee raaien van het estuarium

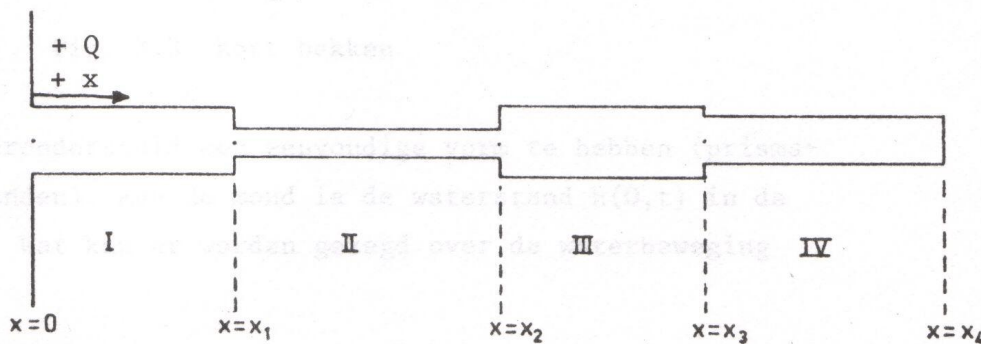
Voor een kort bekken, zoals in de Waddenzee, is het getij bijna een staande golf en de waterstand op elk tijdstip min of meer gelijk in het bekken, zodat voor het debiet (positief in vloedrichting) bij de keel van het zeegat geldt

$$Q(t) = F(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (\text{Bijlage 1.3})$$

Waarbij F de oppervlakte van het bekken is. Het debiet dat het bekken instroomt, is dus gelijk aan de snelheid van de stijging van de waterstand maal de oppervlakte van het wateroppervlak van het bekken horend bij de waterstand. In dit geval geldt dat vloeddominant verticaal getij leidt ook tot vloeddominant horizontaal getij. Kortere stijgend tij dan dalend tij leidt tot kortere vloedperiode dan ebperiode. Omdat de totale hoeveelheid water die tijdens vloed naar binnen stroomt hetzelfde is als die tijdens eb naar buiten stroomt, moet het vloeddebiet groter zijn dan het ebdebiet. Dit leidt tot netto sedimenttransport naar binnen (import) vanwege de niet-lineaire relatie tussen het sedimenttransport en de stroomsnelheid.

Bij een lang bekken zoals de Westerschelde kan de waterstand niet meer als constant worden beschouwd. Hetzelfde principe kan nog steeds worden gebruikt om de relatie tussen het verticale getij en het horizontale getij te geven. Voor de situatie zoals geschetst in Figuur 0.4 geldt:

$$\begin{aligned}
 Q_{x_4} &= 0 \\
 Q_{x_3} &= F_{IV} \frac{\partial \zeta_{IV}}{\partial t} \\
 Q_{x_2} &= F_{III} \frac{\partial \zeta_{III}}{\partial t} + F_{IV} \frac{\partial \zeta_{IV}}{\partial t} \\
 Q_{x_1} &= F_{II} \frac{\partial \zeta_{II}}{\partial t} + F_{III} \frac{\partial \zeta_{III}}{\partial t} + F_{IV} \frac{\partial \zeta_{IV}}{\partial t} \\
 Q_0 &= F_I \frac{\partial \zeta_I}{\partial t} + F_{II} \frac{\partial \zeta_{II}}{\partial t} + F_{III} \frac{\partial \zeta_{III}}{\partial t} + F_{IV} \frac{\partial \zeta_{IV}}{\partial t}
 \end{aligned}
 \tag{Bijlage 1.4}$$



Figuur 0.4 : Schets van een lang bekken met verwaarloosbaar rivierafvoer bovenstrooms

In het algemeen geldt dus: vloeddominant verticaal getij leidt tot vloeddominant horizontaal getij benedenstrooms.

De vergelijkingen (3) en (4) maken ook duidelijk dat de sterkte van asymmetrie van het horizontale getij (ongeveer 2 keer) sterker is dan van het verticale getij. De frequentie van de viermaaldaagse component is 2 keer die van de dubbeldaagse component. Daardoor is de afgeleide (aan de rechter kant van de vergelijkingen) van de viermaaldaagse component 2 keer zo groot als die van de dubbeldaagse component bij eenzelfde amplitude. Voor de zesmaaldaagse getijcomponent is de verhouding zelfs 3, waardoor de zesmaaldaagse component van het horizontale getij relatief belangrijk is.

Netto sedimenttransport

Netto sedimenttransport in een estuarium als dat van de Schelde is het kleine verschil tussen het veel grotere vloed- en ebtransport. Daarom is het zo moeilijk dit nauwkeurig te bepalen vanuit procesbeschouwingen. De verschillende processen en mechanismes die tot netto sedimenttransport leiden zijn allemaal secundaire signalen van de waterbeweging. Hier wordt dit kort uitgelegd.

Eerst wordt de zandfractie van het sediment beschouwd, waarvoor het relaxatie effect van zwevend transport geen grote rol speelt. Hiervoor kan het transport direct worden gerelateerd aan de lokale en instantane stroomsnelheid. In het algemeen is de stroomsnelheid een vector, waarvan de richting in de tijd verandert. Voor het eenvoudige geval van twee -richtingsstroming (alleen heen en weer) en met de veronderstelling dat het sedimenttransport evenredig is met de 3^{de} macht van de stroomsnelheid, geldt (Van de Kreeke en Robaczewska, 1993)

$$\frac{\bar{s}}{f\hat{u}^3} = \frac{3 u_0}{2 \hat{u}} + \frac{3 u_{M4}}{4 \hat{u}} \cos \varphi_{M4} + \frac{3 u_{M4} u_{M6}}{2 \hat{u} \hat{u}} \cos(\varphi_{M4} - \varphi_{M6}) \quad (\text{Bijlage 1.5})$$

Hierin

- \bar{s} = Lange-termijn gemiddeld, of netto sedimenttransport
- f = Evenredigheidsfactor
- \hat{u} = Amplitude M2 component van stroomsnelheid
- u_0 = Reststroomsnelheid
- u_{M4} = Amplitude M4 component van stroomsnelheid
- u_{M6} = Amplitude M6 component van stroomsnelheid
- j_{M4} = Relatief faseverschil tussen M4 en M2 van stroomsnelheid
- j_{M6} = Relatief faseverschil tussen M6 en M2 van stroomsnelheid

Merk op dat deze vergelijking (5) is afgeleid voor het lange-termijn netto transport. Als voor de getijcomponenten in de vergelijking de dubbeldaagse, viermaaldaagse en zesmaaldaagse componenten uit de Fourier series worden ingevuld geldt de vergelijking ook per periode van ongeveer 25 uur.

Het is duidelijk dat het netto transport wordt bepaald door reststroomsnelheid en de hogere harmonische componenten van het getij. Hoe de hogere harmonische componenten van het horizontale getij afhangen van die van het verticale getij is in de vorige paragraaf uitgelegd. De reststroomsnelheid in de Westerschelde is relatief klein. Dit heeft te maken met de kleine rivierafvoer bovenstrooms, maar heeft ook andere oorzaken. De reststroomsnelheid is ook zeker niet overal zeewaarts gericht. Door Stokes drift ontstaat er een reststroomsnelheid in de ebrichting. Dit komt doordat de vloedstroming bij iets hogere waterstand plaatsvindt dan de ebstroming. Dit geeft een landwaarts gerichte netto flux. Dezelfde reden veroorzaakt ook een horizontale circulatie, met landwaarts gerichte stroming in ondiepere delen en zeewaarts gerichte stroming in diepere delen. Verder kunnen de geometrische structuren, van bijvoorbeeld de oevers, ook tot circulaties leiden met reststromingen.

Voor estuaria is ook de dichtheidsstroming belangrijk, veroorzaakt door de gradiënt in zoutgehalte, de estuariene circulatie. Voor sedimenttransport is de stroming dichtbij de bodem het belangrijkste. De estuariene circulatie zorgt aldus voor een landwaarts gericht netto sedimenttransport.

Door het relaxatie effect van zwevend sedimenttransport speelt er nog een ander aspect van de getij-asymmetrie een rol, voor de fijnere fracties van het sediment: het verschil tussen duur van hoogwaterkentering en die van de laagwaterkentering. Als de hoogwaterkentering langer is veroorzaakt het een netto transport in de vloedrichting.

Tot nu toe is alleen het netto transport op een punt beschouwd. Het netto transport zoals bepaald uit de sedimentbalans is echter het totale netto transport door een raai van het estuarium. Dit is de integraal van de normale component van het lokale transport over de raai. Dit betekent dat het netto transport door een raai ook kan worden beïnvloed door lokaal morfologische veranderingen (op mesoschaalniveau) die verandering van de stroming over de raai als gevolg hebben.

Invloed morfologie op getij

De veranderingen van het getij in het estuarium zoals gerapporteerd in rapport G-1, meer bijzonder de veranderingen t.o.v. het station bij de monding, moeten gerelateerd zijn aan de veranderingen van de morfologie in het estuarium. Twee aspecten van het getij zijn geanalyseerd in rapport G-1: (1) de amplificatie en voortplanting van het getij, en (2) de asymmetrie van het getij. Voor beide aspecten zijn andere kenmerken van de morfologie van belang.

De morfologische kenmerken die de amplificatie van getij beïnvloeden kunnen worden beschouwd aan de hand van het 1D analytische model beschreven in LTV V&T-rapport G-5. De invoerparameters in dat model zijn de stroomvoerende breedte B_s , de bergende breedte B (vaste verhouding met de stroomvoerende breedte), de diepte h , en de ruwheidcoëfficiënt (bijvoorbeeld Chezy coëfficiënt C). De breedte van het estuarium varieert langs het estuarium en deze variatie is weergegeven in het model via de lengte waarover de breedte met een factor e afneemt in de landwaarts richting, de convergentielengte L . Toepassing van het model laat zien dat de amplificatie van het getij vooral gevoelig is voor de diepte van het estuarium en dat historische ontwikkelingen van de amplificatie goed kunnen worden verklaard door veranderingen in de diepte. In wezen kunnen de parameters gecombineerd worden en teruggebracht worden tot twee factoren:

- (i) de komberging, uitgedrukt via de bergende breedte B (samen met de convergentielengte),
- (ii) het stroomvoerende vermogen $B_s C h^{3/2}$, dat de afvoer bepaalt voor gegeven verhang van energiehoogte.

Opmerking: Omdat het stroomvoerende vermogen niet-lineair afhankelijk is van de diepte, is behalve de gemiddelde diepte ook de vorm van het dwarsprofiel van belang. Zo is het stroomvoerende vermogen van de hele raai bestaande uit twee geulen groter als een van de geulen veel dieper is dan de ander dan het geval als beide geulen even diep zijn, zelfs als in beide gevallen de totale oppervlakte van het dwarsprofiel dezelfde is.

In werkelijkheid zijn beide factoren afhankelijk van de waterstand. In het analytische 1D model zijn de parameters vereenvoudigd tot een constante. Vergroting van komberging leidt tot zwakkere amplificatie van het getij en omgekeerd. Vergroting van het stroomvoerende vermogen leidt tot sterkere amplificatie van het getij en omgekeerd. Opgemerkt wordt dat de amplificatie van het getij in een bepaalde deel van het estuarium niet alleen bepaald wordt door de twee factoren in het deel zelf, maar ook door (i) de komberging in het landwaartse deel en (ii) het stroomvoerende vermogen in het zeewaartse deel. Fysisch bepaalt de komberging de hoeveelheid water die nodig is om tot waterstandverandering te leiden. Het stroomvoerende vermogen bepaalt hoe makkelijk of moeilijk het water aan- en afgevoerd kan worden.

Vertalen wij dit naar het Schelde-estuarium, dan betekent dit dat veranderingen in zowel de intergetijdegebieden als de geulen van belang zijn voor de ontwikkeling van de amplificatie van het getij. De verhoging van de platen heeft geleid tot afname van de komberging en de verruiming van de geulen heeft geleid tot vergroting van het stroomvoerende vermogen. Beide hebben een versterkend effect op de amplificatie van het getij, conform de waarnemingen.

Terwijl de amplificatie van het getij met een lineair model kan worden beschouwd, kan de asymmetrie van het getij alleen met een niet-lineaire beschouwing worden geanalyseerd. Asymmetrie van het getij is een gevolg van de vervorming van de getijgolf tijdens de voortplanting in ondiep water. De viermaaldaagse getijcomponent die de getij-asymmetrie

karacteriseert is niet astronomisch van oorsprong, in tegenstelling tot de enkeldaagse en dubbeldaagse componenten. Het wordt daarom ook ondiep water getijcomponent genoemd. Op procesniveau wordt de oorsprong gevonden in de niet-lineaire termen van ondiep water vergelijkingen voor de waterbeweging, zoals de advectieterm, de ruwheidsterm en de kombergingsterm in de massabalansvergelijking (doordat de bergende breedte afhankelijk is van de waterstand). Men kan dit begrijpen door een sinus of cosinus functie voor de waterstand en stroomsnelheid in de vergelijkingen in te vullen. Er ontstaan dan termen van sinus of cosinus met hogere (bijv. 2 keer zo hoge) frequenties, die de generatie van viermaal- en zesmaaldaagse componenten van het getij verklaren (zie bijv. Wang e.a., 1999). Fysisch kan men het ook begrijpen door de voortplanting van de getijgolf te beschouwen. De snelheid van de voortplanting is afhankelijk van de waterdiepte (\sqrt{gh}).

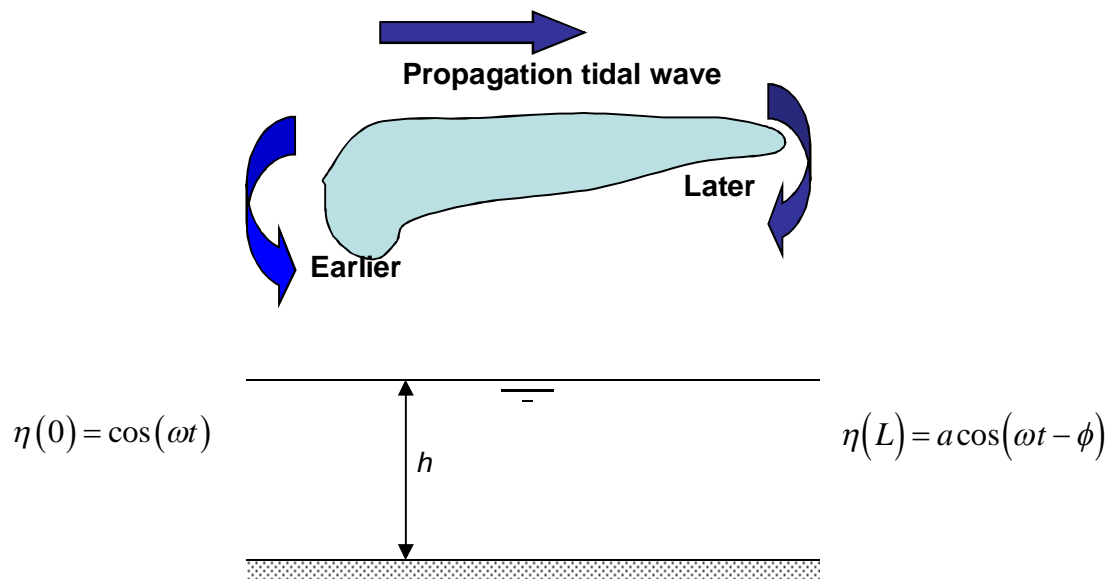
In open en ondiep water betekent het dan dat de voortplanting van de top van de golf (HW) sneller is dan die van het dal (LW), met als gevolg dat de top het dal langzaam inhaalt en dat de golf asymmetrisch wordt. In open en ondiep water is de vervorming zodanig dat het getij vloeddominant wordt: op een vaste locatie duurt het stijgende tij korter dan het dalende tij.

De situatie in een estuarium is ingewikkelder dan in open water. Ten eerste: het getij is niet meer simpelweg een lopende golf, waardoor de voortplanting van de golf niet alleen van de lokale morfologie afhankelijk is, maar ook de convergentielengte invloed heeft. Ten tweede: de diepte voor de berekening van de snelheid van voortplanting moet vervangen worden door A_s/B , waarbij A_s is de stroomvoerende oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het estuarium is en B de bergende breedte. Net zoals bij het open water, kijken we voor het estuarium naar het verschil in gedrag tijdens HW en LW, maar nu door gebruik te maken van, bijvoorbeeld, het lineaire 1D model (Kuijper, 2012). Het model wordt dan voor zowel de HW situatie als voor de LW situatie toegepast, i.p.v. alleen voor de MW situatie. Wij kijken dan vooral naar de voortplanting van de getijgolf. Het verschil in de snelheid van voortplanting bij HW en LW leidt tot verandering van asymmetrie van het getij. Dit is de zogenaamde zwak niet-lineaire aanpak. De uitwerking van deze aanpak voor het Schelde-estuarium is gegeven door Kuijper (2012), zie bijlage 3.

In tegenstelling tot de amplificatie van het getij kan de verandering in de tijd van de asymmetrie van het getij in het estuarium niet alleen door de verandering van de diepte worden verklaard. Het blijkt essentieel te zijn dat verschillende convergentielengtes bij HW en LW worden toegepast en de verandering van de convergentielengtes mee te nemen. Fysisch betekent het dat vooral de veranderingen in de intergetijdezone erg belangrijk zijn voor de ontwikkeling van de asymmetrie van het getij. Dit is conform de theorieën over de invloed van morfologie op asymmetrie van getij in de literatuur (Dronkers, 1986, Friedrichs en Aubrey, 1988, zie ook Wang e.a., 2002).

Circulatie in en stabiliteit van een meergeulensysteem

Een schaalniveau lager beschouwen wij de ontwikkelingen binnen een macrocel, bestaande uit een eb- en een vloedgeul met een plaat ertussen. Het gaat vooral om de invloeden van de ontwikkelingen van het getij (rapport G-1) en de morfologische veranderingen op megaschaal niveau (rapport G-2) op de stabiliteit van het meer (hier twee)geulen systeem. Hieraan gerelateerd worden ook de verbanden tussen de veranderingen van de verschillende elementen beschouwd.



Figuur 0.5 : Schets van het vereenvoudigde probleem voor het wantij

De beschouwing hier is geïnspireerd door de resultaten van een studie naar het wantij achter een Waddeneiland. Daarbij wordt de getijbeweging achter een Waddeneiland vereenvoudigd (Figuur 0.5) en analytisch bekeken of er een hydraulisch wantij bestaat en zo ja waar het zich bevindt. Het hydraulische wantij is gedefinieerd als de locatie waar de amplitude van de stroomsnelheid minimaal is. Uit de analytische beschouwing worden de volgende conclusies getrokken:

- Als de getijamplitudes op beide zijden dezelfde zijn bestaat er een wantij en is het in het midden, voor het geval dat er geen faseverschil tussen de beide zijden is. Dit is het triviale geval dat het getij aan beide zijden exact hetzelfde is.
- Het is opmerkelijk dat het faseverschil geen invloed heeft op de positie van het wantij wanneer de getijamplitude aan beide zijden dezelfde is. Het faseverschil heeft wel invloed op de absolute waarde van het minimum van de stroomsnelheidsamplitude in dit geval. Het faseverschil moet kleiner zijn dan kL (golfgetal maal lengte eiland). Als het gelijk aan kL is het getij een zuiver lopende golf.
- Nog opvallender is de invloed van het amplitudeverschil tussen de twee zijden. Het wantij is dicht bij de zijde met grotere getijamplitude. Volgens de lineaire oplossing heeft de amplitudeverhouding nog meer invloed op de aanwezigheid en positie van een wantij dan het relatieve faseverschil. Dit betekent dat het niet de voortplanting van de getijgolf, maar de ruimtelijke variatie van het getijverschil dat de meeste invloed heeft op de locatie van het wantij achter een Waddeneiland.
- Er is niet altijd een wantij. Als de getijamplitudes aan beide zijden niet gelijk zijn, is er een grens aan het faseverschil tussen de twee uiteinden van het bestaan van een wantij. Wanneer het relatieve faseverschil tussen de twee zijden groter is dan de grenswaarde wordt geen wantij gevonden. De grenswaarde voor het faseverschil is kleiner indien het verschil tussen de amplitudes aan de twee uiteinden groter wordt. Geïnterpreteerd voor de Waddenzee geval betekent dit dat een wantij alleen kan bestaan als de voortplanting van de getijgolf aan de zeezijde van een eiland veel sneller is dan de voortplanting in het bekken achter het eiland. Met andere woorden: het wantij kan alleen bestaan als de Waddenzee relatief ondiep is.
- De limiet van het faseverschil voor het bestaan van een wantij wordt groter als het eiland langer is en/of het bekken achter het eiland minder diep is. Het lijkt dus dat de

Waddeneilanden een lengte boven een bepaalde grens moeten hebben, afhankelijk van de kenmerken van het getij in de Noordzee.

Met een Delft3D model zijn simulaties uitgevoerd om deze conclusies te toetsen, met als conclusies:

- Alle conclusies van de analytische beschouwing worden bevestigd door de numerieke simulaties met relatief kleine amplitude - waterdiepte verhouding, dus voor omstandigheden waarvoor de lineaire oplossing van toepassing is.
- Wanneer de niet-lineaire effecten belangrijker geworden, omdat de amplitude van het getij niet veel kleiner dan de waterdiepte is, wordt het faseverschil tussen de twee uiteinden belangrijker voor het bestaan en de positie van het wantij. Het wantij gaat naar de kant met de grootste fase, dat wil zeggen het einde waar de getijgolf later komt.



Figuur 0.6 Een macrocel bestaande uit een eb- en een vloedgeul met een plaat ertussen

Wij trekken nu een parallel tussen de ontwikkeling van een wantij in de Waddenzee met de ontwikkeling van een drempel in de nevengeul (vaak de vloedgeul) van een macrocel in het estuarium zoals geschetst in Figuur 0.6. Voortplanting van het getij door de nevengeul is goed te vergelijken met die achter een Waddeneiland. Het geschematiseerde probleem (Figuur 0.5) is misschien zelfs meer van toepassing voor de nevengeul in de macrocel (Figuur 0.6) dan voor de situatie achter een Waddeneiland. Er zijn echter ook twee verschillen tussen beide gevallen. Ten eerste, voor de Waddenzee kan de getijvoortplanting in de Noordzee als gegeven beschouwd worden. Ze wordt niet door de getijbeweging achter het Waddeneiland beïnvloed. Ten tweede, een Waddeneiland wordt niet overstromd, maar de plaat tussen de twee geulen wel.

Normaal is de drempel in de vloedgeul aan het landwaartse eind van de vloedgeul. Dit kan worden vergeleken met de situatie dat er geen wantij is. Als de getijbeweging in de nevengeul zodanig wordt dat er een hydraulisch wantij kan ontstaan, dan zou op de locatie daarvan een drempel ontwikkelen. Hypothese is dat dit tot degenereren van de geul, dus instabiliteit van het tweegeulen systeem kan leiden. Met dit als uitgangspunt kunnen wij bekijken hoe de ontwikkelingen van het getij (rapport G-1) en morfologie (rapport G-2) van invloed zijn op de stabiliteit van het tweegeulen systeem. De versterking van de amplificatie van het getij, zoals geconstateerd in rapport G-1, is gunstig voor de stabiliteit van een 2-geulen systeem. Sterkere amplificatie betekent een groter verschil tussen de getijamplitudes op de twee einden van een macrocel, wat ongunstig is voor de vorming van een hydraulisch wantij / drempel in de nevengeul. Daar staat tegenover dat de versnelling van de voortplanting van het getij in het estuarium ongunstig is, omdat dit leidt tot verkleining van het faseverschil tussen de twee einden van een macrocel.

Opmerkingen:

- In de Waddenzee bekkens zien we geen parallelle meergeulensystemen en alleen boomstructuren van geulen. Dit kan misschien worden verklaard door het feit dat het getij in de Waddenzee meestal als een staande golf verschijnt. Dit is de ideale situatie

voor een Wantij / drempel in het midden van één van de geulen, of volledig instabiel geval voor een 2-(parallele)geulen systeem.

- De beschouwing geeft ook een onderbouwing van de hypothese dat de lengte van de plaat een belangrijke parameter is voor de stabiliteit van het systeem.

Kijken wij naar de morfologische ontwikkelingen zoals gerapporteerd in LTV V&T-rapport G-2 dan hebben vooral de ontwikkelingen van de platen invloed, meer bepaald het feit dat ze hoger zijn geworden en meer aan elkaar zijn gegroeid (verdwijnen van kortsluitgeulen). Deze ontwikkelingen maken een cel effectief langer, wat ongunstig kan zijn voor de stabiliteit van het systeem. De ontwikkelingen van de platen hebben ook invloed op de circulatie binnen een macrocel. Er is geconstateerd dat de circulatie door de vloed- en ebgeulen van de reststroming in de tijd is afgenomen. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de genoemde ontwikkelingen van de platen. Hoe het precies werkt is niet voldoende bekend. Een mogelijke verklaring kan zijn dat de circulatie ontstaat door het feit dat de plaat tijdens vloed overstroomd wordt vanaf vooral de zijde van de vloedgeul en dat het water boven de plaat tijdens eb vooral afgevoerd wordt naar de ebgeul. Door de verhoging van de platen en de verdwijning van de kortsluitgeulen wordt de werking van dit mechanisme minder.

Beschouwing vanuit empirische relaties

Naast de procesbeschouwingen zoals beschreven in de voorgaande paragrafen kunnen ook de empirische relaties voor morfologisch evenwicht worden gebruikt om de interactie tussen de morfologie en het getij te beschouwen. Deze empirische relaties vormen ook de basis voor de lange-termijn morfologische modellen zoals ASMITA en ESTMORF. Twee empirische relaties zijn hierbij het meest relevant, één voor het evenwichtsoppervlak van het dwarsprofiel van een geul, en één voor de evenwichtshoogte van het intergetijdegebied.

Het evenwichtsoppervlak A_e van het dwarsprofiel van een geul is gerelateerd aan het getijvolume V . In het algemeen ziet de empirische relatie als volgt uit.

$$A_e = \alpha V^\beta \quad (\text{Bijlage 1.6})$$

Hierin zijn α en β coëfficiënten, waarbij de waarde van β is dichtbij 1. Het evenwichtsoppervlak van het dwarsprofiel een geul is dus (bijna) evenredig met het getijvolume door de geul. Deze relatie geldt voor zowel individuele geulen als het estuarium als geheel. Zoals in de paragraaf 'invloed morfologie op getij' is uitgelegd wordt het getijdebiet bepaald door de waterstandvariatie en de komberging bovenstrooms het betreffende dwarsprofiel. Hieruit volgt dat het getijvolume door de getijslag en de komberging bovenstrooms het betreffende dwarsprofiel wordt bepaald. Voor een relatief kort bekken geldt

$$V = F_{HW}H - V_p \quad (\text{Bijlage 1.7})$$

Hierin:

- F_{HW} = Horizontaal oppervlak van het gebied bij hoogwater
- H = Getijslag
- V_p = Volume van intergetijdegebied (sedimentvolume tussen LW en HW)

Deze relatie geeft duidelijk aan dat hoe veranderingen van getijslag en van intergetijdegebied het getijvolume beïnvloeden.

De evenwichtshoogte van het intergetijdegebied H_{pe} , gemeten vanaf het laagwater, is gerelateerd aan de getijslag met een lineaire relatie:

$$H_{pe} = \eta H \quad (\text{Bijlage 1.8})$$

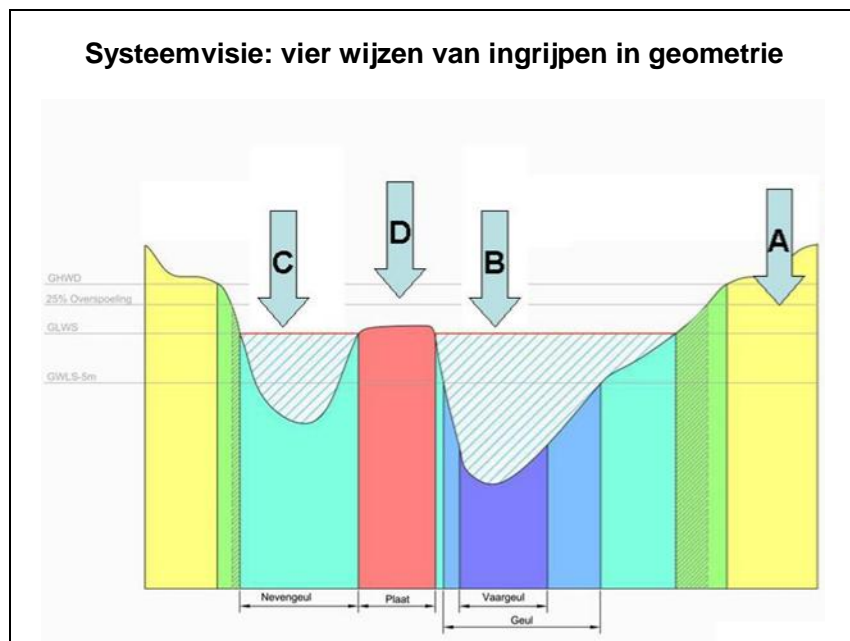
Dit betekent in wezen dat het intergetijdegebied de neiging heeft om het HW, dat kan veranderen door zeespiegelstijging en door verandering van getijslag, te volgen.

Bijlage 2: Conceptueel model reactie ingrepen in de morfologie

Algemeen

Deze bijlage breidt het conceptuele model (zie Hoofdstuk 3 en LTV V&T-rapport K-17) uit met een kwalitatieve beschrijving van de effecten van verschillende soorten morfologisch beheer. Ze beperkt zich tot het morfologische beheer door 'werken met sediment' (de 'zachte' maatregelen). Bestorpingen, leidammen etc. worden niet behandeld.

De informatie is voornamelijk ontleend aan de bijlage van het rapport 'alternatieven natuurherstel' (Deltares, 2011). Hierin wordt het morfologisch beheer besproken als (een combinatie van) vier typen ingrepen (zie Figuur 0.1), met hun invloed op de grootschalige waterbeweging (getij). De typering is tegelijkertijd gebaseerd op de locatie van de ingreep en op de schaal (mega-, macro of mesoschaal) waarop de beïnvloeding primair gericht is. Het onderstaande is een samenvatting, waarbij wordt ingegaan op de fysische achtergrond en de perspectieven.



Figuur 0.1 Vier typen ingrepen, gericht op aanpassing geometrie, in dwarsdoorsnede

- A. Ingrijpen in en langs de oevers, zodat de komberging vergroot of verkleind wordt. Hieronder valt verleggen van dijken en verlagen of verhogen van intergetijdegebieden (meer of minder ruimte voor het estuarium), zie tweede paragraaf van deze bijlage.
- B. Verandering van de doorstroomoppervlakte (van hoofd- en nevengeul gezamenlijk) en langs die weg de voortplanting van het getij en de sedimenttransporten op de grote schaal, zie derde paragraaf van deze bijlage.
- C. Beïnvloeden wisselwerking binnen macrocel: tussen hoofd- en nevengeul en intergetijdegebieden, zie vierde paragraaf van deze bijlage.
- D. Beïnvloeden processen op mesoschaal, zoals aanwezigheid kortsluitgeulen, laagdynamische gebieden, zie vijfde paragraaf van deze bijlage.

Ingrepen hebben, behalve in het profiel (Figuur 0.1), ook steeds een locatie langs de lengteas van het estuarium: in de monding, in het westelijk, midden- of oostelijk deel van de

Westerschelde of in de Boven- of Beneden-Zeeschelde. Hiermee worden onder meer de zandvoorraden (her)verdeeld.

Ingrijpen in de komberging

Door verandering van de komberging zal het getijvolume (de hoeveelheid water die per getij het estuarium in- en uitstroomt) veranderen. Een direct effect van toename van de komberging is dat de getijslag in het deel dat stroomopwaarts (landwaarts) ligt direct kan afnemen. Dit effect zal ook zeewaarts te bemerken zijn, maar dit zal een kleinere omvang hebben en afnemen tot nul bij monding. De omvang van het effect hangt af van de omvang van de vergrote komberging in vergelijking met de doorsnede van het estuarium ter plaatse.

Het effect op langere termijn is complexer. Door het toegenomen getijvolume zullen in de dwarsdoorsneden zeewaarts van de vergrote komberging de stroomsnelheden toenemen. Dat leidt enerzijds tot een toename van bodemwrijving en energiedissipatie (met als effect een verdere afname getijslag), maar anderzijds tot erosie en het vergroten van vooral de meest stroomvoerende delen (zie voor de theorie ook LTV V&T-rapport K-17). Dit laatste kan de getijslag weer doen toenemen.

Voor het uiteindelijke effect op lange termijn is de positie van de ingreep langs het estuarium van belang. Als het relatief landwaarts ligt is er meer kans dat de erosie van het zeewaartse deel het grootste effect heeft en er uiteindelijk verhoging van de getijslag optreedt, die ook in het landwaartse deel weer tot erosie of minder sedimentatie leidt (zie Jeuken e.a., 2008). Voor het stroomopwaarts gelegen deel van het estuarium overheerst het effect van de afgenomen getijslag ook op lange termijn, leidend tot netto sedimentatie.

De beschreven fenomenen spelen alleen een rol als de vergrote komberging voldoende groot is en wanneer de vergroting ook in stand blijft. Een te verwachten respons is namelijk dat ter plaatse van een verlegde dijk het gebied (weer) opslibt door de lagere stroomsnelheden in vergelijking met de aangrenzende delen. Hierdoor neemt het getijvolume weer af en zullen de beschreven lange termijn effecten minder zijn.

Een verandering van komberging heeft effect op zowel mega-, macro- als mesoschaal. Het effect op de megaschaal is, zoals hier boven gedaan, is redelijk robuust te beredeneren en te berekenen. De effecten binnen een macrocel (mesoschaal) zijn veel lastiger te voorspellen. Er is ook nog geen recente ervaring met een dergelijke ingreep en de snelheid waarmee sedimentatie plaatsvindt en ecologische respons volgt. Conceptuele en numerieke modellen zijn ook nog niet echt geconfronteerd met praktijkervaring.

Het is ook niet op deze wijze te beredeneren wat de effecten zijn van vergrotingen van de komberging tijdens stormvloed, zoals ze in de Zeeschelde zijn gerealiseerd. Een morfologische reactie van uitruimende geulen op incidenteel voorkomende extreme waterstanden en tijdelijke kombergingsveranderingen is nog niet beschreven.

Ingrijpen in stroomvoerende oppervlak van de hoofdgeul

Door in te grijpen in de geulgeometrie (verandering van het stroomvoerende oppervlak) wordt meer of minder 'weerstand' voor de getijgolf gecreëerd, met effect op de getijslag. De ingreep kan een ver(on)dieping of versmalling/verbreding van de geul zijn. Het effect op de getijslag treedt vooral op in het estuarium stroomopwaarts van de ingreep. Welke effecten met de huidige geometrie van het estuarium nog mogelijk zijn kan bepaald worden met

hydrodynamische modelstudies (zie o.m. LTV V&T-rapport K-20). Dit soort ingrepen veranderen de komberging niet, bij aannahme dat de geulen bij laag water niet droogvallen.²³

Lokaal is de reactie op dit type ingrijpen als volgt: Door verandering in snelheden veranderen transportcapaciteiten ten opzichte van de oude situatie en de nabije omgeving. Dit betekent dat er erosie volgt na een storting en sedimentatie na baggerwerk. Dit sediment komt van (of gaat naar) de nabije omgeving in de geul. Dit laatste is bijvoorbeeld te zien aan de langzame verruiming van het Zuidergat als gevolg van het onderhoud aan de drempel van Hansweert (LTV V&T-rapport K-20, Jeuken et al, 2003).

Storten in diepe delen van de vaargeul

Bij een storting in een diep deel van het estuarium zal het effect afhankelijk zijn van de hydrodynamica ter plaatse. Er zijn putten met grote stroomsnelheden, vanwaar het sediment snel verspreid wordt (zoals Put van Terneuzen, Gat van Ossensisse²⁴, Put van Hansweert). Meestal hangt die plaats samen met de onmogelijkheid voor het estuarium ter plekke 'uit te bochten', door harde werken aan de oever of strekdammen (zoals de Nol van Ossensisse). Daarnaast zijn er plaatsen zoals de stortplaats W13 (uitgebreid onderzocht in LTV V&T-rapport B-21) waar na verloop van jaren een structurele verondieping bereikt kon worden.

Voor de putten met grote stroomsnelheden is er nog geen toepasbare theorie gevormd zoals voor het andere sedimentbeheer. In 2011 zijn stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd die het inzicht bevorderden (Schrijver, 2011). Simulaties zijn uitgevoerd in LTV V&T-rapport K-20.

Recente metingen aan stortingen in diepe delen van de vaargeul leverden de volgende waarnemingen op (zie IMDC, 2012):

(i) Van een storting ter hoogte van de Nol van Ossensisse bleef in het diepste deel van de put maar een kwart liggen in een periode van ca een half jaar. Voor de minder diepe delen van de put loopt dit op tot ongeveer de helft. Volumetoename rond de put wijst erop dat een deel van het gestorte materiaal daar terecht is gekomen. Deze stortactiviteiten lijken voorlopig niet te leiden tot meer aanzanding van de nabijgelegen drempels.

(ii) In een zone in de vaargeul ten zuidoosten van Walsoorden bleef uiteindelijk slechts 15% van het gestorte materiaal liggen. Van een latere storting was na ruim een maand al zo'n 50% van het materiaal verdwenen. Voor een andere zone, in het diepste deel van de vaargeul, blijkt (initieel althans) het geklepte materiaal juist op de bodem van de put te blijven liggen. Dit kan te wijten zijn aan specifieke hydrodynamische effecten door de nabijheid van de strekdam bij Walsoorden.

(iii) Het lijkt het best de stortingen in de diepe delen enerzijds continu in de tijd, maar vooral ruimtelijk geconcentreerd uit te voeren. Dit heeft tot gevolg dat het beschikbaar, erodeerbaar oppervlak minimaal gehouden wordt, wat beschermt tegen snelle erosie."

In LTV V&T-rapport K-20 zijn de mogelijkheden van stortingen in diepe delen van de vaargeul nader verkend, ondersteund door modelsimulaties. De resultaten hiervan tonen dat verondiepen van de diepe putten qua hoeveelheden sediment een realistische mogelijkheid is, maar dat er een oplossing gevonden dient te worden voor het snelle herverdelen van het aangebracht sediment (het eroderende karakter van de stroming in deze gebieden).

Ingrijpen in de wisselwerking tussen hoofd- en nevengeul

Door (een combinatie van) ingrijpen in hoofd- en nevengeul kan de verhouding tussen de geulen beïnvloed worden. Belangrijke grootheden zijn de asymmetrie tussen de geulen,

23. Voor geulwandstortingen, die zowel intergetijdegebied creëren (zie optie D) als de stroomvoerende geul versmallen, geldt die aannahme niet. Dergelijke ingrepen zijn tot nu toe niet uitgevoerd.

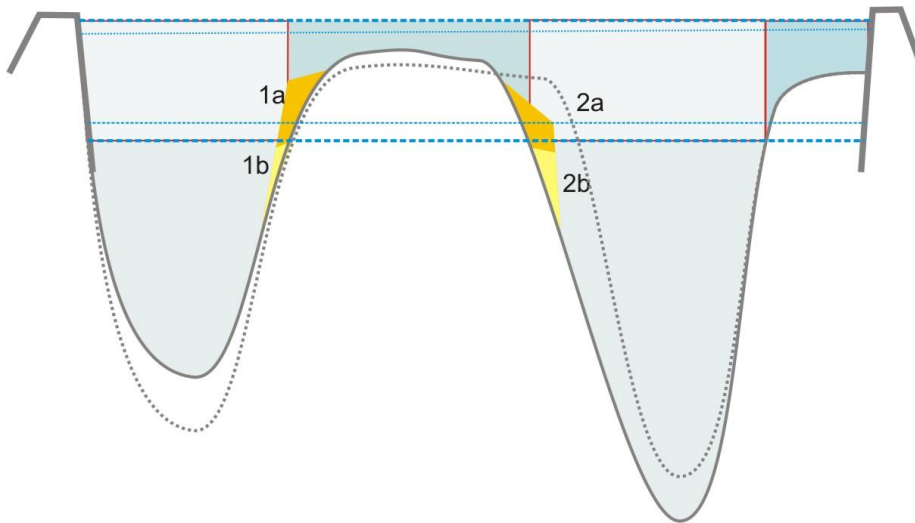
24. Deze locatie is al in gebruik als stortplaats

verval over de tussenliggende platen en de verdeling van het debiet. Het zogeheten stortcriterium hangt hiermee samen (Winterwerp e.a., 2001, Wang en Winterwerp, 2001, Jeuken en Wang, 2010). In theorie is het mogelijk lokaal negatieve trends als 'minder kortsluitgeulen' en 'gladdere plaatcomplexen' (minder grillige vorm) tot stilstand te brengen door de lokale hydrodynamica te veranderen. In LTV V&T-rapport K-17 is nagedacht over de mogelijkheid een kortsluitgeul te doen ontstaan door zodanig te storten dat er een nieuw plaatdeel ontstaat. Praktijkervaring met het creëren van kortsluitgeulen ontbreekt nog.

Ingrijpen op schaal van platen en kortsluitgeulen

Hieronder valt onder meer het vergroten van intergetijdegebieden door plaatrandstortingen. Het verwijderen van sediment uit intergetijdegebieden (om b.v. ontstaan kortsluitgeulen een zetje te geven) past hier ook onder, maar is nu geen onderdeel van het beheer. Dit ingrijpen richt zich op de processen op en rond de platen en de kortsluitgeulen en moet passen bij de lokale waterbeweging. In LTV V&T-rapport K-20 worden numerieke simulaties beschreven waarbij kortsluitgeulen worden verwijderd of toegevoegd.

Het ingrijpen op schaal van platen en kortsluitgeulen heeft ook effect op de grootschalige hydrodynamica, onder meer door de veranderingen in komberging. Uit het conceptueel model van hoofdstuk 3 volgde al dat, in een situatie met toenemende amplificatie van de getijslag, met plaatrandstortingen effectief gewerkt wordt aan het verminderen van baggerinspanning, maar wel met instandhouding van versterkte toename van de getijslag.



Figuur 0.2 Verschillende locaties plaatrandstorting: hoofd- en nevengeul, sub- of supratidaal. In de praktijk komen situaties 1a, 2a als stortingen nu niet voor. Verspreiding vanaf 1,2b naar 1,2a na aantal jaren mogelijk wel.

Het effect van een plaatrandstorting hangt af van de locatie in de neven- dan wel hoofdgeul (Figuur 0.2) en uiteraard ook of dit in oosten of westen van de Westerschelde gebeurt. Ook maakt het uit of de storting subtidaal (effect doorstroomoppervlakte) of intertidaal (ook effect op komberging) wordt uitgevoerd.

Door het inbrengen/storten van sediment kan omzetting plaatsvinden van ondiep water in intergetijdegebied en kunnen lokaal lagere stroomsnelheden worden bereikt. Op deze tijd- en ruimteschaal zijn de reacties van het estuarium nog altijd lastig te voorspellen. Mogelijke neveneffecten zijn (i) het verlies van ondiep water, (ii) ophoging van de nabijgelegen platen en (iii) toename van stroomsnelheden in nabijgelegen geulen. De huidige plaatrandstortingen leveren ervaring op over de morfologische reactie.

Ingrijpen in de morfologie monding

Het doel van ingrijpen in de geometrie van de monding zou een zodanige vermindering van het stroomvoerende oppervlak zijn dat er substantieel effect op de getij-indringing wordt bereikt. Hoewel zulke getij-energiereemers in de monding niet in het streefbeeld van de LTV2030 (open mondingsgebied) passen zijn ze toch verkend met een hydrodynamisch model. Hierover is gerapporteerd in LTV V&T-rapport G-12. De daarin beschreven simulaties zijn een aanvulling op wat al is gerapporteerd in Deltares (2011) en berichten die verspreid zijn dat eilanden in de Westerscheldemonding effect kunnen hebben op de waterveiligheid (voorstel landschapsarchitect West 8). Dit laatste was echter niet het gevolg van de aanleg van een eiland, maar het resultaat van een gekoppelde ingreep in een getijgeul, om het sediment van het eiland te verkrijgen. Tegelijkertijd werd het Oostgat zeer ingrijpend verdiept (ca. 40 meter, mondelinge mededeling Svasek).

In LTV V&T-rapport G-12 wordt verslag gedaan van hypothetische ingrepen in zowel de geulen als de ondiepere delen (Vlakte van de Raan) van de monding. Hierdoor kan de grootschalige werking van het getij in de monding beter worden gekarakteriseerd. De zuidelijke geul (de Wielingen, nu de belangrijkste vaargeul) is vooral belangrijk voor de instroming. Een verdieping van deze geul geeft een hogere getijslag in de Westerschelde en omgekeerd (een verondieping geeft een verlaging van de getijslag). De noordelijke geul (het Oostgat) werkt andersom. Deze geul is voornamelijk belangrijk bij de uitstroming van het getij. Een verdieping van deze geul resulteert in een verlaging van het getij. De Vlakte van de Raan werkt hetzelfde als het Oostgat. Een verlaging van de Vlakte van de Raan zorgt voor een verlaging van het getij.

Uit de berekeningen van de scenario's is gebleken dat de ingrepen in de monding van de Westerschelde aanzienlijk moeten zijn om een effect op de getijslag te hebben. Er moeten zeer grote hoeveelheden sediment verplaatst worden om de invloed van het getij in het estuarium terug te dringen.

Uitgevoerde ingrepen

De historie van menselijke ingrepen in het Schelde-estuarium is al op meerdere plaatsen te vinden (Van Braeckel, 2007, Haecon, 2006, Jeuken et al, 2007) en ook in de LTV V&T-rapporten K-16, K-17 en K-18 wordt hierover gerapporteerd, in relatie met waargenomen ontwikkelingen op de mesoschaal.

Om informatie te verstrekken over het daadwerkelijk uitgevoerde beheer ten aanzien van de vaarweg en zandwinning zijn de belangrijkste feiten van het uitgevoerde sedimentbeheer, per macrocel van de Westerschelde, opgenomen in bijlage 3.

Bijlage 3: Uitgevoerd beleid t.a.v. storten en zand winnen

Belangrijke ontwikkelingen in ingrepen per macrocel

Deze bijlage is gebaseerd op de data zoals ze bekend zijn bij Rijkswaterstaat, dienst Zeeland en worden opgenomen in de zandbalansen die jaarlijks worden opgesteld voor de Westerschelde (zie ook Haecon, 2006). De gebruikte cijfers lopen tot en met 2010.

Macrocel 7

- De afgelopen decennia is er eigenlijk alleen sediment onttrokken. Er is weinig gestort en vrijwel niets meer na 1970.
- Vrijwel geen zandwinning.
- Baggervolumes nemen gestaag af:


74-87	1.7	Volumes in 'miljoen m3/jaar'
88-99	1.3	
00-09	0.5	In 2010 vond de derde verdieping plaats

Macrocel 6 (voor verdieping drempel Bath zie Figuur 0.1)

- De afgelopen decennia is er eigenlijk alleen sediment onttrokken. Er is weinig gestort en vrijwel niets meer na 1988.
- Weinig tot geen zandwinning. Alleen in 1986 eenmalig relatief veel (1 miljoen m3)
- Afname baggervolumes vanaf 1990, (nog maar 43% van wat het was):

73-90	3.1	Volumes in 'miljoen m3/jaar'
91-09	1.3	In 2010 vond de derde verdieping plaats

	Borssele	Hansweert	Valkenisse	Bath
1900-1950	126	92	93	87
1951-1960	119	99	97	92
1961-1970	116	95	94	93
1971	108	84	91	102
1972	108	86	88	102
1973	102	87	92	104
1974	106	100	102	101
1975	111	106	102	101
1976	119	110	117	117
1977	124	108	114	115
1978	127	111	117	112
1979	125	111	118	118
1980	125	117	116	118
1981	127	122	122	121
1982	132	119	122	122
1983	120	117	118	122
1984	120	115	117	118
1985	119	116	118	120
1986	121	117	119	118
1987	122	116	118	119

 = periode van uitvoering van de eerste verdieping.

Figuur 0.1 De gemiddelde gemeten minimumdiepten op de drempels t.o.v. GLLWS (uit Kornman et al, 2002, gebaseerd op Belmans, 1988)

Macrocel 5 (voor verdieping drempels Hansweert en Valkenisse zie Figuur 0.1)

- In deze macrocel wordt veel gebaggerd, vooral na 1970. Het is niet zelden 50% van al het baggerwerk in de Westerschelde.
- De baggerinspanning was 4,6 miljoen m³/jaar (1973-2001), maar neemt af vanaf 2002 met ruim 30% tot 3,1 miljoen m³/jaar
- In tegenstelling tot de cellen 6 en 7 is hier ook veel gestort. Belangrijkste plekken: Drempel van Hansweert en zuidelijke bocht van 'Bocht van Walsoorden'.
- Storten is verminderd, van 5 miljoen m³/jaar gemiddeld in periode '73-'96 naar 0,9 miljoen m³/jaar gemiddeld vanaf 1998.
- Veel van wat gestort is, gebeurde in hoofdgeul. Waarschijnlijk heeft dat destijds bijgedragen aan de sedimentatie van het land Van Saefthinghe. Tot 1970 werd ca. 0,9 miljoen m³/jaar in de nevengeul gestort (plm. gelijk met berekende stortcapaciteit). In de jaren '70 is een flinke stijging in het storten in de nevengeul te zien tot boven 2 miljoen m³/jaar, wat mee lijkt geholpen in verandering verhoudingen eb- en vloedgeul. (b.v. Jeuken 2003)
- Er is zandwinning met enige omvang vanaf 1978. Deze neemt rond 1993 toe met 50% (van gemiddeld 0,8 naar gemiddeld 1,2 miljoen m³/jaar). Na 2008 neemt het gemiddelde weer af.
- Na 1990 wordt de balans van de ingrepen negatief (dus meer eruit dan erin gebracht)
- In de periode 87-90 is er relatief veel (4 miljoen m³/jaar) gestort in Zimmermangeul, afkomstig van Kanaal door Zuid-Beveland.

Macrocel 4

- Vanaf 1975 zijn de netto ingrepen positief (er wordt meer gestort dan er via baggeren en zandwinning wordt uitgehaald)
- In periode '69-'75 is er redelijk veel baggerwerk (1,6 miljoen m³/jaar), daarna minder (0,4 miljoen m³/jaar) tot een toename vanaf 1994-2001 (weer 1,4 miljoen m³/jaar). Daarna is er opnieuw een daling tot 0,6 miljoen m³/jaar
- Er is voortdurend veel gestort (> 3 miljoen m³/jaar), in ieder geval t/m 2003. In de periode 2004-2007 is het iets minder (1,2 miljoen m³/jaar) en in 2008 en 2009 gaat het opnieuw om veel sediment (ca. 4 miljoen m³/jaar)
- Er wordt zand gewonnen in dezelfde orde grootte als de baggervolumes., vanaf begin jaren '60. Het langjarig gemiddelde is 0,35 miljoen m³/jaar. Het gaat in totaal om 18 miljoen m³ sinds 1956.

Macrocel 3

- De netto ingrepen zijn beperkt, maar baggeren en storten op zich zijn wel substantieel. Vanaf 1997 zijn de netto ingrepen positief tot en met 2007.
- Vanaf 1997-2009 baggervolumes zijn de baggervolumes verdubbeld (tot 1,7 miljoen m³/jaar) ten opzichte van de tien jaar ervoor (ca. 0,8 miljoen m³/jaar gemiddeld in periode 1986-1996). Nog eerder, in periode '73-'85 waren de baggervolumes gemiddeld 1,3 a 1,4 miljoen m³/jaar.
- Vanaf 1997 is er een sterke toename in de stortvolumes, naar gemiddeld 3,1 miljoen m³/jaar. In de tien jaar ervoor (1986-1996) was dit ca. 0,6 miljoen m³/jaar gemiddeld.
- Aanvankelijk werd er veel aan zandwinning gedaan, maar dit is inmiddels vrijwel afgebouwd. Er is totaal 37 miljoen m³ onttrokken sinds 1956. Van 1967 – 1986 was ging het om ca. 1,2 miljoen m³/jaar, van 1987-1994 om ca. 0,7 miljoen m³/jaar en na 1995 is het nog gemiddeld 0,2 miljoen m³/jaar).

Macrocel 1 en mesocel 2 (voor verdieping drempel Borssele zie Figuur 0.1)

- Pas vanaf 1999 wordt hier gebaggerd (alleen in cel 1), relatief kleine hoeveelheden (0,35 miljoen m³/jaar), zeker i.r.t. omvang gebied),

- Vanaf 1997 wordt hier wat meer (2 miljoen m³/jaar) gestort, maar in 2005-2009 weer minder (1 miljoen m³/jaar)
- Geen (nauwelijks) zandwinning na 1992. Daarvoor in totaal 24 miljoen m³ in totaal, waarvan bijna de helft (11) in mesocel 2.
- Over periode van 50 jaar zijn de netto ingrepen plm. neutraal. Wel wijzigingen. In de jaren negentig wisselt het van -0,7 naar + 2 miljoen m³/jaar)
- Overzicht ingrepen macrocel 1:
 - 70-92: ca. 0,7 miljoen m³/jaar eruit door zandwinning (daarna snelle afbouw tot 0 vanaf 1995)
 - 81-96: ca. 0,4 miljoen m³/jaar erin door storten (dus tot 92 gemiddeld netto 0,3 miljoen m³/jaar eruit)
 - na 97: ca. 1,5 miljoen m³/jaar erin door storten
 - na 99: ook gemiddeld 0,35 miljoen m³/jaar eruit door baggeren (dus ca 1,2 miljoen m³/jaar netto erin vanaf '99)

Feiten over grootschalige sedimentbeheer: oost-west

Vanaf midden jaren negentig is er een ingrijpende verandering in grootschalig sedimentbeheer geweest:

- minder storten en meer zand winnen in macrocel 5 ter grootte van gemiddeld 4,5 miljoen m³ specie per jaar
- meer storten in macrocel 3 ter grootte van gemiddeld 3 miljoen m³ specie per jaar
- meer storten en minder zand winnen in macrocel 1, een totaaleffect van gemiddeld 1,5 miljoen m³ specie per jaar

Dit betekent dat wat de 'oost-west strategie' wordt genoemd feitelijk een 'van macrocel 5 naar macrocel 3 en 1 - strategie' is.

Waarnemingen gerelateerd aan deze strategie:

- De strategie is zeer goed terug te vinden als trendbreuk in de sedimentvoorraden van het oosten en westen van de Westerschelde (zie LTV V&T-rapport G-2).
- De strategie is terug te vinden tussen Hansweert en Bath, als trendbreuken in de bodem (trendbreuk nevengeuldiepte) en waterbeweging (veranderingen in toename amplificatie en afname faseverschil).
- De extra stortvolumes in macrocel 3 lijken daar geen trendverandering in de volumes te hebben veroorzaakt. De extra stortvolumes zijn dus, met behulp van de grote bruto transporten, stroomopwaarts (cel 4) en afwaarts (cel 1+2) gegaan. Er is na 2005 overigens wel een wijziging te zien in de sedimentvoorraad van deze cel, maar het lijkt waarschijnlijk dat de oorzaken daarvan eerder in lokale ontwikkelingen liggen.
- De uitwisseling tussen het estuarium met de monding / voordelta / kust is feitelijk een uitwisseling tussen cel 1 en de kust. Die lijkt gedomineerd door de herverdeling die:
 - (i) enerzijds wordt aangedreven door de grootschalige veranderingen zoals zeespiegelstijging en een sedimentvraag vanuit de monding (LTV V&T-rapport G-11)
 - (ii) en anderzijds gestuurd is door de lokale ontwikkelingen, zoals het sedimenteren in het vaarwater langs de Hoofdplaat en het, tot in de jaren '90, onttrekken door zandwinning.
 Het morfologisch systeem in macrocel 1 vertoont in die tijd zelf weinig veranderingen.
- Het morfologische beheer Oost-West heeft dus geen morfologische veranderingen in het westelijk deel van de Westerschelde veroorzaakt.
- Het verschil tussen het westen en macrocel 5 lijkt logisch gezien de omvang van de ingrepen in relatie tot de omvang en de recente beheerhistorie van beiden.

Bijlage 4: Memo doorstroomprofiel en dominant getijvolume

aan : Consortium LTV V&T
 van : Bram Blik (Svasek Hydraulics)
 datum : 4 januari 2012
 betreft : doorstroomprofiel en dominant getijvolume

Hoofdpunten rapport “Verklarend onderzoek drempels Westerschelde” van januari 1994 (Svašek projectnummer 940) in opdracht van Rijkswaterstaat Zeeland (project OOSTWEST).

In het rapport wordt een relatie afgeleid tussen het doorstroomprofiel van een geul en het dominante getijvolume (d.w.z. het ebvolume in ebgeulen, en het vloedvolume in vloedgeulen). Op basis van de debietmetingen in de Westerschelde over de jaren 1932 t/m 1991 wordt de volgende relatie gevonden:

$$DV = \text{constante} \times A,$$

waarin: $DV = \text{dominant gemiddeld getijvolume [m}^3/\text{getij]}$
 $A = \text{doorstroomoppervlak beneden NAP [m}^2\text{]}$
 $\text{constante} = \text{dominante getijweg} = 14.632 \text{ [m/getij]}$

Er is geen verschil gevonden in de evenwichtsrelatie tussen ebgedomineerde geulen en vloedgedomineerde geulen, terwijl de relatie op zich (ondanks het beperkte aantal meetpunten) behoorlijk significant is.

De constante 14.632 heeft als dimensie [m/getij], en stelt de dominante getijweg voor, d.w.z. de weg die een waterdeeltje gedurende een gemiddeld getij aflegt in de dominante richting. Als (gemakshalve) ebduur en vloedduur gelijk genomen worden dan volgt dat de ebgemiddelde ebsnelheid in ebgedomineerde geulen gelijk is aan de vloedgemiddelde vloodsnelheid in vloedgedomineerde geulen. Deze snelheid bedraagt ca 0,66 m/s. Bij een lange ebduur en een korte vloedduur nemen de gemiddelde snelheden in eb- en vloedgeulen evenredig af, resp. toe.

Het verschil met de “klassieke” relaties tussen getijvolume en doorstroomprofiel is dat in dit onderzoek het dominante volume als maatgevend beschouwd wordt, en niet het totale getijvolume (d.w.z. de som van eb en vloed). Voor een 2-geul systeem met een ebgedomineerde geul en een vloedgedomineerde geul leidt dit tot een groter doorstroomprofiel dan bij een enkele geul (of een geulenpaar met weinig eb/vloed dominantie). Een verandering in eb/vloed dominantie van een geulenpaar kan dus leiden tot veranderingen in het doorstroomoppervlak zonder dat dit ten koste gaat van het water transporterend vermogen. Zo blijkt in raai 6 (de raai over Middelgat en Gat van Ossensisse) het totale doorstroomoppervlak in de periode 1932 – 1989 te zijn afgenomen van ruim 43.000 m² tot krap 37.000 m², terwijl het totale getijvolume door deze raai nauwelijks is veranderd. De oorzaak is een sterke afname van het ebvolume van de ebgeul (Middelgat), die daardoor sterk in omvang is gereduceerd. De vloedgeul daarentegen (Gat van Ossensisse) heeft in de loop van de tijd weliswaar een veel groter aandeel gekregen in het transport van ebwater,

maar deze geul blijft vloedgedomineerd, en het doorstroomoppervlak wordt niet of nauwelijks beïnvloed door de toename van het debiet in de niet-dominante getijfase.

In het onderzoek uit 1994 is vervolgens een evenwichtsparameter gedefinieerd die de afwijking in het doorstroomoppervlak van een bepaalde geul (in een bepaald jaar) ten opzichte van de evenwichtsrelatie in beeld brengt. Vervolgens is voor iedere raai de afwijking van de evenwichtsrelatie, en de ontwikkeling van deze afwijking in de tijd in beeld gebracht. Indien de evenwichtsparameter groter is dan 1, is dat een indicatie dat de geul te ruim in zijn jasje zit, terwijl een waarde kleiner dan 1 duidt op een te krappe geul. In raai 6 (Middelgat/Gat van Ossenis) blijkt dat de afname van het ebvolume in het Middelgat goed gevolgd wordt door een afname van het doorstroomprofiel (de evenwichtsparameter blijft in de loop van de tijd rond de 1 schommelen), terwijl in het vloedgedomineerde Gat van Ossenis (dat in de tijd een toename van het vloedvolume kent, en volgens de relatie dus zou moeten groeien) niet of nauwelijks sprake is van uitruiming van de geul ter plaatse van de debietraai. Het Gat van Ossenis is dus in de loop van de tijd steeds krapper geworden. Mogelijk hangt dit samen met de aanwezigheid van (geulwand)bestorting en andere harde lagen, waardoor uitruiming van een geul vaak meer moeite kost dan verzanding.

Het is een kleine inspanning om de analyse uit het rapport van 1994 door te zetten met recente meetdata in de diverse debietraaien, om te zien of de trends die in 1994 geïdentificeerd werden nog steeds van kracht zijn.

Bovendien is het sinds de invoering van de ADCP als meetinstrument mogelijk om eb- en vloeddominantie veel gedetailleerder te bepalen. Ook binnen het dwarsprofiel van een geul kan sprake zijn van interne eb/vloeddominantie. In het rapport wordt het vermoeden geuit dat interne eb/vloeddominantie in de grote geulen in het westen er de oorzaak van is dat de evenwichtsparameter van deze geulen in het algemeen groter is dan 1 (dus 'te ruim').

De toename van de reproductienauwkeurigheid van numerieke modellen maakt het bovendien mogelijk om dezelfde analyse ook toe te passen op modeluitkomsten. Hierdoor is het mogelijk om de analyse uit te breiden tot een compleet ruimtelijk beeld, en niet alleen voor de debietraaien.

Ten slotte wordt in het rapport aanbevolen om de relatie tussen dominant getijvolume en geulafmetingen niet alleen uit te drukken in het doorstroomoppervlak, maar ook in het stroomvoerende vermogen. Op deze wijze wordt beter rekening gehouden met de vorm (breedte/diepte verhouding) van de geul. Een evenwichtsparameter op basis van het stroomvoerende vermogen heeft het karakter van een maat voor de bodemruwheid van de geul. Inzicht daarin levert interessante gegevens op voor de vergelijking met numerieke modellen.

Na het gereedkomen van het rapport uit 1994 zijn er aanwijzingen gevonden dat de relatie tussen getijvolume en doorstroomoppervlak wellicht een (nog) betere fit geeft als het niet-dominante volume toch ook voor een beperkt deel (ca. 20%) wordt meegenomen in de relatie. Een verfijning van de evenwichtsrelatie uit het 1994 rapport, waarbij de mate van eb/vloeddominantie van de betreffende geul als kental wordt meegenomen, is dus mogelijk, en biedt wellicht meer inzicht in de stabiliteit van de omvang van de diverse geulen.