Evaluatie van het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning sinds de tweede vaargeulverdieping op basis van veldwaarnemingen en het verbeterde Cellenconcept Westerschelde

C. Jeuken, I. Tánczos, Z.B. Wang

maart 2003

Inhoud

1 Achtergrond 1–1

1.1 Introductie 1–1

1.2 Het Cellenconcept Westerschelde 1–1

1.3 Het RWS-RIKZ project ZEEMOVE 1–1

1.4 Doel en aanpak 1–2

1.5 Leeswijzer 1–3

2 Analyse van de historische gegevens 2–1

2.1 Beschikbare historische gegevens 2–1

2.2 Analyse van de historische gegevens 2–2

3 Morfologische ontwikkelingen en ingrepen gedurende de periode 1955-2002 3–1

3.1 Inleiding 3–1

3.2 Cel 1: Het geulsysteem Honte en Schaar van de Spijkerplaat 3–2

3.3 Cel 3: Het geulsysteem Pas van Terneuzen en Everingen 3–6

3.4 Cel 4: Het geulsysteem Middelgat en Gat van Ossenisse / Overloop van Hansweert 3–10

3.5 Cel 5: Het geulsysteem Zuidergat / Overloop van Valkenisse en Schaar van Valkenisse / Waarde 3–14

3.6 Cel 6: Het geulsysteem Nauw van Bath en Schaar van de Noord 3–20

3.7 Cel 7: Het geulsysteem Vaarwater boven Bath en Appelzak 3–23

3.8 Algemene conclusies 3–26

4 Het stortcriterium - discussie 4–1

4.1 Inleiding 4–1

4.2 Bestaande theoretische criteria voor de stortcapaciteit 4–2

4.3 Nieuwe criteria voor de stortcapaciteit 4–3
4.3.1 Aanpak en overwegingen 4–3
4.3.2 Nieuwe criteria voor de stortcapaciteit 4–5
4.3.3 Conclusies 4–7
4.4 Een vergelijking van de stortcriteria met waarnemingen 4–8
4.4.1 Inleiding 4–8
4.4.2 Resultaten 4–8
4.4.3 Discussie en conclusies 4–12
5 Het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning 5–1
5.1 Inleiding 5–1
5.2 Evaluatie van het beleid sinds 1997 5–1
5.3 Aanbevelingen voor het beleid en beheer 5–3
6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen 6–1
6.1 Inleiding 6–1
6.2 Samenvatting 6–1
6.2.1 Gegevens analyse, maximale stortcapaciteit 6–1
6.2.2 Nieuwe (theoretische) stortcriteria 6–2
6.2.3 Evaluatie van het beheer en beleid 6–3
6.3 Conclusies 6–4
6.4 Aanbevelingen 6–4
7 Referenties 7–1

Bijlagen

A Cellenconcept A–1
B Diepte-kaarten B–1
C Erosie- en Sedimentatie kaarten C–1
D Ingreeplocaties 1990-2002 ..... D–1
E De 1D zandbalans E–1

1 Achtergrond

1.1 Introductie

Tijdens de studie voor de Lang-termijn visie Schelde-estuarium is het Cellenconcept Westerschelde ontwikkeld (Winterwerp et al, 2000, zie Bijlage A voor omschrijving). Binnen het kader van het RWS-Doelsubsidie project 'Inzicht in Watersystemen - Westerschelde (IWW)' en de RWS projecten ZEEKENNIS en ZEEMOVE wordt het Cellenconcept de komende paar jaren (Jeuken en Ruessink, 2002): a) onderbouwd, b) geoperationaliseerd als instrument voor beleid en beheer en c) toegepast bij het evalueren van het bestaande beleid / beheer en het formuleren van nieuw beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning. Onderdeel a is inmiddels afgerond (Jeuken e.a., 2002, Wang et al, 2002). De resultaten zijn samengevat in bijlage A.

Vooruitlopend op de verdere operationalisering van het Cellenconcept binnen het Doelsusbisideproject, heeft RIKZ WL | Delft Hydraulics, middels overeenkomst RKZ-1251, opdracht gegeven om onderdeel c verder uit te werken. Dit betreft:

1) het evalueren van beleid voor het vaargeulonderhoud en zandwinning, zoals van kracht sinds de tweede verdieping, en
2) het adviseren hoe het huidige beleid verbeterd c.q. vernieuwd kan worden.

1.2 Het Cellenconcept Westerschelde

In het 'Cellenconcept Westerschelde' is het geul-plaat systeem van de Westerschelde geschematiseerd in macro en mesocellen (zie Figuur 1.1). Voor elke cel is een zogenaamd *theoretisch stortcriterium* afgeleid. Volgens dit criterium kan in een individuele geul van een macro en of mesocel, 5-10% van de *bruto* zandtransportcapaciteit worden gestort zonder dat de geul verondiept als gevolg van dit storten. Dit theoretische stortcriterium is geverifieerd aan de hand van historische gegevens van de macrocellen (Jeuken, 2001).

1.3 Het RWS-RIKZ project ZEEMOVE

Het RWS-RIKZ project ZEEMOVE is onderdeel van de raamovereenkomst tussen Directie Zeeland en het RIKZ. Het project ZEEMOVE richt zich op het monitoren en evalueren van de hydrodynamische, morfologische en ecologische effecten van de tweede verruiming van de vaargeul naar Antwerpen (uitgevoerd in 1997/1998).

In juni 2003 moet het project ZEEMOVE een evaluatie geven van de waargenomen effecten van de tweede verruiming door deze te vergelijken met de vooraf verwachte of voorspelde effecten. De evaluatie van de ontwikkeling van het morfologisch systeem onder invloed van baggeren, storten en zandwinning vormt hierbij een belangrijk onderwerp. Leidraad voor deze evaluatie is het Streefbeeld zoals geformuleerd in de Lange Termijnvisie Schelde-

estuarium (LTV, RWS en MVG, 2001) en het daaruit voorvloeiende eerste kenmerk: De instandhouding van de fysische systeemkenmerken van het estuarium is uitgangspunt van het beheer en beleid. Hiermee wordt bedoeld de instandhouding van:

- een open en natuurlijk mondingsgebied,
- een systeem van hoofd en nevengeulen met tussenliggende en aangrenzende intergetijde- en ondiepwatergebieden in de Westerschelde, en
- een meanderend riviersysteem in de Beneden Zeeschelde.

De evaluatie van de ontwikkeling van het morfologisch systeem onder invloed van vaargeulonderhoud en zandwinning richt zich in eerste instantie op de Westerschelde (tweede bullet). Op basis van de resultaten van deze evaluatie zal RIKZ een advies uitbrengen aan Directie Zeeland voor een eventueel nieuw beleid, waarbij zandwinning, vaargeulonderhoud en morfologische ontwikkelingen geïntegreerd worden beschouwd. Dit kan dus ook betekenen dat nieuwe locaties en hoeveelheden voor storten en zandwinning worden geadviseerd. Het nader onderbouwde Cellenconcept Westerschelde zal als instrument voor deze evaluatie en advisering gebruikt worden.

1.4 Doel en aanpak

Het doel van dit project is tweeledig:

1. Het evalueren van het huidige beleid voor het vaargeulonderhoud en zandwinning in de Westerschelde.
2. Adviseren hoe het huidige beleid verbeterd c.q. vernieuwd kan worden.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van historische waarnemingen en het onderbouwde Cellenconcept.

Voor de zogenaamde meso-cellen zijn de benodigde gegevens voor een evaluatie niet beschikbaar. Daarom beperkt deze studie zich tot een analyse van de macro-cellen

De volgende stappen worden genomen:

1. De historische waarnemingen zoals geanalyseerd door Jeuken (2001) worden aangevuld met de meest recente gegevens (tot januari 2002).
2. Deze gegevens worden geanalyseerd om:
   a) na te gaan in hoeverre ingrepen als storten en baggeren bepalend zijn geweest voor de waargenomen erosie- en sedimentatietendensen, en
   b) de opgetreden sedimentuitwisseling tussen de macrocellen als functie van de tijd vast te stellen. Dit is een zogenaamde 1D-zandbalans volgens de methode beschreven door Jeuken et al., 2002.
3. De resultaten van de analyse van de waarnemingen worden gebruikt voor het opstellen van aanvullende dan wel nieuwe stortcriteria en het opnieuw evalueren van deze theoretisch stortcriteria. Er wordt specifiek gekeken naar de invloed van 'autonome' ontwikkelingen van het geulsysteem:
   a) De geulen in de (macro)cellen kunnen van nature eroderen en sedimenteren. Uit de analyses van Wang et al, 2002) blijkt dat in eroderende geulen de absolute stortcapaciteit groter is.
   b) Het optreden van zanduitwisseling tussen macrocellen. Netto zandaanvoer naar een macrocel leidt tot een toename van de stortcapaciteit in de cel (Wang et la., 2002). Dit betekent dat de stortcapaciteit in een macrocel ook

beïnvloed wordt door de ontwikkelingen in de aangrenzende cellen en het systeem van macrocellen als geheel beschouwd moet worden (en niet de geïsoleerde cellen zoals tot nu toe).

4. Er zal worden gekeken in hoeverre de (geverifieerde) theoretische stortcapaciteit wordt benut, dan wel onder- of overschreden wordt sinds de tweede verdieping. Opgemerkt wordt dat door autonome ontwikkelingen het te hanteren stortcriterium in de loop der tijd kan variëren (zie bijv. Wang en Jeuken, 2002).
5. Tot slot wordt op basis van deze evaluatie en de huidige kennis van het morfologisch systeem en het Cellenconcept geadviseerd hoe het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning kan worden verbeterd.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk twee worden de gebruikte gegevens en toegepaste analyses nader toegelicht. Daarna zullen De morfologische veranderingen en ingrepen per cel worden behandeld in hoofdstuk 3. De observaties uit hoofdstuk drie vormen de basis voor de evaluatie van het theoretisch stortcriterium en het opstellen van aanvullende richtlijnen voor het toepassen van het stortcriterium. In hoofdstuk vijf wordt het huidige beleid en beheer voor vaargeulonderhoud en zandwinning geëvalueerd op basis waarvan advies wordt uitgebracht hoe dit eventueel kan worden verbeterd. Hierbij zal de nadruk liggen op de stortcapaciteit per cel en in hoeverre deze wordt benut, onder- of overschreden. Het hoofdstuk wordt afgesloten met adviezen ten aanzien van het verbeteren dan wel vernieuwen van het beleid. Tot slot worden in hoofdstuk 6 de belangrijkste bevindingen van de voorliggende studie samengevat en worden enkele aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan.

2 Analyse van de historische gegevens

2.1 Beschikbare historische gegevens

Voor de uitvoering van de studie is gebruik gemaakt van de volgende, door RIKZ aangeleverde, basisgegevens:

- Lineair in de tijd (naar 1 januari) geïnterpoleerde waterinhouden ten op zichte van NAP+3.5m van alle vakken in de morfologische vakkenindeling '*rvaksas3*' (zie fig. 2.1) voor de periode 1955-2002;
- De bagger-, stort- en zandwinhoeveelheden per vak en per jaar. Niet gecorrigeerd voor uitlevering (in beunkuubs).
- Dieptekaarten (Bijlage B), erosie-en sedimentatiekaarten (Bijlage C) en kaarten met de bagger, stort en zandwinlocaties per jaar op overheadsheet voor de periode 1990-2002 (Bijlage D).

Door de basisgegevens van de verschillende vakken samen te voegen, zoals weergegeven in Fig. 2.1 en omschreven in tabel 2.1, kan de morfologische ontwikkeling van de macrocellen in de Westerschelde (Fig. 2.2) worden geëvalueerd.

Figuur 2.1 Vakkenindeling geulen ('rvaksas3') met de samenvoeging van geulvakken. Blauw (turkoois) is vloedgeul, grijsblauw is ebgeul. Voor de definitie van de macrocellen zie figuur 2.2 en tabel 2.1.

Figuur 2.2 De macro- en mesocellen in de Westerschelde.

Tabel 2.1 Overzicht van de geulen in de macro-cellen en de samenvoeging van geulvakken zoals weergegeven in Figuur 3.1. *EG* = ebgeul, *VG*= vloedgeul

Cel	Geul	Samenvoeging van vakken
1	Honte (*EG*)	1, 100
	Schaar van de Spijkerplaat (*VG*)	2, 201, 200
3	Pas van Terneuzen (*EG*)	4, 6, 600, 601, 10
	Everingen (*VG*)	5, 500, 9
4	Middelgat (*EG*)	1100, 11, 1201, 1200, 12, 13
	Gat van Ossenisse (*VG*)	1000, 14, 15
5	Zuidergat / Overloop Valkenisse (*EG*)	18, 1800. 1802, 2000, 20, 21, 2100
	Schaar van Valkenisse en Waarde (*VG*)	1801, 1903, 1904, 1902, 1905, 1901, 1900
	Stortgebied VG	1801, 1903, 1903
6	Nauw van Bath (*EG*)	22, 23
	Schaar van de Noord (*VG*)	24
7	Vaarwater boven Bath (*EG*)	25, 26
	Appelzak (*VG*)	27

2.2 Analyse van de historische gegevens

Het doel van de morfologische analyse van de macrocellen is:

- Per cel classificeren hoe belangrijk menselijke ingrepen, baggeren en storten, zijn geweest in de waargenomen ontwikkeling van het geul-plaat systeem. Hierbij ligt de nadruk op het evalueren van de effecten van storten op de ontwikkeling van een individuele geul al dan niet in combinatie met baggeren in de andere geul.

- Het traceren van kritische grenzen voor het storten van sediment op basis van de waarnemingen. Het zijn vooral deze grenzen die de basis vormen voor het evalueren van de geldigheid van het theoretische stortcriterium.
- Het bepalen van de opgetreden sedimentuitwisseling tussen cellen omdat deze uitwisseling van invloed is op de stortcapaciteit van een macrocel (Wang et al, 2002).
- Nagaan in hoeverre het geulsysteem kantelt onder invloed ingrepen en/of natuurlijke processen. Met *kantelen van het geulsysteem* wordt bedoeld een verandering in de verhouding tussen de gemiddelde diepte van de twee geulen in een macrocel. Dit gebeurt zodra één van beide geulen erodeert of sedimenteert. Ook een erosie of sedimentatie in beide geulen kan er toe leiden dat deze verhouding verandert. Inzicht in het kantelen is van belang voor het instandhouden van het meergeulensysteem (zie ook§1.3. Het kantelen van een geulsysteem betekent niet automatisch een degeneratie van de macrocel, wel dat het dynamisch evenwicht verandert.

Hiervoor wordt gekeken naar netto erosie/sedimentatie in relatie tot de netto omvang van de ingrepen in iedere geul (Jeuken 2000, 2001). Er worden voor deze analyse drie verschillende volumeveranderingen onderscheiden:

1. Het waargenomen totale geërodeerde ($\Delta V_{tot}<0$) of gesedimenteerde volume, ($\Delta V_{tot}>0$)
2. De *netto* hoeveelheid gebaggerd ($V_I<0$) of gestort materiaal ($V_I>0$), en
3. Het verschil tussen bovengenoemde twee volumes wordt de natuurlijke erosie ($\Delta V_{nat}<0$)of sedimentatie genoemd ($\Delta V_{nat}>0$). We zullen echter nooit weten of dit het werkelijk natuurlijke effect is.

Om de invloed van de ingrepen op het systeem aan te geven worden vier klassen onderscheiden:

1. **Geen invloed**: De waargenomen en 'natuurlijke' erosie / sedimentatie zijn even groot en hebben hetzelfde teken.
2. **Invloed**: De waargenomen en ' natuurlijke' ontwikkeling hebben hetzelfde teken maar zijn niet even groot.
3. **Kritische invloed**: De waargenomen en 'natuurlijke' ontwikkeling zijn net niet tegengesteld aan elkaar.
4. **Sturend**: De waargenomen en 'natuurlijke' erosie / sedimentatie hebben een tegengesteld teken.

Om de gevolgde procedure te verduidelijken is in Figuur 2.3 een theoretisch voorbeeld gegeven. In dit figuur staan als functie van de tijd: de cumulatieve totale volumeverandering, de cumulatieve ingrepen en de cumulatieve natuurlijke volumeverandering. Een stijgende lijn (positieve richtingscoëfficiënt) duidt op sedimentatie. Een dalende lijn betekent erosie. Voor het aangeven/classificeren van het belang van ingrepen wordt vooral gekeken naar het verloop van de waargenomen en natuurlijke volumeverandering en knikpunten in deze verlopen. Als deze lijnen nagenoeg samenvallen is baggeren of storten van weinig betekenis geweest. Hebben deze lijnen een tegengesteld verloop dan betekent dat, dat de ingrepen sturend zijn geweest in de waargenomen geulontwikkeling.

De analyse is als volgt uitgevoerd:

1. Uit de dieptekaarten wordt de jaarlijks gemiddelde en cumulatieve erosie en sedimentatie bepaald in de diverse geulvakken, (ΔV_{tot}) en ($\Delta V_{tot,cum}$), respectievelijk.
2. Uit de bagger- en stort-gegevens wordt het jaarlijks gemiddelde en cumulatieve *netto*[1] volume van de ingrepen bepaald in de diverse geulvakken, (V_l) en ($V_{l,cum}$). Hierbij wordt een uitleveringspercentage van 10% gehanteerd (fijn zand, Bray e.a., 1997). De gehele analyse wordt dus gebaseerd op profielkuubs.
3. Uit het verschil van 1 en 2 volgt de jaarlijks gemiddelde en cumulatieve natuurlijke volumeverandering in ieder geulvak,(ΔV_{nat}) en ($\Delta V_{nat,\ cum}$).
4. De resultaten van de verschillende geulvakken worden samengevoegd volgens Tabel 2.1 en Fig. 2.1 om de uitkomsten per geul en per cel te bepalen.
5. De cumulatieve waardes, $\Delta V_{tot,\ cum}$, $V_{l,,cum}$ en $\Delta V_{nat,\ cum}$, worden uitgezet in een grafiek. Een theoretisch voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 2.3).
6. Uit deze grafieken worden de gemiddelde erosie- en sedimentatiesnelheden in de eb- en vloedgeulen van iedere cel bepaald gedurende karakteristieke perioden (op basis van 5).

In tabel 2.2 zijn alle bovengenoemde definities bij elkaar gezet..

Tabel 2.2 Definitie van parameters, zoals weergegeven in grafieken en samenvattende tabellen

Parameter	Definitie en omschrijving
ΔV_{tot}	(Waterinhoud in jaar 1 - waterinhoud in jaar 2)/ aantal jaren= de netto erosie (-) of sedimentatie (Mm^3/jr).
V_l	Som van baggeren (-), storten (+) en zandwinning (-) per jaar.
ΔV_{nat}	V_{netto}-V_l , het door de waterbeweging per jaar aan- of afgevoerde volume sediment.
ΔV#.cum	Cumulatieve waarde van ΔV_{tot}, V_l, ΔV_{nat}
$\Delta V_{tot,\ gem}$	Gemiddelde waargenomen erosie- en sedimentatiesnelheid beneden NAP+3.5m (Mm^3/jr) ?
$V_{l,\ gem}$	Gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid gebaggerd of gestort materiaal (Mm^3/jr)
$\Delta V_{nat,\ gem}$	Gemiddelde natuurlijke erosie- en sedimentatiesnelheid.

Uit de onderbouwing van het Cellenconcept is gebleken dat de sedimentuitwisseling tussen macrocellen van invloed is op het stortcritrium. Zoals zal worden besproken in Hoofdstuk 4 is het daarvoor niet strikt noodzakelijk om de geanalyseerde gegevens per macrocel verder uit te werken tot 1D-zandbalansen. Echter, het maken van zo'n zandbalans geeft wel de mogelijkheid om resultaten te controleren. Het opstellen van een 1D-zandbalans, conform de methode zoals beschreven in Jeuken e.a. (2002), en de resultaten van deze analyse worden beschreven in Bijlage E.

[1] *Met netto wordt bedoeld de som van baggeren (-, erosie) en storten (+, sedimentatie)*

Figuur 2.3 Cumulatieve volumeveranderingen en de classificatie van het effect van ingrepen. Voor betekenis code 1-4 zie tabel 2.2. In dit voorbeeld sedimenteert een geul al dan niet als gevolg van netto storten, waarna een periode van erosie volgt waarbij storten een geringe invloed heeft gehad.

3 Morfologische ontwikkelingen en ingrepen gedurende de periode 1955-2002

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt per macro-cel een kwantitatief overzicht gegeven van de waargenomen morfologische veranderingen en ingrepen gedurende de periode 1955 tot 2002 welke volgen uit de analyse zoals beschreven in Hoofdstuk 2. Hierbij zijn de eerdere resultaten over de periode 1955-1999 overgenomen uit Jeuken (2001) en aangevuld.

Een macro-cel bestaat uit twee geulen. In de praktijk van de scheepvaart is één van beide geulen het hoofdvaarwater naar de haven van Antwerpen. Deze geul wordt daarom ook wel aangeduid als hoofdgeul. De andere geul fungeert als nevenvaarwater en wordt daarom ook wel nevengeul genoemd. Echter in een morfologische studie zoals deze is het relevanter om over eb- en vloedgeulen spreken. Behalve in cel 4, nabij Hansweert, wordt de vaargeul gevormd door de ebgeulen in de macrocellen. De nevengeul is in de meeste cellen, behalve in cel 4, een vloedgeul.

Voor elke cel wordt begonnen met een algemene beschrijving waarin de ontwikkeling van de twee geulen over de gehele periode 1955-2002 wordt gekarakteriseerd. Vervolgens wordt de morfologische ontwikkeling van de vloed- en ebgeul meer in detail besproken. Op basis van deze gegevens wordt vervolgens gediscussieerd over het al dan niet kantelen van het geulsysteem (zie §2.2) en de processen die daarin vermoedelijk een rol hebben gespeeld.

In de diverse figuren en tabellen worden vier verschillende perioden onderscheiden die gerelateerd kunnen worden aan de twee verdiepingen van de Westerschelde (deze worden in de figuren gemarkeerd door middel van verticale lijnen):

- 1955-1970, de periode voor de eerste grootschalige verdieping van de vaargeul,
- 1970-1975, dit globaal de periode van de eerste verdieping,
- 1975-1997, periode na de eerste verdieping,
- 1997-2002, de periode tijdens en na de tweede verdieping van de Westerschelde conform het verdrag 48'/43'.[2]

Naast deze ingreep-gerelateerde perioden worden in de tabellen de totale periode 1955-2002 en een aantal aanvullende deelperioden onderscheiden op basis van de waargenomen trends in de erosie- en sedimentatie.

Alle erosie- en sedimentatiegetallen in de figuren en tabellen in dit hoofdstuk zijn uitgedrukt in *profiel*kuubs (zie hoofdstuk 2). Voor elke macrocel staan de resultaten van de analyse samengevat in een tabel.

[2] *Deze verdieping is gerealiseerd in een tijdsbestek van ongeveer een jaar (zomer 1997-zomer 1998). De drempel van Vlissingen en de Wielingen (delta) zijn in het voorjaar van respectievelijk 1999 en 2000 verdiept. Na de initiële verdieping van de drempels is in de zomer van 2000 gestart met de verruiming (verbreding) van de vaargeul. Deze verruiming is in 2001 gereedgekomen.*

In de bijlagen B-D zijn de erosie/sedimentatiekaarten en dieptekaarten opgenomen met de ligging van de geulvakken en de bagger- en stortvakken

3.2 Cel 1: Het geulsysteem Honte en Schaar van de Spijkerplaat

Opmerking vooraf

Deze macrocel bestaat uit de ebgeul Honte en de vloedgeul Schaar van de Spijkerplaat. Ten zuiden van deze macrocel ligt een derde geul, het Vaarwater langs Hoofdplaat. Deze derde geul wordt in het cellenconcept geschematiseerd als een reeks meso-cellen (zie fig. 2.2 en bijlage A). Het Vaarwater langs Hoofdplaat degenereert op een tijdschaal van decennia en lijkt zich daarbij op te splitsen in kleinere geulen die de meso-cellen vormen. De gemiddelde netto sedimentatie in dit gebied over de periode 1955-2002 bedraagt 0.7Mm^3/jr.

Algemeen beeld, figuur 3.1a en b

Over de periode 1955-2002 is er sprake van erosie in de vloedgeul ter grootte van gemiddeld ongeveer 0.4 Mm^3/jr. De inhoud van de ebgeul verandert in deze periode niet (Tabel 3.1 en Fig. 3.1). Tegelijkertijd is er in de vloedgeul netto gemiddeld een geringe hoeveelheid sediment gestort terwijl er de ebgeul een kleine hoeveelheid is gebaggerd. Dus ondanks het netto storten van sediment is de vloedgeul geërodeerd, terwijl in de gebaggerde ebgeul de sedimentbalans gelijk is gebleven. Dit geeft aan dat het geulsysteem van nature neigt tot kantelen, de vloedgeul erodeert terwijl de ebgeul sedimenteert.

Vloedgeul - de Schaar van de Spijkerplaat, figuur 3.1a, c en e

De erosie van de vloedgeul manifesteert zich met name in de periode 1960-1997, met een kleine onderbreking tussen 1976 en 1978. Een vergelijking tussen figuur 3.1c en 3.1e leert dat de lange-termijn erosie voornamelijk heeft plaatsgevonden in het drempelgebied van de vloedgeul (fig. 3.1e). Tot 1997 vallen de lijnen van totale en 'natuurlijke' erosie en sedimentatie nagenoeg samen. De netto stortingen van gemiddeld 0.3 Mm^3/jr tussen 1976 en 1997 veroorzaken slechts kleine verschillen tussen beide lijnen. Dit betekent dat het netto storten tijdens deze periode de ontwikkeling van het drempelgebied en de vloedgeul als geheel nauwelijks heeft beïnvloed en dat de stortcapaciteit van de vloedgeul duidelijk groter was dan 0.3 Mm^3/jr.

Rond 1996 slaat de erosie van de vloedgeul om in een netto sedimentatie. De plotseling toegenomen stortintensiteit (een factor 4, zie Tabel 3.1) heeft hierin een sturende rol gehad. De stortingen van gemiddeld 1.6 Mm^3/jaar overschrijden de grens van de stortcapaciteit in de macrocel: de richtingscoëfficiënten van de lijn met de natuurlijke en totale sedimentatie hebben over de periode 1997-2002 een tegengesteld teken. Uit een meer gedetailleerde inspectie van de gegevens blijkt dat dit geldt voor zowel de vloedgeul als geheel, als het drempelgebied waar de stortingen plaatsvinden (zie Figuur 3.1e).

Ebgeul - Honte, figuur 3.1b, d en f

Meest opvallend in de ontwikkeling van de ebgeul is de periode 1970-1989, waarin de geul verondiept en de periode 1996-2000, waarin de geul weer erodeert. De verondieping manifesteert zich in een vrij groot deel van de geul (zie ook Bijlage C). De erosie in de periode 1996-2000 manifesteert zich met name in de inloop van de ebgeul (fig. 3.1f) en wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de verzandende kortsluitgeul in het laatste stadium van geulontwikkeling de grote ebgeul 'inloopt' (vak 100 bijlagen B, C).

Discussie - kantelen van het geulsysteem

Uit de gegevens blijkt dat het geulsysteem in deze macrocel gedurende twee perioden op verschillende manieren kantelt.

Tussen 1964 en 1996 kantelde het geulsysteem onder invloed van natuurlijke processen, waarbij de vloedgeul erodeerde en de ebgeul vanaf 1970 tot begin jaren negentig sedimenteerde:

De erosie van de vloedgeul hangt samen met het quasi-cyclisch gedrag van kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul[3]: overwegend ebgedomineerde kortsluitgeulen ontstaan langs de noordkant van de Hoge Platen, expanderen en migreren naar het Noorden waar ze uiteindelijk weer verzanden. De tijdschaal van dit proces varieert tussen de 10 en 35 jaar (Jeuken 2000). Deze kortsluitgeulen vormen de mesocellen in het Cellenconcept (zie bijlage A). Tijdens de periode 1964-1996 wordt het drempelgebied van de vloedgeul gekenmerkt door het quasi cyclisch gedrag van een grote ebgedomineerde kortsluitgeul die tussen 1964 en 1980 ontstaat, migreert en snel expandeert. Na 1980 begint de migrerende kortsluitgeul te degenereren om uiteindelijk in 2002 te verdwijnen. Tijdens dit degeneratieproces ontstaat in 1996 langs de noordkant van de Hoge Platen een nieuwe snel expanderende en migrerende kortsluitgeul.

De sedimentatie in de ebgeul gedurende de periode 1970-1989 is waarschijnlijk het gevolg van de erosie en verdieping van de drempel in de vloedgeul onder invloed van het gedrag van de kortsluitgeulen. Het ontstaan, de expansie en migratie van de kortsluitgeul zijn gepaard gegaan een toename van de gemiddelde diepte van het drempelgebied in de vloedgeul. Door deze verdieping is een herverdeling van de debieten (getijvolumina) tussen de ebgeul en vloedgeul opgetreden, waarbij de debieten in de vloedgeul zijn toegenomen ten koste van debieten door de ebgeul. Dit is vermoedelijk gepaard gegaan met de netto sedimentatie in de ebgeul. Enkele modelberekeningen, bij voorkeur initiële morfologische berekeningen, kunnen duidelijkheid verschaffen over deze vermoede samenhang in geulontwikkeling[4].

---

[3] *De drempelgebieden van de vloedgeulen inde Westerschelde worden/werden gekenmerkt door het voorkomen van kortsluitgeulen die het drempelgebied van de vloedgeul doorsnijden. Dit zijn de zogenaamde drempelgeulen (zie Jeuken, 2001).*

[4] *Dit is niet mogelijk op basis van de beschikbare metingen omdat in de metingen voor deze cel de debieten door ebgeul en vloedgeul niet afzonderlijk zijn bepaald.*

Tussen 1996 en 2002 kantelde het geulsysteem opnieuw maar nu in tegengestelde richting en onder invloed van zowel storten als natuurlijke processen: in de vloedgeul treedt sedimentatie op en de ebgeul erodeert:

De sedimentatie in de vloedgeul is gestuurd door netto stortingen van gemiddeld 1.6Mm^3/s. De erosie van de ebgeul wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de sterk degenererende kortsluitgeul de ebgeul Honte 'inloopt' en een forse lokale erosie veroorzaakt. De sedimentatie in de vloedgeul speelt waarschijnlijk ook een rol in de opgetreden erosie van de ebgeul.

Het kantelen van het geulsysteem sinds 1996 komt tot uitdrukking in de door Dekker (2002) berekende veranderingen in de debietverdeling: tussen 2001 en 1996 zijn de getijvolumina in de ebgeul met ongeveer 6-9% toegenomen ten koste, terwijl de volumina door de vloedgeul die met 5-6% zijn afgenomen.

Conclusies

Samenvattend, kunnen met betrekking tot de ontwikkeling van het geulsysteem in deze macrocel de volgende conclusies worden getrokken:

1. De invloed van ingrepen:
   - De netto stortingen in de vloedgeul van gemiddeld 0.3-0.4 Mm^3/jr tussen 1976 en 1997 hebben de erosie van deze geul in geringe mate beïnvloed.
   - De forse netto sediment stortingen van gemiddeld 1.6Mm^3/jr tussen 1997 en 2002 hebben een sturende invloed gehad op de ontwikkeling van de vloedgeul: in de geul is een netto sedimentatie opgetreden als gevolg van het storten.
2. Het kantelen van het geulsysteem. Het geulsysteem kent sinds 1955 twee perioden van kantelen:
   - Tussen 1964 en 1996 kantelde het geulsysteem onder invloed van natuurlijke processen, waarbij de vloedgeul erodeerde en de ebgeul vanaf 1970 tot begin jaren negentig sedimenteerde.
   - Sinds 1996 kantelt het systeem de andere kant op. In de vloedgeul treedt sedimentatie op onder invloed van storten. De ebgeul erodeert waarschijnlijk als gevolg van natuurlijke processen en het storten in de vloedgeul.

Figuur 3.1 Cumulatieve veranderingen in de vloedgeul (VG, linker figuren) en de ebgeul (EG, rechter figuren) van cel 1 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn $=\Delta V_{tot,\ cum}$, zwarte gestippelde lijn = $V_{I,\ cum}$, dikke blauwe lijn = $\Delta V_{nat,,cum}$.

Tabel 3.1 Erosie en sedimentatie (in $10^6 m^3$/jaar of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 1. Voor toelichting afkortingen zie tabel 3.2. Voor samenstelling van de geulen zie Tabel 2.1 en Figuur 2.1.

Periode[a]	*VG*			*EG*		
	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$
1955-2002	**-0,4**	**0,3**	**-0,7**	**0**	**-0,2**	**0,2**
1956-1970	**-0,5**	**0**	**-0,5**	**-0,5**	**-0,3**	**-0,2**
1970-1976	**-0,6**	**-0,3**	**-0,3**	**0,7**	**-0,2**	**0,9**
1976-1997	**-0,7**	**0,3**	**-1,0**	**0,4**	**-0,2**	**0,6**
1976-1978	0,8	0	0,8	0,2	-0,4	0,7
1978-1990	-0,9	0,3	-1,2	0,8	-0,2	1,0
1990-1997	-0,9	0,4	-1,3	-0,1	-0,1	0,0
1997-2002	**1,2**	**1,6**	**-0,4**	**-0,8**	**0,1**	**-0,9**

[a] Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

Tabel 3.2 Betekenis van de afkortingen in de overzichtstabellen met de erosie-sedimentatiesnelheden.

$\Delta V_{tot,\ gem}$	Gemiddelde waargenomen erosie- en sedimentatiesnelheid beneden NAP+3.5m (Mm^3/jr)
$V_{I,\ gem}$	Gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid *netto* gebaggerd of gestort materiaal (Mm^3/jr)
$\Delta V_{nat,\ gem}$	Gemiddelde natuurlijke erosie- en sedimentatiesnelheid.

3.3 Cel 3: Het geulsysteem Pas van Terneuzen en Everingen

Algemeen beeld, figuur 3.2 a en b

De lange-termijn ontwikkeling van deze cel wordt gekenmerkt door een natuurlijke erosie van de vloedgeul, waar overwegend gestort wordt, en netto erosie van de ebgeul waar gebaggerd wordt (Fig. 3.2, Tabel 3.3). Het geulsysteem als geheel erodeert over de totale periode 1955-2002. De lijnen van 'natuurlijke' en totale erosie in de vloedgeul vertonen eenzelfde verloop, maar vallen niet samen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het storten de erosie van de vloedgeul wel heeft beïnvloed, maar zeker niet sturend is geweest. In de ebgeul hebben deze twee lijnen een tegengestelde richting, wat aangeeft dat baggeren een belangrijke factor is geweest in de netto erosie van de ebgeul. Een nadere analyse leert echter dat deze erosie van de ebgeul een locaal verschijnsel is wat tot uitdrukking komt in de inhoudsverandering van de gehele geul (zie onder).

Vloedgeul - Everingen, figuur 3.2 a, c, e en g

De vloedgeul erodeert van nature gedurende de periode 1955-1997. De stortingen van gemiddeld 0.9Mm^3/jr gedurende de periode 1976-1990 hebben het erosieproces wel beïnvloed maar niet gestuurd ($\Delta V_{nat,\ gem}$ en $\Delta V_{tot,\ gem}$ hebben hetzelfde teken, tabel 3.3 en Fig 3.2.a). Net als in de vloedgeul van cel 1, manifesteert het erosieproces zich vooral in het drempelgebied van de vloedgeul (verg. Fig. 3.2a,c,e,f,). Tussen 1960 en 1990 erodeert de drempel onder invloed van het gedrag van de kortsluitgeulen (Jeuken, 2000). In de periode daarna verandert de totale sedimentbalans van het drempelgebied weinig.

Rond 1997 slaat de erosie van de vloedgeul om in een netto sedimentatie. Stortingen van gemiddeld (zie Tabel 3,3) 3.2 Mm^3/jr hebben deze ontwikkeling gestuurd ($\Delta V_{nat,\ gem}$ en $\Delta V_{tot,\ gem}$ hebben een tegengesteld teken, tabel 3.3 en Fig 3.2.a). De grote sedimentatie zones in de verschilkaarten van 1996-1998 en 1998-2000 (Bijlage C) vallen precies samen met de stortvakken (Bijlage D), waarin in bepaalde jaren extreem veel is gestort:

- In het centrale geuldeel (Fig. 3.3^e) is in 1997 en 1998 gemiddeld 3.3Mm^3/jr gestort. Omdat al het materiaal bleef liggen en net ten zuiden van het stortgebied erosie optrad is daar sindsdien niet meer substantieel gestort.
- In de inloop van de geul is in 1999 2.8Mm^3 sediment gestort. Uit de erosie-en sedimentatiekaart blijkt dat gebied net ten noorden van het stortgebied erodeert. Over de hele periode 1997-2002 heeft het storten in dit deel van de geul een kritische invloed (Fig.3.2c).

Beschouwen we de ontwikkeling van de vloedgeul in haar geheel vanaf 2000 dan blijkt dat stortingen van gemiddeld 2.2 Mm^3/jr een kritische invloed hebben op de sedimentatie in de vloedgeul ($\Delta V_{nat,\ gem}$=-2.2 Mm^3/jr en $\Delta V_{tot,\ gem}$=0 Mm^3/jr).

Ebgeul - Pas van Terneuzen, figuur 3.2 b, d, f en h

De lang-termijn erosie van de ebgeul manifesteert zich vooral in het drempelgebied (drempel van Borsele) waar sinds 1970 gebaggerd wordt. De geringe netto erosie in het aangrenzende gebied (vak 6+600, fig. 3.2f) is vooral het gevolg van zandwinning en in mindere mate het gevolg van baggeren ten behoeve van het vaargeulonderhoud. Het verdiepen van de drempel in de ebgeul is dus niet gepaard gegaan met een duidelijke erosie van de aangrenzende geuldelen. Dit betekent dat het baggeren in de ebgeul tot op heden slechts lokaal van invloed is geweest. Opvallend in de ontwikkeling van de ebgeul is de kortdurende periode van forse sedimentatie in bijna de gehele geul tussen 1966 en 1976 (tabel 3.3).

Tabel 3.3 Erosie en sedimentatie (in $10^6 m^3$/jaar of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 3. Voor toelichting afkortingen zie tabel 3.2. Voor samenstelling van de geulen zie Tabel 2.1 en Figuur 2.1.

Periode[a]	*VG*			*EG*		
	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$
1955-2002	**-0,5**	**0,7**	**-1,2**	**-0,3**	**-1,0**	**0,7**
1956-1970	**-0,7**	**-0,2**	**-0,5**	**-0,1**	**-0,2**	**0,2**
1960-1966	-1,8	-0,1	-1,7	-1,4	-0,1	-1,3
1966-1970	-1,0	-0,2	-0,8	1,5	-0,6	2,1
1970-1976	**-0,6**	**0,8**	**-1,4**	**0,9**	**-1,5**	**2,4**
1976-1997	**-0,6**	**0,8**	**-1,3**	**-0,8**	**-1,3**	**0,5**
1976-1978	-0,6	0,9	-1,5	-3,1	-2,3	-0,8
1978-1990	-0,4	0,9	-1,3	-0,5	-1,3	0,8
1990-1997	-0,7	0,5	-1,2	-0,3	-0,9	0,6
1997-2002	**0,8**	**3,2**	**-2,4**	**-0,9**	**-1,9**	**1,0**

[a] Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

Figuur 3.2 Cumulatieve volumeveranderingen in de vloedgeul (VG, linker figuren) en de ebgeul (EG, rechter figuren) van cel 3 (in Mm^3).Dikke doorgetrokken zwarte lijn $=\Delta V_{tot,\ cum}$, zwarte gestippelde lijn $= V_{L\ cum}$, dikke blauwe lijn $= \Delta V_{nat.,cum}$.

Discussie - kantelen van het geulsysteem

Uit de observaties per geul kan worden afgeleid dat het geulsysteem in de cel in het verleden op verschillende wijzen is gekanteld:

Tussen 1960 en 1976 kantelt het geulsysteem waarbij de gemiddelde diepte in de vloedgeul toeneemt ten opzichte van de gemiddelde diepte in de ebgeul. Kijken we alleen naar de erosie en sedimentatie in beide geulen, dan kan hierin nog een onderscheid worden gemaakt tussen de deelperioden 1960-1966 en 1966-1976:

- Tussen 1960 en 1966 eroderen beide geulen van nature. Uit een nadere analyse van de gegevens (niet getoond) blijkt dat de toename van de gemiddelde diepte in de vloedgeul bijna twee zo groot is als in de ebgeul.
- Tussen 1966 en 1976 erodeert de vloedgeul van nature, terwijl in de ebgeul een natuurlijke sedimentatie optreedt. Dit sedimentatieproces hangt samen met de verdieping van de drempel in de vloedgeul en het gedrag van de kortsluitgeulen in deze drempel sinds 1960 (zie ook Jeuken, 2000). Net zoals in cel 1 vermoedelijk het geval is geweest, is de verdieping van de drempel (t.o.v. NAP) in de vloedgeul gepaard gegaan met een toename van met name de ebdebieten ten koste van de debieten door ebgeul. De afname van de debieten in de ebgeul is gepaard gegaan met een sedimentatie.

Uit de meer gedetailleerdere analyses van Jeuken (2000) blijkt dat de vloedgeul gedurende deze periode sediment heeft geleverd aan de ebgeul in de landwaarts aangrenzende cel 4. De kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul (de meso-cellen) hebben een belangrijke rol gespeeld in het erosieproces van het drempelgebied en de uitwisseling van zand tussen de cellen (bochtgroepen).

Tussen 1976 en 2002 kantelt het geulsysteem in tegenovergestelde richting: de gemiddelde gemeten diepte in de ebgeul neemt toe ten opzichte van de diepte in de vloedgeul. Kijken we opnieuw naar de erosie en sedimentatie in beide geulen, dan kunnen weer twee deelperioden worden onderscheiden:

- Tussen 1976 en 1997 erodeert de vloedgeul van nature en de ebgeul onder invloed van baggeren. De netto toename van de diepte is het grootst in de ebgeul. Dit betekent dat de richting waarin het geulsysteem kantelt door ingrepen wordt bepaald.
- Tussen 1997 en 2002 sedimenteert de vloedgeul netto onder invloed van storten en erodeert de ebgeul netto als gevolg van baggeren. Het vaargeulonderhoud en de zandwinning veroorzaken een kantelen van het geulsysteem.

Tot slot wordt opgemerkt dat uit hydrodynamische modelberekeningen blijkt (Jeuken, 2000 en Dekker, 2002) dat het kantelen van het geulsysteem gepaard gaat met een herverdeling van de debieten / getijvolimina tussen de eb- en vloedgeul zoals hierboven omschreven. De veranderingen in de debietverdeling zijn te klein (binnen meetnauwkeurigheid) en qua gebiedsdekking te beperkt om door debietmetingen te kunnen worden bevestigd.

Conclusies

Samenvattend, kunnen met betrekking tot de ontwikkeling van het geulsysteem in deze macrocel de volgende conclusies worden getrokken:

1. De invloed van ingrepen:

- De netto stortingen in de vloedgeul van gemiddeld 0.9 Mm^3/jr tussen 1976 en 1997 hebben de erosie van deze geul in geringe mate beïnvloed.
- De forse netto sediment stortingen van gemiddeld 3.2Mm^3/jr tussen 1997 en 2002 hebben een sturende invloed gehad op de ontwikkeling van de vloedgeul: in de geul is een netto sedimentatie opgetreden als gevolg van het storten.
- Stortingen van gemiddeld 2.2Mm^3/jr tussen 2000 en 2002 blijken een kritische invloed te hebben op de ontwikkeling van de vloedgeul.

2. Het kantelen van het geulsysteem. Het geulsysteem kantelt sinds 1960 op verschillende wijzen:
   - Tussen 1960 en 1976 neemt de gemiddelde diepte in vloedgeul toe ten opzichte van de gemiddelde diepte in de ebgeul. Deze ontwikkeling is vooral het gevolg geweest van natuurlijke processen op mesoschaal in het drempelgebied van de vloedgeul.
   - Tussen 1976 en 2002 kantelt het geulsysteem in tegengestelde richting onder invloed van natuurlijke processen en ingrepen. De vloedgeul sedimenteert terwijl de ebgeul erodeert. De richting van het kantelen wordt sinds 1976 bepaald door het baggeren in de ebgeul en sinds 1997 bepaald door het baggeren in de ebgeul in combinatie met storten in de vloedgeul.

3.4 Cel 4: Het geulsysteem Middelgat en Gat van Ossenisse / Overloop van Hansweert

Algemeen beeld, figuur 3.3a en b

De vloedgeul Gat van Ossenisse / Overloop van Hansweert erodeert op een tijdschaal van decennia, terwijl de ebgeul aanzienlijk verondiept (tabel 3.4 en Fig. 3.3a en b). Sinds 1970 wordt er in toenemende mate gestort in de eroderende vloedgeul. Het verloop van de waargenomen en de 'natuurlijke' volumeveranderingen geeft aan dat het storten de netto ontwikkeling van de vloedgeul als geheel wel heeft beïnvloed, maar nog niet heeft gestuurd. Op de drempel in de ebgeul is tot 1980 gebaggerd. Nadat in 1981 de vloedgeul als hoofdvaarwater in gebruik is genomen, worden tot 1997 geringe hoeveelheden sediment gestort in de ebgeul. Na 1997 neemt de stortintensiteit in de ebgeul toe en lijkt het storten een mogelijk onomkeerbaar kantelen van het systeem te veroorzaken waarbij de gehele ebgeul opnieuw sterk verondiept en de vloedgeul 'van nature' erodeert.

Vloedgeul - Gat van Ossenisse e.o., figuur 3.3a, c en e

De vloedgeul erodeert van nature tussen 1955 en 1978 en sinds 1990 ($\Delta V_{nat,\ gem}$ en $\Delta V_{tot,\ gem}$ hebben hetzelfde teken). In de tussenliggende periode 1978-1990 was de geul min of meer stabiel qua (water)inhoud. De erosie van de vloedgeul is tot 1978 slecht weinig beïnvloed door de stortingen van gemiddeld 0.3 en 0.6Mm^3/jr ($\Delta V_{nat,\ gem}$ en $\Delta V_{tot,\ gem}$ hebben hetzelfde teken, tabel 3.4 en Fig 3.3.a). Na 1978 neemt de invloed van de stortingen toe, waarbij er tussen 1978 en 1990 sprake is van een kritische invloed: $\Delta V_{nat,\ gem}$=-1.5 Mm^3/jr en $\Delta V_{tot,\ gem}$=0 Mm^3/jr (Tabel 3.4). De duidelijk grotere stortingen van 2.1 Mm^3/jr gedurende de periode 1990-1997 hebben de erosie van de geul wel beïnvloed maar zeker niet gestuurd.

Deze waarnemingen duiden op een stortcapaciteit in de geul die in de tijd varieert tussen in ieder geval 1.5 en 2.1Mm^3/jr.

Het erosie proces, waarbij de geul gemiddeld dieper wordt manifesteert zich in de gehele geul (Fig. 3.4.c en e). Het drempelgebied in de vloedgeul erodeert sinds 1955 (zie Fig. 3.3e), aanvankelijk van nature maar sinds eind jaren zeventig vooral als gevolg van netto baggeren. In de inloop van de vloedgeul wordt netto gestort (Fig. 3.3c). Opvallend is het sterke van nature eroderen van dit geuldeel sinds 1997. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat er in deze periode *netto* relatief weinig is gestort in dit deel van de geul en de vloedgeul als geheel (Tabel 3.4 en 3.5).

Ebgeul - Middelgat, figuur 3.3b, d en f

In de ebgeul treedt sinds (tenminste) 1955 sedimentatie op. Tussen 1995 en 1990 neemt de sedimentatiesnelheid in de ebgeul geleidelijk af, waarbij de geul rond 1990 een nieuw 'evenwicht' lijkt te hebben bereikt: in de periode 1990-1997 is de gemiddelde sedimentatie nagenoeg gelijk aan nul. Het sedimentatieproces tot 1990 is geringe mate beïnvloed door ingrepen: tot 1980 door netto baggeren sindsdien door netto storten.

Sinds 1997 is er opnieuw sprake van een forse sedimentatie in de geul. Figuur 3.4a suggereert dat het hier gaat om een natuurlijke sedimentatie. De sedimentatie wordt echter waarschijnlijk in grote mate bepaald door het storten van gemiddeld 2.1 Mm^3/jr (Tabel 3.4). Al het sediment dat in de geul wordt gestort blijft liggen (zie ook bijlage C, Tabel 3.5) en lijkt een extra sedimentatie in de aangrenzende geuldelen te veroorzaken (zie ook discussie kantelen).

Discussie - kantelen van het geulsysteem

Uit de waargenomen ontwikkelingen van de vloedgeul en de ebgeul blijkt dat het geulsysteem sinds (tenminste) 1955 kantelt. De vloedgeul erodeert en wordt gemiddeld dieper. De ebgeul verondiept. Het hele proces van kantelen in deze macrocel wordt ook wel als functiewisseling of bochtafsnijding aangeduid. De term functiewisseling komt voort uit de scheepvaartfunctie van de geulen: tot 1981 fungeerde de ebgeul als hoofdvaarwater. Sinds 1981 is dat de vloedgeul. De term bochtafsnijding wordt duidelijk wanneer naar de dieptekaarten wordt gekeken (Bijlage B): Het historische uitbochten van de ebgeul en de erosie van de vloedgeul (zie Jeuken, 2000) heeft in 1951 geleid tot het doorbreken van de drempel in de vloedgeul. De doorbraak is in gang gezet door het ontstaan van een ebgedomineerde kortsluitgeul in 1951. De kortsluitgeul expandeerde snel waardoor de drempel in de vloedgeul in twintig jaar tijd volledig is geërodeerd; de gemiddelde waterdiepte op de drempel is met meer dan een factor twee toegenomen sinds 1955. Als gevolg van dit proces zijn de getijvolumina in de vloedgeul toegenomen ten koste van de volumina door de ebgeul. Deze herverdeling komt duidelijk tot uitdrukking in de gemeten debieten/getijvolumina en hydrodynamische modelberekeningen (zie bijv. Jeuken, 2000).

Kijken we naar de invloed van natuurlijke processen en ingrepen op het kantelen van het geulsysteem dan kunnen de volgende deelperioden worden onderscheiden:

- Tussen 1955 en 1978 is het kantelen het natuurlijke proces zoals boven omschreven, waarbij baggeren in de ebgeul en geringe stortingen in de vloedgeul geen noemenswaardige invloed hadden.
- Tussen 1978 en 1990 is het vooral de ebgeul die van nature verondiept. De gemiddelde diepte in de vloedgeul als geheel verandert nauwelijks; alleen de gemiddelde diepte van het voormalige drempelgebied neemt onder invloed van netto baggeren toe.
- Tussen 1990 en 1997 wordt het kantelen bepaald door het van nature eroderen van de vloedgeul; de ebgeul is stabiel.
- Tussen 1997 en 2002 verondiept de gehele ebgeul als gevolg van forse stortingen. De natuurlijke erosie van vloedgeul lijkt hierdoor te zijn versterkt. De erosie-sedimentatiekaarten (Bijlage C) en de getallen in tabel 3.5 laten zien laat zien dat de getijstroom het in de ebgeul gestorte sediment (1.9 Mm^3/jr.) niet afgevoerd krijgt. De te grote stortingen lijken bovendien een sedimentatie in de aangrenzende geuldelen te veroorzaken (Bijlage C). Deze algehele netto sedimentatie is zeer groot; vergelijkbaar met die in de periode 1960-1970, kort na de bochtafsnijding. Deze waarnemingen doen vermoeden dat het geulsysteem onomkeerbaar aan het kantelen is als gevolg van de te grote stortingen in de ebgeul. Berekeningen met een morfologisch model, bij voorkeur met ESTMORF in combinatie met een op DELFT 3D gebaseerd 2D/3D model, kunnen duidelijkheid geven over:
  1. In hoeverre en op welke wijze het storten in de ebgeul een sedimentatie in de gehele ebgeul heeft veroorzaakt.
  2. In hoeverre de toegenomen erosie van de vloedgeul het gevolg is van de ontwikkelingen in de ebgeul en op haar beurt weer van invloed is geweest op algehele sedimentatie in de ebgeul.
  3. In hoeverre het kantelen een zichzelf versterkend proces is waarbij op termijn de instandhouding van de macrocel bedreigd wordt.

Tot slot wordt opgemerkt dat de historische en recente kanteling van het geulsysteem tot uitdrukking komt in de gemeten en berekende herverdeling van de getijvolumina door de geulen (Jeuken, 2000, Dekker, 2002). Tussen 1996 en 2001 zijn de getijvolumina door de vloedgeul met orde 10% toegenomen ten koste van de debieten door de ebgeul.

Conclusies

Samenvattend, kunnen met betrekking tot de ontwikkeling van het geulsysteem in deze macrocel de volgende conclusies worden getrokken:

1. De invloed van ingrepen:
   - De stortcapaciteit in de vloedgeul varieert in de tijd: tussen 1978 en 1990 bleek het netto storten van gemiddeld 1.5Mm^3/jr een kritische invloed te hebben. In de periode 1990-1997 hadden netto stortingen van gemiddeld 2.1 Mm^3/jr wel invloed op de ontwikkelng van de geul, maar waren zeker niet sturend.
   - De netto stortingen van gemiddeld in 2.1 Mm^3/jr in de ebgeul overschrijden de stortcapaciteit in de geul (sturende werking).
2. Het kantelen van het geulsysteem. Het geulsysteem kantelt sinds (ten minste) 1955 waarbij gemiddeld over de hele periode 1955-2002 de vloedgeul dieper wordt en de ebgeul ondieper. Hierbij kunnen twee deelperioden worden onderscheiden:

- Van 1955 tot 1990 wordt het kantelen in belangrijke mate bepaald door natuurlijke processen.
- Van 1990 tot 1997 wordt het kantelen van het geulsysteem bepaald door natuurlijke processen en ingrepen.
- Tussen 1997 en 2002 domineren de ingrepen, met name het storten in de ebgeul, het proces van kantelen.

Tabel 3.4 Erosie en sedimentatie (in $10^6 m^3$/jaar of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 4. Voor toelichting afkortingen zie tabel 3.2. Voor samenstelling van de geulen zie Tabel 2.1 en Figuur 2.1.

Periode[a]	*VG*			*EG*		
	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$
1955-2002	**-1,1**	**0,9**	**-2,0**	**1,8**	**0**	**1,8**
1956-1970	**-1,2**	**0,0**	**-1,2**	**2,5**	**-0,3**	**2,8**
1960-1966	-1,6	-0,2	-1,4	2,1	-0,2	2,3
1966-1970	-0,1	0,3	-0,4	3,3	-0,6	3,9
1970-1976	**-1,0**	**0,6**	**-1,6**	**1,3**	**-1,4**	**2,7**
1976-1997	**-0,5**	**1,7**	**-2,2**	**1,1**	**0,1**	**1,1**
1976-1978	-0,5	1,5	-2,0	1,2	-0,4	1,5
1978-1989	0,0	1,5	-1,5	1,8	0,3	1,5
1990-1997	-1,3	2,1	-3,4	0,2	0,2	0,0
1997-2002	**-3,7**	**0,2**	**-3,9**	**3,1**	**2,1**	**1,0**

[a] Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

Tabel 3.5 Erosie en sedimentatie (Mm^3/jr) in het stortgebied (vak 1000 en 14 samen) van de vloedgeul en de ebgeul (vak 12).

	VG			*EG*		
	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$
1955-2002	**-0,5**	**1,2**	**-1,7**	**0,6**	**0,1**	**0,5**
1956-1970	**-0,7**	**0,0**	**-0,7**	**0,6**	**-0,1**	**0,6**
1960-1966	-1,2	-0,2	-1,1	0,4	-0,1	0,5
1966-1970	0,1	0,3	-0,2	0,9	0	0,9
1970-1976	**-0,2**	**0,6**	**-0,8**	**0,5**	**-0,1**	**0,7**
1976-1997	**0,0**	**2,1**	**-2,1**	**0,4**	**-0,1**	**0,5**
1976-1978	0,4	1,8	-1,4	0,5	0	0,6
1978-1990	0,3	1,8	-1,5	0,5	-0,2	0,7
1990-1997	-0,5	2,8	-3,3	0,1	0	0,2
1997-2002	**-2,5**	**1,3**	**-3,7**	**1,6**	**1,9**	**-0,3**

Figuur 3.3 Cumulatieve volumeveranderingen in de vloedgeul (VG, linker figuren) en de ebgeul (EG, rechter figuren) van cel 4 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn $=\Delta V_{tot,\ cum}$, zwarte gestippelde lijn $= V_{i,\ cum}$, dikke blauwe lijn $= \Delta V_{nat,\ cum}$.

3.5 Cel 5: Het geulsysteem Zuidergat / Overloop van Valkenisse en Schaar van Valkenisse / Waarde

Opmerkingen vooraf

In de basisgegevens zoals die in de voorgaande studie (Jeuken, 2001) zijn gebruikt, blijkt bij vergelijking met de nieuwe gegevens een fout te hebben gezeten in de inhoudsberekeningen en dieptegegevens van het vloedgeulengebied in 1999. Over de periode 1998-1999 werd in bijna alle vakken van het vloedgeulengebied sedimentatie geconstateerd. Deze sedimentatie volgt niet uit de nieuwe gegevens, waardoor de bevindingen over de periode sinds 1997 in de voorliggende studie afwijken met de eerdere studie van Jeuken (2001).

In tegenstelling tot de andere macrocellen, wordt deze macrocel niet gekenmerkt door één vloedgeul, maar door een zich vertakkende vloedgeul (zie ook Bijlage B). De Schaar van Valkenisse heeft zich sinds 1960 geleidelijk in een zuidwestelijke richting verplaatst (rotatie).

Algemeen beeld

De ontwikkeling het geul-plaat systeem over de gehele periode 1955-2002 wordt gekenmerkt door een sedimentatie in de vloedgeul[5] van gemiddeld ongeveer 0.4 Mm^3/jr. Omdat er in deze periode gemiddeld circa 1.0 Mm^3/jr netto is gestort betekent dit een 'natuurlijke' erosie van circa 0.6 Mm^3jr sinds 1955.

De lange-termijn ontwikkeling van de ebgeul wordt gedomineerd door een totale erosie van gemiddeld 1.0 Mm^3/jr. Deze erosie is van dezelfde orde van grootte als de totale hoeveelheid gebaggerd sediment (1.4 Mm^3/jr. , Fig. 3.4b, Tabel 3.6).

Deze observaties geven aan dat de ontwikkeling van de geulen in deze cel gedurende de gehele periode 1955-2002 in vrij sterke mate is beïnvloed door het baggeren en storten en dat het geulsysteem kantelt onder invloed van ingrepen.

Vloedgeul - Schaar van Valkenisse / Waarde, figuur 3.4a,c, e en g

Bekijken we de ontwikkeling van het vloedgeul wat meer in detail dan blijkt dat dit gebied gedurende de periode 1955-1990 sedimenteert, vooral onder invloed van netto storten, en sinds 1990 van nature erodeert.

De vloedgeul verondiept reeds in de periode 1955-1970. De gemiddelde erosie- en sedimentatiesnelheden (Tabel 3.6) duiden op een kritische invloed van het storten van gemiddeld 0.9Mm^3/jr gedurende deze periode. Echter, de getallen over de deelperioden 1955-1966, 1960-1966 en 1966-1970 geven aan dat dit beeld iets genuanceerder en vooral gecompliceerder ligt: de relatief grote stortingen tussen 1960-1966 gaan gepaard met slechts een geringe totale sedimentatie, terwijl de geringe stortingen tussen 1966 en 1970 samenvallen met een forse sedimentatie in de geulen en op de platen.

Voor de perioden 1970-1975 en 1975-1990 bestaat een duidelijker relatie tussen de sedimentatie en de sturende invloed van de netto stortingen. Deze samenhang wordt het duidelijkst wanneer ook de deelperioden tussen 1975 en 1990 worden beschouwd (zie Tabel 3.6). De geleidelijke afname van het storten (2.7→1.0Mm^3/jaar) gaat tot 1990 gepaard met een afnemende totale sedimentatie in de vloedgeul. Opvallend hierbij is de bijna constante 'natuurlijke' erosie van de geul van circa 0.8 Mm^3/jr. Een inventarisatie van de erosie en sedimentatiesnelheden in het stortgebied zelf (tabel 3.7) geeft aan dat de stortcapaciteit in dit gebied gedurende de periode 1978-1990 ongeveer 0.9Mm^3/jaar was.

[5] *Hiervan is 0.2 Mm^3/jr afgezet in het intergetijdegebied.*

Rond 1990 slaat de sedimentatie om in een erosie die tot op heden (2002) doorgaat. Deze erosie manifesteert zich met name in de vloedgeul Schaar van Valkenisse (zie Fig. 3.4g).

Ebgeul - Zuidergat / Overloop van Valkenisse, figuur 3.4b, d en f

De morfologische veranderingen in de ebgeul manifesteren zich met name in de periode sinds 1970. Op de drempel van Hansweert wordt sindsdien gemiddeld 2.0-2.5 Mm^3/jr gebaggerd. De gegevens tot 1990 ondersteunen de volgende gedachtegang uit het RWS OOSTWEST-project over de invloed van het baggeren op de ontwikkeling van de ebgeul: het verdiepen en onderhouden van de drempel van Hansweert gaat gepaard met een erosie van de aangrenzende geuldelen van gemiddeld 1.4Mm^3/jr in de periode 1970-1990. Het feit dat de waargenomen en de natuurlijke volumeveranderingen in de aangrenzende het zelfde teken hebben geeft aan dat deze geuldelen 'van nature' eroderen (Fig. 3.4f). Het geërodeerde materiaal is vermoedelijk, samen met (een deel van) het in dit geuldeel netto gestorte sediment (0.9Mm^3/jr, fig. 3.4f), door de ebgedomineerde getijstroom getransporteerd naar de drempel van Hansweert waar het weer is weggebaggerd.

Na de periode 1990 en 1997 waarin de volumeveranderingen in de geul vooral worden bepaald door het onderhoudsbaggerwerk op de drempel, wordt in 1997-2000 de gehele ebgeul verruimt. Hierbij wordt niet alleen de drempel verdiept, ook in de aangrenzende geuldelen worden omvangrijke hoeveelheden sediment weggebaggerd om de vaargeul op breedte te brengen (zie ook Bijlage C). De erosie van de aangrenzende geuldelen is nu geen 'natuurlijke' erosie meer, $\Delta Vtot,cum$ en $\Delta Vnat,cum$ hebben een tegengesteld teken, maar wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door het baggeren.

Discussie - het kantelen van het geulsysteem

De lange termijn ontwikkeling sinds 1955 wordt gekenmerkt door een erosie van de ebgeul en een sedimentatie in de vloedgeul sedimenteert. Dus ook het geulsysteem in deze cel vertoont tendensen tot kantelen waarbij de verhouding tussen de gemiddelde diepte van de geulen verandert:

- Tussen 1955 en 1990 erodeert de ebgeul en treedt er sedimentatie op in de vloedgeul onder invloed van stortingen. De gemiddelde diepte van de vloedgeul neemt af ten opzichte van de gemiddelde diepte in de ebgeul.
- Tussen 1990 en 1997 erodeert de vloedgeul van nature[6], terwijl de ebgeul min of meer stabiel is. De gemiddelde diepte van de vloedgeul neemt toe ten opzichte van de ebgeul; het systeem kantelt tijdelijk de andere kant op onder invloed van hoofdzakelijk natuurlijke processen in vloedgeul.
- Tussen 1997 en 2002 eroderen zowel de ebgeul als de vloedgeul. De vloedgeul erodeert als gevolg van natuurlijke processen, terwijl de ebgeul erodeert als gevolg van baggeren (vaargeulonderhoud en zandwinning). De gemiddelde diepte van de ebgeul neemt meer

[6] *Het van nature eroderen van de vloedgeul sinds 1990 hangt vermoedelijk samen met twee factoren: i) de afname van de netto stortintensiteit, mede door het concentreren van de zandwinning in het oostelijk deel van de Westerschelde sinds begin jaren negentig en ii) het doorbreken van de drempel in de Schaar van Valkenisse en de erosie van deze geul in samenhang met het (opnieuw) voorkomen van kortsluitgeulen sinds 1988 (zie bijlage B, zie Fig. 3.5g).*

toe dan in de vloedgeul; het kantelen is dus tegengesteld aan de periode 1990-1997 en gelijk aan de periode 1955-1990.

Het storten in de vloedgeul en het baggeren in de ebgeul hebben het kantelen van het geulsysteem gedurende de periode 1955-1990 zeker beïnvloed. Het is echter om verschillende redenen de vraag of de ingrepen echt zo sturend zijn geweest zoals vaak wordt gesteld en de grafieken in figuur 3.4 suggereren:

In de eerste plaats duiden de hydrografische kaarten sinds 1900 (1990-1970) ook al een natuurlijke tendens tot kantelen van het systeem (Jeuken, 2000). Uit deze kaarten blijkt namelijk dat de grote vloedgeul zich opsplitst in twee kleinere geulen en dat de activiteit van kortsluitgeulen afneemt en de intergetijdegebieden langzaam aaneengroeien. Om na te gaan of het geulsysteem in de periode voor 1955 al kantelde, is gebruik gemaakt van inhoudsberekeningen voor 1931 waarbij dezelfde vakkenindeling als in fig. 2.2 is gehanteerd. Omdat voor de situatie van 1931 de hoogteligging van de platen niet overal bekend is, is de gemiddelde erosie en sedimentatie, $\Delta Vtot,gem$, gedurende de periode 1931-1955 ten opzichte van NAP-2m bepaald. Dan blijkt dat de ebgeul met 3.6Mm^3/jr erodeerde, terwijl in de vloedgeul een sedimentatie optrad van gemiddeld 0.7Mm^3/jr. Dit wijst er op dat het geulsysteem al langer kantelt. Hoe lang precies is nog steeds niet te zeggen. Daarvoor zijn eigenlijk aanvullende dieptekaarten nodig. Het zou dus kunnen zijn dat het baggeren en storten ten behoeve van het vaargeulonderhoud sinds 1955 een dergelijke tendens heeft versterkt maar niet heeft veroorzaakt.

In de tweede plaats is het denkbaar dat de eerder beschreven bochtafsnijding in cel 4 de kanteling van het geulsysteem heeft beïnvloed. Het aanstromen van het geulsysteem door met name de vloed is tussen 1955 en 1970 waarschijnlijk veranderd als gevolg van de veranderingen in macrocel 4: met name de vloeddebieten door de ebgeul zijn in die periode waarschijnlijk toegenomen ten koste van de debieten door de vloedgeul.

Een derde aspect, tot slot, betreft de erosie van de aangrenzende delen van de ebgeul direct na de eerste verdieping van de drempel in de jaren zeventig. De waargenomen volumeverandering $\Delta Vtot$ en de natuurlijke verandering $\Delta Vnat$ in de aangrenzende geuldelen hebben beiden een negatief teken, wat duidt op een 'natuurlijke' erosie. Zoals eerder aangegeven is tijdens de Oostwest-studie verondersteld dat deze erosie van de aangrenzende delen een reactie is van de geul op het verdiepen van de drempel. Er is echter, naast de invloed van de ontwikkelingen in de macrocel 4, nog een ander mechanismen dat een erosie van de aangrenzende geuldelen kan hebben veroorzaakt: het verdwijnen van grote (ebgedomineerde) kortsluitgeulen en het aaneengroeien van het intergetijdegebied in de periode 1955-1970 is vermoedelijk gepaard gegaan met een afname van vooral de ebdebieten door de vloedgeul, waardoor de ebstroom in de ebgeul is toegenomen met erosie van de ebgeul als gevolg.

De waarnemingen sinds de tweede verdieping hadden een inzicht kunnen geven in het belang van deze drie mechanismen als in de aangrenzende geulen niet netto zou zijn gebaggerd. Gevoeligheidsberekeningen met een gevalideerd morfologisch 2D/3D model kunnen dit inzicht nog wel geven.

Tot slot wordt opgemerkt dat berekeningen met een hydrodynamisch model de volgende informatie geven met betrekking tot de recente veranderingen in de getijbeweging:

- het kantelen van het geulsysteem tussen 1990 en 2001 is gepaard gegaan met een toename van de getijvolumina door de vloedgeul van orde 12%. Met name de ebstroomsnelheden in de eroderende Schaar van Valkenisse zijn in de periode 1996-2001 toegenomen. Dit suggereert een voortzetting van het erosieproces in deze geul.
- De getijvolumina door de ebgeul zijn in de periode 1990-2001 niet noemenswaardig veranderd (bij een toenemend doorstroomoppervlak). Dit betekent dat stroomsnelheden in de ebgeul zijn afgenomen.

Conclusie

Samenvattend, kunnen met betrekking tot de ontwikkeling van het geulsysteem in de macrocel 5 de volgende conclusies worden getrokken:

1. De invloed van ingrepen:
   - In de periode 1955-1970 is de sedimentatie in de vloedgeul in kritische mate beïnvloed door stortingen van 0.9Mm^3/jr.
   - In de periode 1978-1990 is met stortingen van gemiddeld 2.1Mm^3/jr de sedimentatie in de geul gestuurd (overschrijding stortcapaciteit).
   - Baggeren heeft een sturende invloed op de erosie van ebgeul sinds 1997.
2. Het geulsysteem kantelt sinds (ten minste) 1955 waarbij gemiddeld over de hele periode 1955-2002 de vloedgeul netto verondiept en de ebgeul verdiept. Alleen gedurende de periode 1990-1997 kantelde het systeem de andere kant op. Historische waarnemingen geven aan dat het kantelen, zoals waargenomen gedurende de periode 1955-1990, mogelijk al in 1931, of nog eerder, is begonnen.

Tabel 3.6 Erosie en sedimentatie (in 10^6m^3/jaar of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 5. Voor toelichting afkortingen zie tabel 3.2. Voor samenstelling van de geulen zie Tabel 2.1 en Figuur 2.1. Voor de ontwikkeling van het stortgebied, zie tabel 3.7.

Periode[a]	*VG*			*EG*		
	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$
1955-2002	**0,4**	**1,0**	**-0,6**	**-1,0**	**-1,4**	**0,4**
1956-1970	**0,9**	**0,9**	**0,0**	**0,4**	**0,0**	**0,4**
1955-1966	0,5	1,1	-0,6			
1960-1966	0,2	1,3	-1,1	-0,6	-0,6	0,0
1966-1970	2,2	0,3	1,8	1,5	0,9	0,6
1970-1976	**0,9**	**2,7**	**-1,8**	**-2,1**	**-2,7**	**0,6**
1976-1997	**0,2**	**0,9**	**-0,7**	**-1,2**	**-1.1**	**-0,1**
1976-1978	1,1	2,1	-1,0	-3,0	-2,1	-0,9
1978-1990	0,6	1,0[b]	-0,4	-1,4	-0,6	-0,8
1990-1997	-0,7	0,3	-1,0	-0,3	-1,4	1,1
1997-2002	**-0.5**	**0,1**	**-0.6**	**-3.0**	**-5,4**	**2.3**

[a] Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

[b] Dit is inclusief de stortingen van in totaal 3.8Mm^3 sediment uit het Kanaal door Zuid-Beveland gedurende de periode 1987-1990.

g) Sinds 1980 schaar van Valkenisse - vak 1904

Figuur 3.4 Cumulatieve volumeveranderingen in de vloedgeul (VG, linker figuren) en de ebgeul (EG, rechter figuren) van cel 5 (in Mm3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn $=\Delta V_{tot,cum}$, zwarte gestippelde lijn $= V_{L,cum}$, dikke blauwe lijn $= \Delta V_{nat,,cum}$.

Tabel 3.7 Erosie en sedimentatie (Mm^3/jr) in het stortgebied van de vloedgeul

Periode	*VG*		
	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$
1955-2002	**0,1**	**0,9**	**-0,8**
1955-1970	**0,4**	**0,9**	**-0,5**
1960-1966	0,5	1,3	-0,8
1966-1970	0,3	0,3	0,0
1970-1976	**1,1**	**2,7**	**-1,6**
1976-1997	**-0,2**	**0,8**	**-1,0**
1976-1978	0,7	1,9	-1,2
1978-1990	-0,1	0,9	-1,0
1990-1997	-0,7	0,3	-1,0
1997-2002	**-0,1**	**-0,1**	**0,0**

3.6 Cel 6: Het geulsysteem Nauw van Bath en Schaar van de Noord

Algemeen beeld, figuur 3.5 a en b

In dit relatief kleine geulsysteem nabij Bath wordt sinds 1922 gebaggerd ten behoeve van de scheepvaart. Beschouwen we de geulontwikkelingen sinds 1955, dan blijkt dat de vloedgeul gekenmerkt wordt door een geringe netto erosie (Fig. 3.5). De ebgeul erodeert als gevolg van het baggeren. Aan dit geulsysteem en het landwaarts aangrenzende geul-plaat systeem zijn gedurende de periode 1968-1980 aanzienlijke hoeveelheden (orde 26 Mm^3) sediment onttrokken ten behoeve van de ophoging van kades in Antwerpen.

Vloedgeul - Schaar van de Noord, figuur 3.5 a

De vloedgeul wordt weergegeven door middel van vak 24 (zie Bijlage B). Opgemerkt wordt dat een deel van de inloop van de geul en tweederde van een stortvak in geulvak 22 vallen (drempel van Valkenisse in de ebgeul). Dit bemoeilijkt het beoordelen van het effect van storten en baggeren op de geulontwikkeling. Om een indruk van de totale hoeveelheid gestort en gebaggerd materiaal te krijgen zijn in Tabel 3.9 voor enkele perioden de gemiddelde stort- en baggersnelheden in vak 22 en 24 samengevat.

Wanneer wat meer in detail naar de ontwikkeling van de vloedgeul in de tijd (Figuur 3.5a) wordt gekeken dat blijkt dat geul vooral tussen 1966 en 1972 erodeert. Deze erosie wordt gevolgd door een korte periode van sedimentatie 1972 tot 1978. Tijdens deze periode van sedimentatie zijn forse hoeveelheden sediment gestort in de inloop van de vloedgeul (Fig. 3.5a, Tabel 3.8 en 3.9, Bijlage C). Vooral de erosie en sedimentatiekaart geeft aan dat het storten van gemiddeld 1.2-1.6 Mm^3/jr (tabel 3.9) in de inloop van de geul tussen 1972 en 1978 niet direct door de getijstroom kon worden opgeruimd; het storten leidde tot sedimentatie in de geul. Opvallend is dat vergelijkbare stortingen in de periode 1956-1966

niet leidden tot een netto verondieping van de vloedgeul (Tabel 3.9 Fig. 3.5a). De geringere stortingen in de periode 1978-1990 van gemiddeld 0.3 Mm^3/jr in het hele stortvak (tabel 3.9), gingen gepaard met een kleinere netto sedimentatie in het vak (24) van de vloedgeul. Het is echter niet duidelijk of deze sedimentatie het gevolg is van het storten of een na-ijlingseffect van de grotere stortingen in de voorgaande periode. Uit deze verschillende gegevens kan worden afgeleid dat de stortcapaciteit van de vloedgeul in de tijd varieert tussen de 0.3 en 1.6 Mm^3/jr. De observaties met betrekking tot de laatste verdieping tonen geen duidelijke veranderingen in de situatie ter plekke.

Figuur 3.5 Cumulatieve volumeveranderingen in de vloedgeul (VG) en de ebgeul (EG) van cel 6 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn $=\Delta V_{tot,\ cum}$, zwarte gestippelde lijn = $V_{I,\ cum}$, dikke grijze lijn = $\Delta V_{nat,\ cum}$.

Tabel 3.8 Volumeveranderingen(in $10^6 m^3$/jaar of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 6. Voor toelichting afkortingen zie tabel 3.2. Voor samenstelling van de geulen zie Tabel 2.1 en Figuur 2.1.

Periode[a]	*VG*			*EG*		
	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$
1955-2002	**-0,1**	**0,1**	**-0,1**	**-0,4**	**-1,5**	**1,1**
1956-1970	**-0,2**	**0,2**	**-0,4**	**-0,4**	**-0,9**	**0,5**
1960-1966	0,2	0,2	0,0	-0,4	-0,5	0,1
1966-1970	-1,2	0,0	-1,2	-0,4	-1,8	1,5
1970-1976	**0,0**	**0,1**	**-0,2**	**-0,6**	**-1,5**	**0,8**
1976-1997	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**-0,4**	**-2,0**	**1,6**
1976-1978	0,3	0,4	-0,2	-0,6	-2,2	1,6
1978-1990	0,1	-0,1	0,2	-0,5	-2,4	1,9
1990-1997	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	-1,3	1,1
1997-2002	**-0,1**	**0,0**	**-0,1**	**-0,5**	**-1,4**	**0,9**

[a] Periode is gedefinieerd van 1 januari beginjaar tot 1 januari eindjaar.

Tabel 3.9 Baggeren en storten (Mm^3/jr) in geulvak 22 (drempel van Valkenisse) en 24 (Schaar van de Noord).

Periode	Netto ingreep in vak 22	Baggeren in vak 22	Storten in vak 22	Storten in vak 24
1955-2002	**-0,9**	**-1,3**	**0,4**	**0,1**
1956-1970	**-0,9**	**-1,7**	**0,8**	**0,2**
1960-1966	-0,5	-1,9	1,3	0,2
1966-1970	-1,8	-1,9	0,0	0,0
1970-1976	**-1,5**	**-1,9**	**0,4**	**0,1**
1976-1997	**-2,1**	**-2,4**	**0,3**	**0,0**
1976-1978	-2,2	-3,5	1,2	0,4
1978-1990	-2,4	-2,7	0,3	-0,1
1990-1997	-1,5	-1,5	0,0	0,0
1997-2002	**-1,1**	**-1,1**	**0,0**	**0,0**

Ebgeul - Nauw van Bath, figuur 3.5 b-d

De ontwikkeling van de ebgeul is in sterke mate beïnvloed door het baggeren en onttrekken van sediment. Tijdens de verdieping van 1970-1975 is praktisch de hele geul verdiept. De grote invloed van het baggeren op de ontwikkeling van de ebgeul blijkt ook uit de getallen in tabel 3.8. De laatste verruiming van de vaargeul en daarop volgende onderhoud zijn niet gepaard gegaan met een significante wijziging in de baggeromvang op de drempel van Valkenisse (zie Tabel 3.8).

Discussie - het kantelen van het geulsysteem

Uit de waarnemingen over de gehele periode 1955-2002 blijkt dat beide geulen in de macrocel eroderen. Wanneer beide geulen eroderen kan niet zonder meer worden gesteld dat het systeem kantelt. Om hierover een uitspraak te kunnen doen moet er worden gekeken naar de verandering in de verhouding tussen de gemiddelde diepte in de ebgeul en de gemiddelde diepte in de vloedgeul. Hieruit blijkt dat de ebgeul ten opzichte van de vloedgeul is verdiept. Dit kantelen van het geulsysteem is bepaald door het baggeren in de ebgeul. Het kantelen is tussen 1972 en 1978 versterkt door het storten in de vloedgeul.

Conclusie

Samenvattend, kunnen met betrekking tot de ontwikkeling van het geulsysteem in de macrocel 6 de volgende conclusies worden getrokken:

1. De invloed van ingrepen:
   - Omdat het stortvak in de inloop van de vloedgeul niet geheel binnen het geulvak valt is het voor de vloedgeul moeilijk vast te stellen hoe groot de invloed van stortingen op de ontwikkeling van de geul is geweest.
   - Baggeren heeft een sturende invloed gehad op de erosie van ebgeul.
2. Het geulsysteem kantelt sinds (ten minste) 1955 als gevolg van vooral baggeren en in mindere mate als gevolg van het storten. De ebgeul verdiept ten opzichte van de vloedgeul.

3.7 Cel 7: Het geulsysteem Vaarwater boven Bath en Appelzak

Opmerking vooraf

Tijdens de voorbereidende analyses is een fout in de gegevens van Jeuken (2001) naar voren gekomen. De gegevens met betrekking tot de ingrepen en de natuurlijke veranderingen van de ebgeul zoals gepresenteerd in de tabel 4.10 van Jeuken (2001) zijn onjuist. De correcte gegevens worden in tabel 3.10 van voorliggende rapportage vermeld.

Algemeen beeld, figuur 3.6 a en b

Het geulsysteem in deze cel nabij de grens Nederland-België wordt gekenmerkt door een netto erosie gedurende de periode 1955-2002 (Fig. 3.6 en Tabel 3.10). In de eroderende vloedgeul is gestort, terwijl er in ebgeul is gebaggerd. Begin jaren zeventig is een leidam geplaatst bovenstrooms van de vloedgeul.

Vloedgeul - Appelzak, figuur 3.6 a

De vloedgeul erodeert langzaam gedurende de gehele periode ondanks de netto stortingen van sediment. Het verloop van de waargenomen en natuurlijke volumeverandering geeft aan dat het storten het erosieproces wel heeft beïnvloed. Echter met een gemiddelde stortsnelheid variërend van 0.1-0.6 Mm^3/jr is er beneden de stortcapaciteit van de geul gestort (Tabel 3.10).

Ebgeul - Vaarwater boven Bath, figuur 3.6 b-d

De ebgeul vertoont eenzelfde tendens als de ebgeul in cel 5 (Fig. 3.6). In de periode tijdens en vlak na de verdieping van de drempel van Bath (1970-1980) is het aangrenzende deel van de ebgeul gaan uitruimen. Het geërodeerde materiaal is vermoedelijk afgezet op de drempel en daar weer weg gebaggerd. Rondom de tweede verdieping lijkt eenzelfde soort reactie van de ebgeul op te treden (Fig. 3.6). Echter, de erosie van het aangrenzende geuldeel begint al in 1994 (vergelijkbaar met de ebgeul in cel 5) en wordt dus mogelijk niet veroorzaakt door het verdiepen van de drempel in de ebgeul.

Figuur 3.6 Cumulatieve volumeveranderingen in de vloedgeul (VG) en de ebgeul (EG) van cel 7 (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn $=\Delta V_{tot,\ cum}$, zwarte gestippelde lijn $= V_{I,\ cum}$, dikke grijze lijn $= \Delta V_{nat,\ cum}$.

Discussie - het kantelen van het geulsysteem

Uit de waarnemingen blijkt dat beide geulen in deze cel eroderen. Om na te gaan of er sprake is van een kantelen van het geulsysteem moet naar de verandering in de verhouding tussen de gemiddelde diepte van de ebgeul en de gemiddelde diepte van de vloedgeul worden gekeken. Hieruit blijkt dat gemiddeld over de hele periode 1955-2002, de ebgeul enigszins verdiept ten opzichte van de vloedgeul (de verhouding verandert met orde 10%). De richting van het kantelen vertoont wel fluctuaties in de tijd:

- 1955-1970: de diepte van de vloedgeul neemt toe ten opzichte van de ebgeul, onder invloed van natuurlijke processen;
- 1970-1980: de diepte van de ebgeul neemt toe ten opzichte van de vloedgeul, als gevolg van de verdieping van de vaargeul en waarschijnlijk ook als gevolg van het aanleggen van de leidam begin jaren zeventig.
- 1980-1994: de diepte in de vloedgeul neemt toe ten opzichte van de ebgeul;
- 1994-2002: de diepte van de ebgeul neemt iets toe ten opzichte van de vloedgeul, als gevolg van de tweede verdieping van de vaargeul.

Conclusies

Samenvattend, kunnen met betrekking tot de ontwikkeling van het geulsysteem in de macrocel 7 de volgende conclusies worden getrokken:

1. De invloed van ingrepen:

- De stortingen van gemiddeld 0.1-0.6Mm^3/jr hebben de erosie van de vloedgeul wel beïnvloed maar niet gestuurd.
- Baggeren heeft een sturende invloed gehad op de erosie van ebgeul.

2. Het geulsysteem kantelt sinds (ten minste) 1955, waarbij de ebgeul gemiddeld genomen verdiept ten opzichte van de vloedgeul als gevolg van baggeren en waarschijnlijk ook als gevolg van de aanleg van de leidam in deze cel (1970/1971).

Tabel 3.10 Erosie en sedimentatie (in 10^6m^3/jaar of Mm^3/jaar) in de gehele vloedgeul (VG) en ebgeul (EG) van cel 7. Voor toelichting afkortingen zie tabel 3.2. Voor samenstelling van de geulen zie Tabel 2.1 en Figuur 2.1.

Periode	*VG*			*EG*		
	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$	$\Delta V_{tot,\ gem}$	$V_{I,\ gem}$	$\Delta V_{nat,\ gem}$
1955-2002	-0,2	0,2	-0,4	-0,4	-1,3	0,9
1956-1970	**-0,3**	**0,5**	**-0,8**	**-0,2**	**-1,3**	**1,1**
1960-1966	-0,4	0,4	-0,8	-0,2	-1,2	1,0
1966-1970	0,0	0,6	-0,6	0,1	-1,6	1,7
1970-1976	**-0,1**	**0,2**	**-0,3**	**-1,5**	**-1,4**	**-0,2**
1976-1997	**-0,2**	**0,1**	**-0,3**	**-0,3**	**-1,5**	**1,2**
1976-1978	-0,4	0,1	-0,5	-1,4	-2,2	0.7
1978-1989	0,0	0,2	-0,2	-0,2	-1,5	1,3
1990-1997	-0,4	0,0	-0,4	0,0	-1,2	1,1
1997-2002	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**-0,6**	**-1,0**	**0,4**

3.8 Algemene conclusies

In de voorgaande paragrafen is per macro-cel nagegaan hoe de trends in de waargenomen volumeverandering er uit zien en hoe deze zich verhouden tot de ingrepen. De belangrijkste conclusies worden in deze paragraaf op hoofdlijnen samengevat.

Uit de waarnemingen zijn voor een aantal overwegend vloedgedomineerde geulen kritische grenzen voor de stortcapaciteit naar voren gekomen. Het gaat hierbij om de cellen 3 (nabij Terneuzen), 4 (nabij Hansweert) en 5 (Valkenisse). In de vloedgeulen van deze cellen ging het storten van sediment gedurende een korte of langere tijd gepaard met een netto verondieping van de geul (ΔV_{tot} en ΔV_{nat} hebben een tegengesteld teken). Daarnaast duiden de waarnemingen op tijdelijke onder- en overschrijdingen van de stortcapaciteit. Deze gegevens, zijn in de conclusies van de voorgaande paragrafen samengevat, en zullen in hoofdstuk 4 worden gebruikt om de geldigheid van de nieuwe theoretische stortcriteria te evalueren.

Het oorspronkelijke cellenconcept (Winterwerp et al., 2001) veronderstelde een morfologisch stabiel (niet veranderend) geulsysteem. Deze situatie komt in de praktijk eigenlijk niet voor. Alle macrocellen vertonen tendensen waarbij het geulsysteem kantelt: de verhouding tussen de gemiddelde diepte van de ebgeul en de vloedgeul verandert in de loop der tijd. Dit kantelen van geulsysteem kan van nature gebeuren, maar ook door baggeren en storten worden veroorzaakt, gestimuleerd of juist worden tegengewerkt. Het kantelen van een geulsysteem betekent niet automatisch een degeneratie van de macrocel, wel dat het dynamisch evenwicht verandert. Wanneer een tendens tot kantelen zich op de lange-termijn (eeuw) doorzet en zichzelf versterkt kan het twee-geulensysteem degenereren tot een een-geulsysteem.

De resultaten laten zien dat de geulsystemen in de drie macro-cellen tussen Vlissingen en Hansweert min of meer van nature, gedurende een kortere of langere periode een neiging tot kantelen vertonen (tabel 3.11): de vloedgeulen eroderen, terwijl in de ebgeulen overwegend sedimentatie optreedt. Deze neiging is tegengewerkt door het baggeren en storten (zie ook Jeuken, 2000). De richting van het kantelen van de geulsysteem is in de macrocellen bij Vlissingen en Terneuzen in de tijd veranderd.

In de cellen in het oostelijk deel, tussen Hansweert en de grens Nederland-België, treedt een tegenovergestelde ontwikkeling op: de ebgeulen verruimen aanzienlijk vooral als gevolg van het baggeren, terwijl vooral de vloedgeulen in cel 5 gemiddeld verondiepen. In dit gebied kantelt het geulsysteem dus de ander kant op en hebben baggeren en storten deze tendens op zijn minst versterkt.

De recente ontwikkelingen in de macro-cel nabij Hansweert geven reden tot zorg. De omvangrijke stortingen in de ebgeul worden niet door de getijstroom opgeruimd en geven aanleiding tot sedimentatie in de gehele ebgeul. Het storten heeft hier dus een *globaal* effect. Daarnaast erodeert de vloedgeul sterk, mogelijk mede als gevolg van de sedimentatie in de ebgeul. Deze kanteling van het geulsysteem wordt door het vaargeulonderhoud

(storten) veroorzaakt en lijkt onomkeerbare vormen aan te nemen. Berekeningen met een gevalideerd 2D (3D) morfologisch model kunnen meer zekerheid over dit proces verschaffen.

Tot slot, blijkt uit de opgestelde zandbalansen voor enkele karakteristieke deelperioden, zie bijlage E, dat de Westerschelde sinds 1990 sediment exporteert. De export manifesteert zich in de drie zeewaarts gelegen macrocellen (d.w.z. het gebied zeewaarts van Hansweert). Landwaarts van Hansweert is sprake van een import van sediment, d.w.z. een landwaarts gericht transport. In de twintig jaar daarvoor werd sediment geïmporteerd. Het grootschalige beeld van inhoudsveranderingen en de sedimenttransporten tussen macrocellen is door de tweede verdieping niet wezenlijk veranderd. Het sediment exporterende karakter van de Westerschelde sinds 1990 zou wel eens kunnen samenhangen met de wijzing in het zandwinbeleid, waarbij de zandwinning is verplaatst van het westelijk deel naar het oostelijk deel van de Westerschelde.

4 Het stortcriterium - discussie

4.1 Inleiding

Zoals uit de onderbouwing van het Cellenconcept is gebleken wordt de stortcapaciteit in de macrocellen beïnvloed door de 'autonome' ontwikkeling van de individuele geulen en de daarmee samenhangende sedimentuitwisseling tussen de macrocellen (Wang et al, 2002):

1. In een, van nature, eroderende vloedgeul bleek de stortcapaciteit groter te zijn dan 10% van de totale bruto transport capaciteit van de *macrocel*. Deze grotere stortcapaciteit kan twee oorzaken hebben:
   - De morfologische verandering van de geul. Als een geul van nature erodeert betekent dat, in vergelijking tot een morfologisch niet veranderende geul, grotere stroomsnelheden en bruto sedimenttransporten en dus een grotere *absolute* stortcapaciteit in de betreffende geul. Met betrekking tot deze conclusie kan nog de volgende aanvullende opmerking worden gemaakt: Als de erosie van de geul wordt veroorzaakt door baggeren, zullen de stroomsnelheden, de bruto transportcapaciteit en de *absolute* stortcapaciteit juist kleiner zijn dan in een morfologisch stabiele geul. Het is niet bekend in hoeverre erosie en sedimentatie van een individuele geul van invloed zijn op de relatieve grootte van het stortcriterium (het percentage van de bruto transportcapaciteit).
   - De verschillen in de morfologie tussen de ebgeul en de vloedgeul. De gemiddelde dwarsdoorsnede en diepte van de beschouwde vloedgeul zijn groter dan van de ebgeul. Hierdoor heeft de vloedgeul een grotere bruto transport capaciteit dan de ebgeul.Het cellenconcept houdt hier (nog) geen rekening mee en relateert de stortcapaciteit aan het bruto zandtransport door de gehele cel en niet aan de brutotransport capaciteit in de individuele geulen.

   De afzonderlijke invloed van deze twee aspecten op de absolute en relatieve grootte van de stortcapaciteit in eroderende en sedimenterende geulen dient nog nader te worden uitgezocht.

2. In een van nature eroderende macrocel, die sediment exporteert naar aangrenzende cellen, is de *absolute* transport- en stortcapaciteit groter dan in een cel die morfologisch stabiel is (qua sedimentinhoud en gemiddelde diepte). Met betrekking tot deze conclusie kan eveneens de volgende aanvullende opmerking worden gemaakt: als de erosie van de macrocel wordt veroorzaakt door baggeren, zullen de stroomsnelheden, de bruto zandtransporten en de *absolute* stortcapaciteit juist kleiner zijn dan in een morfologisch stabiele macrocel. Wanneer de erosie leidt tot een toename van de gemiddelde diepte zullen, bij een gelijk blijvend getijvolume, de stroomsnelheden, de bruto zandtransporten en de *absolute* stortcapaciteit in de cel gedurende het erosieproces afnemen. In een macrocel waar sedimentatie plaats vindt treden de tegengestelde effecten op.

De huidige criteria zijn opgesteld zonder rekening te houden met het autonoom gedrag in de cellen. In dit hoofdstuk zal worden besproken hoe de bestaande theoretische criteria moeten worden uitgebreid zodanig dat ook het autonoom gedrag wordt meegenomen.

4.2 Bestaande theoretische criteria voor de stortcapaciteit

In het oorspronkelijke Cellenconcept wordt uit gegaan van een systeem van geulen en platen dat morfologisch stabiel is, d.w.z. niet verandert (Winterwerp et al., 2000 en Torenga, 2001). Dit impliceert dat het van nature eroderen en sedimenteren van de eb- en vloedgeulen in de macrocellen en de daarmee gepaard gaande zanduitwisseling tussen de macrocellen, geen invloed heeft op de stortcapaciteit van een macrocel.

Voor een morfologisch stabiel geul-plaat systeem zijn voor de stortcapaciteit vier verschillende criteria gedefinieerd (zie Jeuken, 2001):

1. Het 10%-stortcriterium, oftwel er kan maximaal 10% van de bruto transportcapaciteit in de geul worden gestort, is van toepassing in de volgende situaties (zie ook Torenga, 2001):
   - In beide geulen wordt netto niet gebaggerd.
   - In één van de geulen wordt netto gestort en in de andere geul wordt netto gebaggerd waarbij de invloed van het baggeren zich beperkt tot het baggergebied zelf (het zogenaamde *lokaal* baggeren).

2. Het 5-10%-stortcriterium (tussen de 5 en 10%) is van toepassing als: 1) in de ene geul netto gestort wordt en in de andere geul wordt gebaggerd waarbij het baggeren de ontwikkeling van de aangrenzende geuldelen beïnvloedt (erosie veroorzaakt, het zogenaamde *globaal* baggeren), en 2) Het verschil tussen het theoretische 10%-stortcriterium $SC_{10\%}$ en de netto baggeromvang $V_{,1,\ globaal}$ *groter* is dan het 5%-stortcriterium $SC_{5\%}$:

   $$SC_{10\%} - |V_{1,\ globaal}| > SC_{5\%}$$

3. Het 5%-stortcriterium is van toepassing als: 1) In de ene geul netto gestort wordt en het baggeren in de andere geul een *globaal* effect heeft, en 2) Het verschil tussen het theoretische 10%-stortcriterium $SC_{10\%}$ en de netto baggeromvang $V_{1,\ globaal}$ *kleiner* is dan het 5%-stortcriterium $SC_{5\%}$:

   $$SC_{10\%} - |V_{1,\ globaal}| < SC_{5\%}$$

4.3 Nieuwe criteria voor de stortcapaciteit

4.3.1 Aanpak en overwegingen

Voor het definiëren van aanvullende criteria voor de stortcapaciteit van een macrocel onder invloed van 'autonome' ontwikkelingen worden de volgende aannames gemaakt:

1. Wanneer een geul in een macrocel erodeert is dat qua invloed op de stabiliteit van het geulsysteem vergelijkbaar met het baggeren in een geul,
2. Sedimentatie in een geul is vergelijkbaar met het storten van sediment, en
3. De invloed van de daarmee samenhangende sedimentuitwisseling tussen de macrocellen op de stortcapaciteit wordt impliciet meegenomen, wanneer de criteria voor de stortcapaciteit expliciet rekening houden met situaties waarin één of beide geulen eroderen en /of sedimenteren. Immers, de zandbalans van een macrocel wordt praktisch bepaald door de erosie- en sedimentatie tendensen in de eb- en vloedgeul bij elkaar op te tellen. Dit betekent dat het opstellen van zandbalansen, niet strikt noodzakelijk is voor het formuleren van aanvullende criteria voor de stortcapaciteit en het evalueren van het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning (zie ook Hfdst 2).

Voor het opstellen van richtlijnen voor de stortcapaciteit van een cel waarbij in één of beide geulen erosie en/of sedimentatie optreedt, moeten twee vragen worden beantwoord:

1. Welk tijdsinterval moet worden beschouwd bij het beoordelen of een geul erodeert, sedimenteert of morfologisch stabiel is? Kan hierbij worden uitgegaan van jaarwaarden of is het wenselijk dan wel noodzakelijk om een gemiddelde waarde over een bepaalde periode te beschouwen?
2. Welke parameter moet worden beschouwd om te beoordelen of een geul erodeert, sedimenteert of stabiel is? Is dit ΔV_{tot}, de verandering die je meet in de dieptekaarten inclusief het effect van ingrepen. Of is dit het zogenaamde natuurlijke effect ΔV_{nat}, de waarschijnlijke verandering als er geen ingreep zou zijn geweest. Of moeten beide parameters worden meegenomen in de analyse, en zo ja hoe?

Voor het beantwoorden van de eerste vraag kijken we naar de beschikbare gegevens en de theoretische tijdschaal waarop het kantelen van het geulsysteem in de Westerschelde zichtbaar wordt (zie bijlage A): de cumulatieve tijdreeksen van ΔV_{tot} en ΔV_{nat} tonen naast de trends over meerdere jaren (zie hoofdstuk 3), kleine fluctuaties van jaar tot jaar waarbij de grootte en soms ook het teken van de parameters verandert. De oorsprong van deze fluctuaties is niet eenduidig vast te stellen; kleinschalige morfologische veranderingen, de nauwkeurigheid van de basisgegevens en de analyse methodiek kunnen hierin een rol spelen. Om er zeker van te zijn dat ze worden uit gemiddeld is het wenselijk om uit te gaan van gemiddelde erosie- en sedimentatiesnelheden voor karakteristieke perioden van vijf tot tien jaar. Dit komt ook overeen met de theoretische tijdschaal waarop het kantelen van het geulsysteem zichtbaar wordt. Voor de meeste macrocellen in de Westerschelde varieert deze tijdschaal tussen de vier en tien jaar (zie bijlage A, intermezzo tijdschalen).

Met betrekking tot de keuze van de te beschouwen parameter (vraag 2) is een aantal overwegingen van belang:

1. De mate waarin de ontwikkeling van een geul bepaald wordt door ingrepen komt tot uitdrukking in de parameters ΔV_{tot} en ΔV_{nat} (zie ook Hoofdstuk 2): er is min of meer sprake van een natuurlijke ontwikkeling wanneer V_{tot} en V_{nat} hetzelfde teken hebben. De ingrepen zijn bepalend in de ontwikkeling wanneer beide parameters duidelijk tegengesteld van teken zijn. Of V_{nat} het werkelijke natuurlijke effect is zullen we nooit weten. Waarschijnlijk is het berekende natuurlijke effect een soort bovengrens; de maximale verandering die geul zou ondergaan wanneer er niet werd ingegrepen. Zo zal in een eroderende geul waar gestort wordt de berekende natuurlijke erosie ΔV_{nat} waarschijnlijk wat groter zijn dan wanneer er netto niet wordt ingegrepen/gestort. Deze veronderstelling kan worden onderbouwd met enkele berekeningen met een gevalideerd morfologisch model.

2. Of een geul nu erodeert (sedimenteert) als gevolg van baggeren (storten) of natuurlijke processen, de invloed op de waterbeweging is hetzelfde; de waterbeweging 'voelt' de gemeten bodem inclusief de uitgevoerde ingrepen (ΔV_{tot}). Dit betekent dat voor het bepalen van het toe te passen stortcriterium *in eerste instantie* ΔV_{tot} moet worden beschouwd. Bovendien heeft de oorzaak van de geulontwikkeling, een natuurlijk proces, ingrepen of een combinatie van beide, geen invloed op het toe te passen stortcriterium en de relatieve grootte daarvan (het stortcriterium wordt uitgedrukt als een percentage van de transportcapaciteit).

   Wel is het zo dat de oorzaak van de geulontwikkeling invloed heeft op de *absolute* grootte van de transportcapaciteit en daarmee de absolute grootte van de stortcapaciteit. In een geul die van nature erodeert (ΔV_{tot} en V_{nat} hebben hetzelfde teken) zal de stroomsnelheid, en dus de transport- en stortcapaciteit, groter zijn dan in een geul die evenveel erodeert als gevolg van baggeren (ΔV_{tot} en ΔV_{nat} hebben een tegengesteld teken). Door, naast ΔV_{tot} , ook ΔV_{nat} te beschouwen kan een kwalitatief beeld worden verkregen of de absolute grootte van de stortcapaciteit aan de hoge of lage kant is. Hoeveel dat is, kan op basis van de beschikbare gegevens niet worden gezegd.

Zoals aangegeven vormen ΔV_{tot} en ΔV_{nat} een soort onder- en bovengrens van wat er morfologisch *waarschijnlijk* zou gebeuren als er niet wordt ingegrepen in het geulsysteem (hoewel ook dat niet helemaal zeker is). In die zin kunnen de parameters V_{tot} en V_{nat} worden gebruikt om de bandbreedte van de stortcapaciteit te bepalen. Het gebruik van de gemiddelde waarde van ΔV_{tot} en ΔV_{nat} , $\Delta V_{gemiddeld}$, kan dan worden gebruikt voor het berekenen van de, *als eerste richtlijn*, te hanteren (absolute) grootte voor de stortcapaciteit. In situaties waarin ingrepen bepalend zijn voor de erosie of sedimentatie van de geul zal deze methode resulteren in een stortcapaciteit met een grote bandbreedte.

Voor het opstellen van criteria voor de stortcapaciteit in geulsysteem dat morfologisch verandert, gelden dus de volgende randvoorwaarden:

- De nieuw te definiëren criteria moeten expliciet rekening houden met de erosie en sedimentatie van de individuele geulen. Door dit proces in het stortcriterium te verdisconteren wordt de sedimentuitwisseling tussen de macrocellen impliciet meegenomen.
- Voor het bepalen van erosie en sedimentatiesnelheden is het wenselijk om gemiddelde waarden over karakteristieke perioden van circa 5 tot 10 jaar te beschouwen.

- De bepaling van de ontwikkelingstendens van de geulen (erosie, sedimentatie of stabiel) kan in eerste instantie worden gebaseerd op de parameter ΔV_{tot}. Het beschouwen van ΔV_{nat} in relatie tot ΔV_{tot} is noodzakelijk om te kunnen beoordelen of de berekende *absolute* transport- en stortcapaciteit aan de hoge of lage kant is.

4.3.2 Nieuwe criteria voor de stortcapaciteit

Voor de morfologische ontwikkeling van de geulen in een macrocel, uitgedrukt in een erosie of sedimentatiesnelheid ΔV_{tot}, geldt dat zich drie verschillende situaties kunnen voordoen:
1. de geul erodeert ($\Delta V_{tot} < 0$),
2. de geul sedimenteert ($\Delta V_{tot} > 0$), of
3. de geul is stabiel ($\Delta V_{tot} = 0$).

Dit betekent dat in totaal negen morfologische situaties mogelijk zijn waarvoor criteria voor de stortcapaciteit moeten worden gedefinieerd. Figuur 4.1 toont deze situaties in de vorm van een stroomschema. Bovenaan in dit schema wordt gestart met de ontwikkeling van de geul die als hoofdvaarwater naar de haven van Antwerpen dient, aangeduid als geul 1[7]. Vervolgens worden de mogelijke ontwikkelingen van de tweede geul die als nevenvaarwater dient, geul 2, in kaart gebracht. Bij het vaststellen of een geul erodeert, sedimenteert of stabiel is, wordt gekeken naar het teken van ΔV_{tot} voor de gehele geul.

Figuur 4.1. Stroomschema met mogelijk morfologische situaties in een macrocel. Geul 1 is de geul die als hoofdvaarwater (hoofdgeul) wordt gebruikt, dit is meestal de ebgeul (uitgezonderd in cel 4). Geul 2 is de geul die als nevenvaarwater (nevengeul) wordt gebruikt. Dit is meestal de vloedgeul. Als eerste leidraad voor het vaststellen van de morfologische ontwikkeling van een geul wordt gekeken naar het teken van V_{tot} van de gehele geul.

De oorspronkelijke stortcriteria, zoals samengevat in paragraaf 4.1, hebben betrekking op de morfologische situaties 3, globaal baggeren in de vaargeul, en 9, geen ingrijpen of lokaal baggeren in de vaargeul, in Figuur 4.1. In beide situaties is er sprake van een morfologisch niet veranderend geulsysteem. Uit een inventarisatie van de gegevens over de perioden

[7] *In de meeste macrocellen is geul1, een ebgeul. Geul 2 is meestal een vloedgeul waar vaak netto gestort wordt. Alleen in macrocel 4, nabij Hansweert, wordt de vaargeul gevormd door de vloedgeul (Gat van Ossenisse/Overloop van Hansweert), geul 1. De ebgeul Middelgat is hier de nevengeul, geul 2.*

1990-1997 en 1997-2002 (tabellen 4.1 en 4.2) blijkt echter dat in de praktijk de situaties 1, 2, 3 en 7 in Figuur 4.1 veel vaker voorkomen. Bekijken we de ontwikkelingen sinds 1955 (tabellen in Hoofdstuk 3) dan blijkt ook situatie 4 langere tijd te hebben bestaan in de macrocellen 1, 3 en 4. Dus tot op heden gaat het in de praktijk vooral om vijf van de negen mogelijke morfologische situaties.

Tabel 4.1 Kwalitatieve karakterisering van de morfologische ontwikkeling van de geulen in de macrocellen gedurende de periode *1990-1997*. E=erosie, S=sedimentatie, -=stabiel. Voor de betekenis van de morfologische situatie zie Figuur 4.1. De geul die in de macrocel als hoofdvaarwater fungeert, geul 1, wordt beschreven met vette, cursieve karakters. De andere geul is geul 2 en dient voor de scheepvaart als nevenvaarwater. ΔV_{tot}= totale erosie of sedimentatie; de verandering die je meet in de dieptekaarten inclusief het effect van ingrepen. ΔV_{nat}= zogenaamde natuurlijke effect, ΔV_{tot} min het effect van ingrepen.

Cel	VG ΔV_{tot}	ΔV_{nat}	EG ΔV_{tot}	ΔV_{nat}	morfologische situatie
1	E	E	***E***	-	1
3	E	E	***E***	***S***	1
4	***E***	***E***	S	-	3
5	E	E	***E***	***S***	1
6	E	E	***E***	***S***	1
7	-	-	***E***	***S***	7

Tabel 4.2 Kwalitiatieve karakterisering van de morfologische ontwikkeling van de geulen in de macrocellen gedurende de periode *1997-2002*. Voor toelichting zie tabel 4.1.

Cel	VG ΔV_{tot}	ΔV_{nat}	EG ΔV_{tot}	ΔV_{nat}	morfologische situatie
1	S	E	***E***	***E***	2
3	S	E	***E***	***S***	2
4	***E***	***E***	S	S	2
5	E	E	***E***	***S***	1
6	E	E	***E***	***S***	1
7	-	-	***E***	***S***	3

Voor iedere morfologische situatie kunnen in theorie twee verschillende stortstragiëen worden gehanteerd:

1. In één van de twee geulen van de macrocel wordt netto gestort. In de praktijk is dit meestal geul 2 (nevenvaarwater). Dit kan echter ook geul 1 (hoofdvaarwater) zijn.
2. In beide geulen van de macrocel wordt netto gestort.

De bestaande stortcriteria voor een morfologisch niet veranderend geulsysteem (situaties 3 en 9 in Figuur 4.1) gaan ook uit van deze twee strategieën (paragraaf 4.1). Daarnaast wordt in de bestaande criteria rekening gehouden met het kantelen van het geulsysteem waarbij de verhouding van de gemiddelde diepte van de twee geulen in de macrocel verandert door het globaal baggeren (criteria 2 en 3). Omdat het voor de stabiliteit van het geulsysteem niet uitmaakt of een geul erodeert als gevolg van baggeren of door natuurlijke processen, kan in de criteria 2 en 3 de term voor het globaal baggeren, $V_{l,\ globaal}$, worden vervangen door een erosiesnelheid van de geul (bijvoorbeeld ΔV_{tot} of ΔV_{nat}). Vervolgens moeten de volgende twee aspecten in de bestaande criteria worden opgenomen:

- De morfologische ontwikkeling van de geul waar gestort wordt moet expliciet worden meegenomen;
- In het geval van stortstrategie 2 (in beide geulen storten) moet duidelijk zijn hoe de storthoeveelheden over de twee geulen moeten worden verdeeld wanneer één of beide geulen eroderen en/of sedimenteren.

Dit betekent dat de stortcriteria per geul, SC_{geul}, er als volgt uit zouden kunnen zien:

$$SC_{geul\ 2} = SC_{10\%} - \Delta V_{geul\ 2} + \Delta V_{geul\ 1}$$

$$SC_{geul\ 1} = SC_{10\%} - \Delta V_{geul\ 1} + \Delta V_{geul\ 2}$$

Waarbij het $SC_{10\%}$ het 10%-stortcriterium is zoals dat van toepassing is op een morfologisch niet veranderend geulsysteem (waarin eventueel lokaal gebaggerd wordt, zie paragraaf 4.1) en ΔV_{geul} positief is in geval van sedimentatie en negatief in geval van erosie. Wanneer er in beide geulen gestort kan worden, d.w.z. SC_{geul1} en SC_{geul2} zijn beiden positief, dan kunnen de waarden van de stortcritria SC_{geul1} en SC_{geul2} bij elkaar worden opgeteld. Wanneer één van beide criteria een negatieve waarde heeft kan in de betreffende geul niet *netto* worden gestort en resteert voor die macrocel alleen stortstrategie 1. In dit geval kan de uiteindelijke stortcapaciteit groter worden dan het 10%-criterium afhankelijk van de erosie en sedimentatiesnelheden in de geulen.

4.3.3 Conclusies

Op basis van bovenstaande overwegingen worden nu de volgende criteria voor de stortcapaciteit en richtlijnen voor het gebruik van deze criteria voorgesteld:

1. Voor een systeem dat morfologisch niet verandert (situatie 9 in Fig. 4.1) gelden de volgende stortcriteria:

   a. 10%-criterium: 10% van de bruto transportcapaciteit kan in één van beide geulen (stortstrategie 1).
   b. 20%-criterium: in beide geulen wordt maximaal 10% van de brutotransport capaciteit gestort.

2. Voor een systeem waarin één of beide geulen eroderen en/of sedimenteren als gevolg van natuurlijke processen en/of ingrepen gelden de volgende stortcriteria:

   a. In het geval dat in één van beide geulen netto wordt gestort is het stortcriterium (stortstrategie 1)

   $$SC_{geul\ 2} = SC_{10\%} - \Delta V_{gemiddeld,\ geul\ 2} + \Delta V_{gemiddeld,\ geul\ 1} \quad \text{voor geul 2, en}$$

   $$SC_{geul\ 1} = SC_{10\%} - \Delta V_{gemiddeld,\ geul\ 1} + \Delta V_{gemiddeld,\ geul\ 2} \quad \text{voor geul 1.}$$

   Om de bandbreedte om de stortcapaciteit te kunnen bepalen moeten SC_{geul1} en SC_{geul2} ook worden uitgerekend met de parameters ΔV_{tot} en ΔV_{nat}.

b. In het geval dat in beide geulen netto wordt gestort geldt als stortcriterium (strategie 2):

$$SC_{geul\ 1\ +\ geul\ 2} = SC_{geul1} + SC_{geul2} \qquad \text{waarbij } SC_{geul1} > 0 \text{ en } SC_{geul2} > 0$$

Als voor één van beide geulen het stortcriterium een negatieve waarde heeft kan er in de betreffende geul niet netto worden gestort.

Toepassing van stortcriterium 2a en 2b voor een morfologisch niet veranderend geulsysteem, $\Delta V_{gemiddeld,\ geul\ 2}=0$ en $\Delta V_{gemiddeld,\ geul\ 1}=0$, resulteert in stortcriterium 1.

De stortcriteria voor morfologisch veranderende geulen verschillen met de criteria zoals gedefinieerd en toegepast in de memo van Wang en Jeuken (2002). Een tekortkoming in het criterium zoals gehanteerd door Wang en Jeuken (2002) is het negeren van de ontwikkeling van de geul waar niet gestort wordt; het kantelen van het geulsysteem wordt niet integraal beschouwd maar alleen voor de geul waar gestort wordt. Daarnaast wordt er geen gebruik gemaakt van $V_{gemiddeld}$, maar van V_{nat} .

Gelet op de recente ontwikkelingen in macrocel 4 is het niet verantwoord om het 5%-criterium te handhaven. Immers, volgens dit criterium kan er altijd wel 5% van de bruto transport capaciteit in een geul worden gestort, ongeacht de ontwikkeling van die geul. Zoals uit de evaluatie van het beleid zal blijken had er in de ebgeul van cel 4 niet mogen worden gestort.

4.4 Een vergelijking van de stortcriteria met waarnemingen

4.4.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de nieuwe criteria voor de stortcapaciteit, zoals uitgewerkt in de vorige paragraaf, vergeleken met de waargenomen kritieke grenzen, onder- en overschrijdingen in de stortcapaciteit (zie hoofdstuk 3, tabel 3.11). Deze vergelijking heeft tot doel de geldigheid van de nieuwe stortcriteria, voor zover mogelijk, te verifiëren.

4.4.2 Resultaten

Een vergelijking van de theoretische en waargenomen stortcapaciteiten is opgenomen in de tabellen 4.3 en 4.4. Voor het evalueren van de geldigheid van het stortcriterium zijn niet alleen waargenomen kritische storthoeveelheden relevant. Ook waargenomen onder- en overschrijdingen van de stortcapaciteit zijn bruikbaar voor deze evaluatie. Immers, een werkbaar criterium geeft ook aan dat waargenomen stortingen qua invloed te groot of te klein zijn geweest in de ontwikkeling van een geul. Daarom worden, naast de kritieke grenzen in de stortcapaciteit (tabel 4.3), in tabel 4.4 ook de theoretische stortcapaciteiten vergeleken met waargenomen onder- en overschrijdingen. In het geval van een onderschrijding moet het theoretisch criterium een grotere stortcapaciteit aangeven dan de

waarneming. In het geval van een overschrijding moet het theoretisch stortcriterium juist kleiner zijn dan de waargenomen storting.

Alvorens in te gaan op de resultaten van de vergelijking zal eerst de opzet van de tabellen 4.3 en 4.4 worden toegelicht aan de hand van een voorbeeld. Beschouwen we cel 3 in tabel 4.3 dan geldt hiervoor het volgende:

- In de eerste rij worden de *waargenomen* kritische stortcapaciteit en de relevante morfologische waarnemingen gekwantificeerd. Uit de waarnemingen over de periode 1999-2002 is een kritische grens voor stortcapaciteit in geul G2 (de vloedgeul, die als nevenvaarwater fungeert) naar voren gekomen. De kritische storthoeveelheid is 2,2Mm^3/jr. De waargenomen gemiddelde erosie- en sedimentatiesnelheden in de geulen G1 en G2 gedurende de periode 1999-2002 (in Mm^3/jr) worden gekwantificeerd met de parameters ΔV_{tot}, ΔV_{nat} en $\Delta V_{gemiddeld}$ (het gemiddelde van ΔV_{tot}, ΔV_{nat}). Een positief getal duidt op sedimentatie. Een negatief getal betekent erosie van de geul. Als de parameters ΔV_{tot}, en ΔV_{nat} een tegengesteld teken hebben zijn ingrepen sturend in de ontwikkeling geweest. Als een van beide parameters nul is in een geul waar netto gestort wordt, betekent dat een kritische grens voor de stortcapaciteit.
- In de twee rij wordt het 10% stortcriterium, aangeduid als SC10%, vermeld. Deze waarden zijn in het kader van de studie voor de Lange Termijn Visie uitgerekend met een Delft3D-model van het Schelde estuarium (met bodems uit 1996 en 1999) en vervolgens door Jeuken (2001) nader geanalyseerd (Winterwerp e.a. 2000, zie ook bijlage A).
- In derde rij volgt de absolute waarde van het theoretisch stortcriterium voor de geul (G1 of G2) waarin gestort wordt. Hiervoor is de gemiddelde waarde voor SC10% gebruikt. In de praktijk gaat het om de waarde van het nieuwe stortcriterium 2a (§4.2.3). Hierbij wordt, conform de richtlijnen uit paragraaf 4.2.3, een gemiddelde waarde (op basis van Vgem) en een boven- en ondergrens, op basis van ΔV_{nat} en ΔV_{tot} aangegeven. Als het theoretisch stortcriterium negatief is betekent dat er in de betreffende geul niet had mogen worden gestort (zie bijvoorbeeld 'overschrijding cel 4').
- Tot slot wordt in de vierde en laatste rij de geldigheid van het theoretisch stortcriterium gekwalificeerd. Een 'B' (bevestiging) betekent dat het theorisch criterium de waarnemingen bevestigen. In het geval van een kritische grens geeft het theoretisch criterium een range waarbinnen de waarneming valt; in het geval van de onder- en overschrijdingen in tabel 4.4 valt de waarneming juist buiten *ten minste* twee waarden van het theoretische stortcriterium. Een 'ΔV' (verwerpen) betekent dat theoretische waarde (inclusief bandbreedte) groter of kleiner is. Een '?' wordt gebruikt om aan te geven dat er, om verschillende redenen, geen uitsluitsel te geven.

Uit de vergelijking van het theoretisch criterium met de waarnemingen blijkt dat het theoretisch stortcriterium de waarnemingen redelijkerwijs bevestigt. Echter, de bandbreedte om de theoretische waarde is groot, zoals verwacht (zie §4.2.3).

De geldigheid van theoretisch criterium is relatief onduidelijk wanneer het gaat om het vaststellen van de kritische stortcapaciteit. Alleen voor de recente ontwikkelingen in cel 3 geeft het criterium een bevestiging met een vrij ruime marge (1,8-3,8Mm^3/jr op basis van ΔV_{tot} en ΔV_{gem}). Voor cel 4 geeft het stortcriterium een veel te grote stortcapaciteit. Voor de

cellen 5, 6 en 7 benadert slechts één van de drie theoretische waarde (gebaseerd op ΔV_{tot}) de waarneming.

Voor de situaties waarin de stortcapaciteit volgens de waarnemingen is overschreden geeft ook het stortcriterium ten minste twee waarden (op basis van ΔV_{tot} en ΔV_{gem}) die kleiner zijn dan de in de praktijk uitgevoerde stortingen waarbij de stortcapaciteit is overschreden.

Voor situaties waarbij volgens de waarnemingen onder de maximale stortcapaciteit is gestort is de theoretische stortcapaciteit, inclusief ondergrens, groter dan de gestorte hoeveelheid sediment.

Tabel 4.3 Vergelijking van theoretisch stortcriterium met waarnemingen waarbij het storten in een geul kritisch is geweest in de ontwikkeling van die geul. G1=geul 1, G2=geul 2, EG=ebgeul, VG=vloedgeul. Storthoeveelheden en ontwikkelingen in Mm^3/jr. Erosie van een geul = negatief getal, sedimentatie = positief getal. SC10%= absolute waarde van het 10%-stortcriterium (zie Jeuken, 2001). Evaluatie van het criterium: B= bevestigen, ?=onduidelijk, V=verwerpen.

Kritische waarden stortcapaciteit	*Cel 1 Vlissingen*	*Cel 3 Terneuzen*	*Cel 4 Hansweert*	*Cel 5 Valkenisse*	*Cel 6 Bath*	*Cel 7 Grens*
Waarnemingen						
Waar, G1 of G2?		G2	G1	G2		G2
Storthoeveelheid		**2,2**	**1,5**	**0,9**		**0,2**
Periode		'99 – '02	'78 – '90	'55 -'70		'78 –'89[a]
Ontwikkeling G1		=EG	=VG	=EG		=EG
ΔV_{tot} (Mm^3/jr)		-0,1	0	0,4		-0,2
ΔV_{nat}		1,6	-1,5	0,4		1,3
ΔV_{gem}		0,75	-0,75	0,4		0,55
Ontwikkeling G2		=VG	=EG	=VG		=VG
ΔV_{tot} (Mm^3/jr)		0	1,8	0,9		0
ΔV_{nat}		-2,2	1,5	0		-0,2
ΔV_{gem}		-1,1	1,65	0,45		-0,1
Berekend SC10%		1,9±0,2	1,85±0,15	1,75±0,25		0,4±0.05
Stortcriterium		G2	G1	G2		G2
Waarde:						
$\Delta V_{gemiddeld}$		**3,8**	**4,3**	**1,7**		**1,1**
ΔV_{tot}		**1,8**	**3,7**	**1,3**		**0,3**
ΔV_{nat}		**5,7**	**4,9**	**2,2**		**2,0**
Evaluatie criterium		**B**	**V**	**?**		**?**

[a]De toepasbaarheid van het cellenconcept voor deze cel in de periode na 1970 is twijfelachtig door de aanleg van een leidam tussen eb en vloedgeul in 1970/1971.

Tabel 4.4 Vergelijking van theoretisch stortcriterium met waarnemingen waarbij de stortcapaciteit wordt overschreden en waarbij er beneden de kritieke stortcapaciteit is gestort. Voor toelichting zie tekst en tabel 4.3.

Overschrijding stortcapaciteit	*Cel 1 Vlissingen*	*Cel 3 Terneuzen*	*Cel 4 Hansweert*	*Cel 5 Valkenisse*	*Cel 6 Bath*	*Cel 7 Grens*
Waarnemingen						
Waar, G1 of G2?	G2	G2	G2	G2		
Storthoeveelheid	**1,6**	**3,2**	**2,1**	**1**		
Periode	'97-'02	'97-'02	'97-'02	'78-'90		
Ontwikkeling G1	=EG	=EG	=VG	=EG		
ΔV_{tot} (Mm^3/jr)	-0,8	-0,9	-3,7	-1,4		
ΔV_{nat}	-0,9	1	-3,9	-0,8		
ΔV_{gem}	-0,85	0,05	-3,8	-1,1		
Ontwikkeling G2	=VG	=VG	=EG	=VG		
ΔV_{tot} (Mm^3/jr)	1,2	0,8	3,1	0,6		
ΔV_{nat}	-0,4	-2,4	1	-0,4		
ΔV_{gem}	0,4	-0,8	2,05	0,1		
Berekend SC10%	1,4±0,1	1,9±0,2	1,85±0,15	1,75±0,25		
Stortcriterium	G2	G2	G2	G2		
Waarde:						
$\Delta V_{gemiddeld}$	**0,2**	**2,8**	**-4,0**	**0,6**		
ΔV_{tot}	**-0,6**	**0,2**	**-5,0**	**-0,3**		
ΔV_{nat}	**0,9**	**5,3**	**-3,1**	**1,4**		
Evaluatie criterium	**B**	**B**	**B**	**B**		
Beneden kritische stortcapaciteit	*Cel 1 Vlissingen*	*Cel 3 Terneuzen*	*Cel 4 Hansweert*	*Cel 5 Valkenisse*	*Cel 6 Bath*	*Cel 7 Grens*
Waarnemingen						
Waar, G1 of G2?	G2	G2	G1	G2		G2
Storthoeveelheid	**0,4**	**0,8**	**2,1**	**0,3**		**0,5**
Periode	'76-'97	'76-97	'90-'97	'90-'97		'55-'70
Ontwikkeling G1	=EG	=EG	=VG	=EG		=EG
ΔV_{tot} (Mm^3/jr)	0,4	-0,8	-1,3	-0,3		-0,2
ΔV_{nat}	0,6	0,5	-3,4	1,1		1,1
ΔV_{gem}	0,5	-0,15	-2,35	0,4		0,45
Ontwikkeling G2	=VG	=VG	=EG	=VG		=VG
ΔV_{tot} (Mm^3/jr)	-0,7	-0,6	0,2	0,7		-0,3
ΔV_{nat}	-1	0,8	0	-1		-0,8
ΔV_{gem}	0,85	0,1	0,1	-0,15		-0,55
Berekend SC10%	1,4±0,1	1,9±0,2	1,85±0,15	1,75±0,25		0,4±0,05
Stortcriterium	G2	G2	G1	G2		G2
Waarde:						
$\Delta V_{gemiddelf}$	**2,8**	**1,7**	**4,3**	**2,3**		**1,5**
ΔV_{tot}	**2,5**	**1,7**	**3,4**	**0,8**		**0,6**
ΔV_{nat}	**3,0**	**1,6**	**5,3**	**3,9**		**2,4**
Evaluatie criterium	**B**	**B**	**B**	**B**		**B**

4.4.3 Discussie en conclusies

Uit de vergelijking van het nieuwe theoretische stortcriterium met de waarnemingen blijkt dat het stortcriterium de waargenomen onder- en overschrijdingen bevestigt. Met betrekking tot de kritische stortcapaciteit is de overeenkomst tussen theorie en waarnemingen minder goed vast te stellen. Dit is inherent aan de grote onzekerheidsmarges in de theoretische stortcapaciteit en het karakter van een kritische waarde waarbij geen grote marge past.

Uit de vergelijking blijkt verder dat vooral het gebruik van de parameter ΔV_{nat}, het niet goed bekende natuurlijke effect, tot te hoge theoretische stortcapaciteiten leidt. Dit is geen onverwacht resultaat. Zoals reeds eerder gesteld is dit zogenaamde natuurlijke effect (V_{tot} – *netto ingrepen*, zie hoofdstuk 2) waarschijnlijk een soort bovengrens; een maximaal te verwachten ontwikkeling wanneer er niet zou worden gestort of gebaggerd in een geul. De vergelijking met de waarnemingen geeft aan dat voor het vaststellen van de stortcapaciteit, volstaan kan worden met een stortcapaciteit gebaseerd op ΔV_{tot} en $\Delta V_{gemiddeld}$. ΔV_{tot} geeft een ondergrens van de stortcapaciteit en $\Delta V_{gemiddeld}$ een bovengrens. De onzekerheidsmarge (bandbreedte) van de stortcapaciteit neemt toe naar mate de ingrepen belangrijker (groter) worden in de morfologische ontwikkeling.

Een andere factor die een extra, nog niet te kwantificeren, onzekerheidsmarge in de theoretische stortcapaciteit introduceert, is de absolute waarde van het 10%-stortcriterium (SC10% in de tabellen 4.3 en 4.4). Dit criterium is bepaald voor de morfologische situaties van 1996 en 1999. Het is de vraag in hoeverre de absolute waarden van dit 10%-criterium ook van toepassing zijn op morfologische situaties van bijvoorbeeld 1955-1970. De meeste macrocellen, op cel 4 na, zijn sinds 1955 netto verruimd. Dit zou kunnen betekenen dat de absolute transport- en stortcapaciteit in de loop der tijd is afgenomen (en dat voor oudere situaties dus een grotere absolute waarde voor SC10% moet worden gehanteerd). Uit de beschikbare berekende transportcapaciteiten blijkt bijvoorbeeld dat in cel 5 de transportcapaciteit, en dus de waarde van SC10%, tussen 1996 en 1999 met orde 30% is afgenomen. Een gevoeligheidsanalyse met een gevalideerd morfologisch 2Dh of 3D model kan duidelijkheid verschaffen over de te hanteren marges in SC10%.

Cellenconcept

Wat betekenen deze resultaten voor het toepassen van het Cellenconcept? Het is belangrijk goed te realiseren dat het cellenconcept geen model is waarmee je voorspellingen kunt maken. Het is een waardevol concept/instrumentarium waarmee beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning kan worden geanalyseerd en geëvalueerd. Ook heeft het concept de potentie om te worden ingezet bij het formuleren van nieuw beleid. Hierbij is het echter noodzakelijk om naast de beschikbare historische waarnemingen, die de basis vormen voor de evaluaties, te beschikken over een goed operationeel morfologisch modellen-instrumentarium. Immers, de grote onbekende bij het formuleren van nieuw beleid, of het voortzetten van bestaand beleid, is de toekomstige morfologische ontwikkeling van het geulsysteem. De marges in de toekomstige morfologische

ontwikkeling moeten daarom zo goed als mogelijk bekend zijn. Waarnemingen, resultaten van verschillende typen morfologische modellen (Winterwerp en Kuyper, 2002) en het cellenconcept vormen samen een solide basis voor het formuleren van een nieuw geïntegreerd beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning.

5 Het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning

5.1 Inleiding

Het doel van dit hoofdstuk is tweeledig:

- Het evalueren van het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning zoals dat sinds het begin van de tweede verdieping, in 1997, van kracht is.
- Op basis van de evaluatie adviseren hoe het beleid kan worden aangepast dan wel vernieuwd.

5.2 Evaluatie van het beleid sinds 1997

Op basis van de voorgaande hoofdstukken kan worden nagegaan in hoeverre de stortcapaciteit van het geulsysteem in de cellen sinds 1997 is benut, onderschreden of overschreden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de waarnemingen en de waarden van de nieuwe theoretische stortcriteria.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de gegevens voor de evaluatie van de stortcapaciteit in de macrocellen waar sinds 1997 gestort wordt. De opzet van deze tabel is vergelijkbaar met de tabellen 4.3 en 4.4. De macrocellen 6 en 7 ontbreken in deze tabel omdat er in die cellen netto niet gestort is gedurende de periode 1997-2002.

Uit de tabel komen de volgende punten naar voren:

1) In de macrocellen 1 en 3 is gedurende de periode 1997-2002 alleen in de vloedgeul (G2 in tabel 5.1) netto gestort. In beide cellen is de stortcapaciteit van de vloedgeul overschreden: ΔV_{nat} en ΔV_{tot} hebben een tegengesteld teken; het theoretisch stortcriterium is kleiner dan de werkelijk gestorte hoeveelheid.
2) In cel 4, nabij Hansweert, is in de ebgeul (G2) ver boven de theoretische stortcapaciteit gestort. In de vloedgeul is ruim beneden de stortcapaciteit gestort. Hierbij worden de volgende opmerkingen gemaakt:
   - In de ebgeul hebben ΔV_{nat} en ΔV_{tot} hetzelfde teken. Dit suggereert, ten onrechte, dat er in deze geul sprake is van een 'natuurlijke' sedimentatie: van 1986 tot 1997 was de ebgeul van nature min of meer stabiel waarbij er nauwelijks werd gestort of gebaggerd in de geul. Sinds de verdieping worden aanzienlijke hoeveelheden sediment in de geul gestort die niet worden opgeruimd door de getijstroom. Het lijkt er zelfs op dat stortingen de getijstroom dermate hebben beïnvloed dat de snelheden in de ebgeul zijn afgenomen waardoor een extra sedimentatie is opgetreden. De vloedgeul is, ten opzichte van de periode 1990-1997, versterkt gaan eroderen waarschijnlijk als reactie op de veranderingen in de ebgeul. Deze verschijnselen lijken op een zichzelf versterkend proces, waarbij de

instandhouding van de ebgeul, en dus de macrocel, in het geding kunnen komen.

- Nemen we de waarnemingen over de periode 1990-1997 als basis voor de te hanteren stortcapaciteiten in de periode 1997-2002 dan zou het stortadvies volgens het theoretisch stortcriterium zijn: geen stortingen in de ebgeul en netto 3-4 Mm^3/jr storten in de vloedgeul. Dus de totale hoeveel netto gestort materiaal in de periode 1997-2002 was niet te groot, maar de verdeling over geulen was verkeerd.

3) In cel 5 is vermoedelijk beneden de stortcapaciteit gestort. Hoeveel precies is moeilijk te zeggen doordat de marge in het stortcriterium erg groot is; de invloed van ingrepen (baggeren en zandwinnen) op de ontwikkeling van de ebgeul is drastisch toegenomen sinds de laatste verdieping. In feite beperkt de zandwinning in de ebgeul (langs plaatranden) de stortcapaciteit in de vloedgeul.

4) Volgens het theoretisch stortcriterium is de *netto* stortcapaciteit in de geulen waar gestort is 8.9-12.7Mm^3/jr. De som van de waargenomen netto stortingen is kleiner dan wat er bruto gestort is. Met name in de vloedgeulen van cel 4 en 5 is de bruto storting beduidend groter dan de netto storting, doordat er in dezelfde geul ook gebaggerd wordt (voor vaargeulonderhoud en zandwinning).

Tabel 5.1 Evaluatie van het stortbeleid gedurende de periode 1997-2002. . G1=geul 1, G2=geul 2, EG=ebgeul, VG=vloedgeul. Storthoeveelheden en ontwikkelingen in Mm^3/jr. Erosie van een geul = negatief getal, sedimentatie = positief getal. SC10%= absolute waarde van het 10%-stortcriterium (zie Jeuken, 2001). Een negatieve waarde van de theoretische stortcapaciteit betekent een stortcapaciteit van 0. Evaluatie van het beleid: O= overschrijding van de stortcapaciteit, R=nog ruimte voor storten.

	Cel 1 Vlissingen	*Cel 3 Terneuzen*	*Cel 4 Hansweert*	*Cel4 Hansweert*	*Cel 5 Valkenisse*
Waarnemingen					
Waar, G1 of G2?	G2	G2	G2	G1	G2
Storthoeveelheid	**1,6**	**3,2**	**2,1**	**0,2**	**0,1**
Ontwikkeling G1	=EG	=EG	=VG	=VG	=EG
ΔV_{tot} (Mm^3/jr)	-0,8	-0,9	-3,7	-3,7	-3,0
ΔV_{nat}	-0,9	1	-3,9	-3,9	2,3
$\Delta V_{gemiddeld}$	-0,85	0,05	-3,8	-3,8	-0,35
Ontwikkeling G2	=VG	=VG	=EG	=EG	=VG
ΔV_{tot}	**1,2**	**0,8**	**3,1**	**3,1**	-0,5
ΔV_{nat}	**-0,4**	**-2,4**	**1**	**1**	-0,6
$\Delta V_{gemiddeld}$	0,4	-0,8	2,05	2,05	-0,55
Berekend SC10%	1,4±0.1	1,9±0.2	1,85±0.15	1,85±0.15	1,75±0.25
Stortcriterium	G2	G2	G2	G1	G2
Waarde:					
$\Delta V_{gemiddeld}$	**0,2**	**2,8**	**-4,0**	**7.7**	**2.0**
ΔV_{tot}	**-0,6**	**0,2**	**-5,0**	**8.7**	**-0,8**
Evaluatie beleid	**O**	**O**	**O**	**R**	**R?**

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat in het gebied tussen Vlissingen en Hansweert de stortcapaciteit gedurende de periode 1997-2002 fors is overschreden. Met name in het middendeel, macrocel 4, lijkt dit te leiden tot grote morfologische veranderingen van het

geulsysteem. De kans bestaat dat dit geulsysteem onomkeerbaar aan het kantelen is als gevolg van het storten. In het oostelijk deel is de stortcapaciteit beduidend kleiner, maar wordt daar niet optimaal benut.

5.3 Aanbevelingen voor het beleid en beheer

De resultaten van de evaluatie van het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning geven aan dat er serieuze knelpunten in het beheer bestaan. Met name de overschrijding van de stortcapaciteit en daarop volgende ontwikkelingen in macrocel 4, nabij Hansweert, zijn zorgwekkend.

Op basis van de huidige kennis van het geulsysteem en het Cellenconcept is het niet mogelijk om stortcapaciteiten van het geulsysteem voor de toekomst te geven. Immers, de grote onbekende bij het formuleren van nieuw beleid, of het voortzetten van het bestaand beleid, is de toekomstige morfologische ontwikkeling van het geulsysteem. De marges in de toekomstige morfologische ontwikkeling onder invloed van ingrepen en natuurlijke processen moeten daarom zo goed als mogelijk bekend zijn. Hiervoor moet het bestaande morfologisch model-instrumentarium worden uitgebreid (zie hoofdstuk 6). Wanneer de stortcapaciteiten zoals bepaald voor de periode 1997-2002 worden gebruikt voor de toekomst, bestaat het risico dat het beleid binnen afzienbare tijd weer moet worden bijgesteld. Te meer omdat het geul-systeem zich nog aan het aanpassen is aan een grootschalige ingreep. Verder staat en valt een nieuwe geïntegreerde strategie voor storten en zandwinning met de grootte van het te verwachten baggerbezwaar. Ook voor het voorspellen van dit baggerbezwaar bestaat nog geen gevalideerd morfologisch model.

Op basis van de huidige studie kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

1. Wijzig de stortstrategie van macrocel 4 door het netto storten in de ebgeul Middelgat te verplaatsten naar de vloedgeul Gat van Ossenisse, waar de komende paar jaar waarschijnlijk een *netto* stortcapaciteit van 3-4Mm^3/jr beschikbaar is. Volg de ontwikkelingen van het geulsysteem nauwgezet, ook na wijziging van de stortstrategie.
2. Operationaliseer het benodigde morfologisch model-instrumentarium op korte termijn (zie ook paragaraaf 6.4). Wanneer dit instrumentarium operationeel is kunnen optimale strategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning worden ontwikkeld. Hierbij kan onder andere worden nagegaan:
   - In hoeverre er sprake is van een zichzelf versterkend proces in macrocel 4 (nabij Hansweert), en op welke wijze dit proces nog kan worden beïnvloed.
   - In hoeverre het storten in grote ebgeulen, zoals de Pas van Terneuzen in cel 3, morfologisch mogelijk / haalbaar en zinvol is.
   - In hoeverre en op welke wijze het zinvol is om de geconstateerde ruimte voor storten in het oostelijk deel te benutten.
3. Integreer het beleid voor storten en zandwinning waar mogelijk. Dit betekent het concentreren van de zandwinning nabij stortlocaties en/of het winnen van zand op plaatsen waar anders gebaggerd moet worden voor het vaargeulonderhoud.
4. Ga na of de baggerinspanningen voor het vaargeulonderhoud omlaag kunnen: zijn er plaatsen waar preventief gebaggerd wordt en is dit nodig, bijvoorbeeld langs plaatranden? Is het nodig om in cel 4 een vaargeul te onderhouden die 500 meter breed is, terwijl deze op andere plaatsen in de Westerschelde 300 tot 370 meter breed is?

5. Monitoring van morfologische ontwikkelingen:
   - Volg nauwgezet de ontwikkelingen van de individuele geulen in de macrocellen door middel van kwantitatieve analyses zoals gepresenteerd in voorliggende studie. Ondersteun de analyses met resultaten van hydrodynamische en morfologisch modellen.
   - Speel actief in op de ontwikkelingen van de kortsluitgeulen in macrocel 1 (de zogenaamde mesocellen 1, Bijlage A). Wanneer de nieuwe kortsluitgeul goed tot ontwikkeling is gekomen biedt deze wellicht weer mogelijkheden voor het storten van baggerspecie.
6. Met het oog op het zandwinbeleid verdient het aanbeveling om na te gaan of de waargenomen zandexport sinds 1990 kan zijn veroorzaakt door de wijziging in het zandwinbeleid (zie ook Bijlage E). Berekeningen met het operationele morfologische ESTMORF model kunnen het benodigde inzicht geven.
7. Omdat de stortcapaciteit van het geulsysteem in de tijd varieert is een flexibel vergunningenstelsel wenselijk. De flexibiliteit zou tot uitdrukking moeten komen in:
   - de mogelijkheid om de maximale storthoeveelheid per locatie te kunnen wijzigen gedurende de periode waarvoor de vergunning is afgegeven;
   - het aanwijzen van stortlocaties, die in geval van knelpunten in de stortcapaciteit van de reguliere locaties, gecontroleerd worden gebruikt.

   Als een dergelijke flexibiliteit niet haalbaar is, verdient het, vanuit morfologisch oogpunt, aanbeveling om de looptijd van de vergunning te verkorten tot 3 jaar.

6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

6.1 Inleiding

In deze studie is gekeken naar de morfologische ontwikkeling van het plaat-geul systeem in de Westerschelde onder invloed van natuurlijke processen en ingrepen door de mens (baggeren, storten en zandwinning). Hierbij is gebruik gemaakt van het Cellenconcept voor de Westerschelde. Met behulp van de resultaten zijn de theoretische stortcriteria die zijn opgesteld m.b.v. het Cellenconcept geëvalueerd en aangepast volgens de nieuwste inzichten. Vervolgens is gekeken of deze criteria zijn overschreden of dat de beschikbare stortcapaciteit niet geheel is benut. Aan de hand van de resultaten zijn adviezen en aanbevelingen opgesteld voor het verbeteren van het huidige bagger- en stortbeleid in de Westerschelde.

6.2 Samenvatting

6.2.1 Gegevens analyse, maximale stortcapaciteit

In het Cellenconcept voor de Westerschelde wordt het gebied opgedeeld in 6 zogenaamde macrocellen. Iedere cel bestaat uit een eb- en een vloedgeul met daartussen in een plaat. Per cel is bepaald wat de verandering van het totale (zand) volume is op basis van dieptekaarten. Dit is de waargenomen volumeverandering. Daarnaast is vastgesteld hoeveel zand er is gestort of gebaggerd. Het verschil tussen waargenomen volumeverandering en de netto hoeveelheid gebaggerd of gestort materiaal wordt de *natuurlijke* volumeverandering genoemd.

Uit het verloop in de tijd van de netto verandering in het totale en het natuurlijke volumes kan worden vastgesteld hoe groot de invloed van ingrepen is geweest op de ontwikkeling van het systeem. Om de invloed van de ingrepen op het systeem te kunnen karakteriseren worden vier klassen onderscheiden:

1. **Geen invloed**: De waargenomen en 'natuurlijke' erosie / sedimentatie zijn even groot en hebben hetzelfde teken.
2. **Invloed**: De waargenomen en ' natuurlijke' ontwikkeling hebben hetzelfde teken maar zijn niet even groot.
3. **Kritische invloed**: De waargenomen en 'natuurlijke' ontwikkeling zijn net niet tegengesteld aan elkaar.
4. **Sturend**: De waargenomen en 'natuurlijke' erosie / sedimentatie hebben een tegengesteld teken.

Aan de hand van situaties waarin er sprake is van een kritische invloed kan de kritische- of maximale stortcapaciteit worden bepaald voor een geul en cel.

6.2.2 Nieuwe (theoretische) stortcriteria

Bij de onderbouwing van het Cellenconcept is naar voren gekomen dat de autonome ontwikkeling van een cel, oftwel netto sedimentatie of erosie, invloed heeft op de stortcapaciteit van de geulen. Dit betekent dat de bestaande stortcriteria moeten worden aangepast, omdat bij het afleiden van deze criteria de cellen de cellen als morfologisch constante eenheden zijn beschouwd.

Voor het bepalen van het autonome gedrag is het belangrijk vast te stellen op welke tijdschaal er moet worden gekeken. Uit de beschikbare gegevens en de theoretische tijdschalen waarop het kantelen van het geulsysteem in de Westerschelde zichtbaar wordt, volgt dat een periode van 5 tot 10 jaar wenselijk is.

Een geul kan sedimenteren, eroderen of stabiel blijven wat betekent dat er in een cel zich 9 verschillende morfologische situaties kunnen voordoen. Met de huidige kennis lijkt het niet nodig om voor alle 9 situaties een apart stortcriterium op te stellen. Er kan worden volstaan met een onderscheid te maken tussen een systeem dat morfologisch niet verandert (situatie 9) en een die dat wel doet. Een morfologisch niet veranderend geulsysteem komt in de praktijk niet voor.

Voor een systeem waarin één of beide geulen eroderen en/of sedimenteren als gevolg van natuurlijke processen en/of ingrepen worden de volgende stortcriteria voorgesteld:

a. Als er in één van beide geulen wordt gestortis het stortcriterium (stortstrategie 1)

   $SC_{geul\ 2} = SC_{10\%} - \Delta V_{geul\ 2} + \Delta V_{geul\ 1}$ voor geul 2, en

   $SC_{geul\ 1} = SC_{10\%} - \Delta V_{geul\ 1} + \Delta V_{geul\ 2}$ voor geul 1.

b. In het geval dat in beide geulen netto wordt gestort geldt als stortcriterium (strategie 2):

   $SC_{geul\ 1\ +\ geul\ 2} = SC_{geul1} + SC_{geul2}$ waarbij $SC_{geul1} > 0$ en $SC_{geul2} > 0$

   Als voor één van beide geulen het stortcriterium een negatieve waarde heeft kan er in de betreffende geul niet netto worden gestort.

De vraag is nu welke parameter moet worden gebruikt in bovenstaande stortcriteria: ΔV_{tot}, ΔV_{nat}, of het gemiddelde van de twee $\Delta V_{gemiddeld}$. In de Tabellen 4.3 en 4.4 worden de nieuwe stortcriteria vergeleken met de gegevens. Hieruit blijkt dat het gebruik van de natuurlijke volume verandering ΔV_{nat} , tot erg hoge stortcriteria leidt. De stortcriteria die zijn berekend op basis van de totale of de gemiddelde volume verandering lijken goed te kloppen met de waarnemingen.

6.2.3 Evaluatie van het beheer en beleid

In Hoofdstuk 5 worden de waargenomen storthoeveelheden vergeleken met de stortcriteria zoals bepaald in de Hoofdstuk 4. Hieruit blijkt dat er tot 1997 in de westelijke cellen van nature sprake is van een neiging tot kantelen welke wordt tegengewerkt door de ingrepen. In de oostelijke cellen is deze natuurlijke neiging er ook en wordt deze verstrekt door de ingrepen. Na 1997 met het nieuwe bagger- en stortbeleid is er in de oostelijk gelegen cellen niet veel veranderd. In de westelijke cellen is sprake van een overschrijding van de stortcapaciteit terwijl er in de oostelijke cellen nog ruimte is. De gevolgen van de overschrijding in het westen lijken beheersbaar. Het middengedeelte bij Hansweert vertoont opnieuw een neiging tot kantelen. De grote vraag is of dit gedrag onomkeerbaar is of niet (zie Tabel 5.1).

In 5.3 wordt een aantal aanbevelingen gedaan om het huidige beleid te verbeteren. Omdat er op dit moment nog geen morfologisch model is voor de Westerschelde is het moeilijk om de morfologische ontwikkeling te voorspellen. Dit maakt dat de kans groot is dat kwantitatieve aanbevelingen over een korte termijn weer moeten worden bijgesteld omdat de morfologische situatie verandert onder invloed van onder andere het baggeren en storten. Daarom hebben alle aanbevelingen een kwalitatief karakter.

Op basis van de huidige studie kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan

1. Wijzig de stortstrategie van macrocel 4 door het netto storten in de ebgeul Middelgat te verplaatsten naar de vloedgeul Gat van Ossenisse, waar de komende paar jaar waarschijnlijk een *netto* stortcapaciteit van 3-4Mm^3/jr beschikbaar is. Volg de ontwikkelingen van het geulsysteem nauwgezet, ook na wijziging van de stortstrategie.
2. Operationaliseer het benodigde morfologisch model-instrumentarium op korte termijn (zie ook paragaraaf 6.4). Wanneer dit instrumentarium operationeel is kunnen optimale strategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning worden ontwikkeld. Hierbij kan onder andere worden nagegaan:
   - In hoeverre er sprake is van een zichzelf versterkend proces in macrocel 4 (nabij Hansweert), en op welke wijze dit proces nog kan worden beïnvloed.
   - In hoeverre het storten in grote ebgeulen, zoals de Pas van Terneuzen in cel 3, morfologisch mogelijk / haalbaar en zinvol is.
   - In hoeverre en op welke wijze het zinvol is om de geconstateerde ruimte voor storten in het oostelijk deel te benutten.
3. Integreer het beleid voor storten en zandwinning waar mogelijk. Dit betekent het concentreren van de zandwinning nabij stortlocaties en/of het winnen van zand op plaatsen waar anders gebaggerd moet worden voor het vaargeulonderhoud.
4. Ga na of de baggerinspanningen voor het vaargeulonderhoud omlaag kunnen: zijn er plaatsen waar preventief gebaggerd wordt en is dit nodig, bijvoorbeeld langs plaatranden? Is het nodig om in cel 5 een vaargeul te onderhouden die 500 meter breed is? Is een vaargeul van 400m of 300m breed niet voldoende, gegeven het feit dat de vaargeul landwaarts van Bath 300 meter breed is?
5. Monitoring van morfologische ontwikkelingen:
   - Volg nauwgezet de ontwikkelingen van de individuele geulen in de macrocellen door middel van kwantitatieve analyses zoals gepresenteerd in voorliggende studie.

Ondersteun de analyses met resultaten van hydrodynamische en morfologisch modellen.
- Speel actief in op de ontwikkelingen van de kortsluitgeulen in macrocel 1 (de zogenaamde mesocellen 1, Bijlage A). Wanneer de nieuwe kortsluitgeul goed tot ontwikkeling is gekomen biedt deze wellicht weer mogelijkheden voor het storten van baggerspecie.

6. Met het oog op het zandwinbeleid verdient het aanbeveling om na te gaan of de waargenomen zandexport sinds 1990 kan zijn veroorzaakt door de wijziging in het zandwinbeleid (zie ook Bijlage E). Berekeningen met het operationele morfologische ESTMORF model kunnen het benodigde inzicht geven.
7. Omdat de stortcapaciteit van het geulsysteem in de tijd varieert is een flexibel vergunningenstelsel wenselijk. De flexibiliteit zou tot uitdrukking moeten komen in:
   - de mogelijkheid om de maximale storthoeveelheid per locatie te kunnen wijzigen gedurende de periode waarvoor de vergunning is afgegeven;
   - het aanwijzen van stortlocaties, die in geval van knelpunten in de stortcapaciteit van de reguliere locaties, gecontroleerd worden gebruikt.

   Als een dergelijke flexibiliteit niet haalbaar is, verdient het, vanuit morfologisch oogpunt, aanbeveling om de looptijd van de vergunning te verkorten tot 3 jaar.

6.3 Conclusies

Uit de studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:
1. De nieuwe stortcriteria komen overeen met de kritische stortvolumes die volgen uit de waargenomen volumeveranderingen. Echter, de bandbreedtes zijn op dit moment nog te groot om de precieze waarde van het stortcriterium te kunnen toetsen.
2. In westelijke cellen wordt de stortcapaciteit overschreden. Deze overschrijdingen lijken beheersbaar met uitzondering van de cel bij Hansweert. Hier kan sprake zijn van een onomkeerbaar proces. Er wordt dan ook dringend geadviseerd om het netto storten in de ebgeul te stoppen en te verplaatsen naar de vloedgeul.

Er kan worden gesteld dat het cellenconcept een waardevol instrument is om het bagger en stort beleid te evalueren. Zonder een morfologisch model van de Westerschelde is het alleen mogelijk om voor een termijn van hooguit 2 tot 3 jaar aan te geven hoe dit beleid er idealiter uit zou moeten zien.

6.4 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gedaan:
- Voor het evalueren van nieuw beleid is een gevalideerd morfologisch model van de Westerschelde noodzakelijk. Om de vragen en problemen met betrekking tot het beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning te kunnen oplossen is een operationeel modelinstrumentarium nodig. Dit instrumentarium zou minimaal moeten bestaan uit:
  - i) het bestaande 1D ESTMORF model, en,
  - ii) een gevalideerd (operationeel) morfologische 2Dh/3D model, en
  - iii) een model voor het voorspellen van het baggerbezwaar op een drempel.

Wang en Jeuken (2002) beschrijven een eerste opzet van een model zoals bedoeld onder iii), gebaseerd op het ESTMORF-principe. Door dit model te combineren met een gevalideerd 1D proces-georieënteerd morfologisch netwerk model kunnen de morfologische gevolgen verschillende bagger- en stortstrategieën worden geëvalueerd, om de gevolgen van het beleid voor de instandhouding van het meergeulensysteem en de intergetijdegebieden te kunnen inschatten. Het model onder punt ii wordt naar verwachting op korte termijn in het kader van RWS-projekt ZEEKENNIS ontwikkeld. Het instrumentarium onder (iii) wordt in het kader van de strategische m.e.r ontwikkeld. Tot slot is het wenselijk om de geïdealiseerde modellen (Schuttelaars en de Swart, 2000) verder te ontwikkelen (meenemen van intergetijdegebieden) en te operationaliseren voor het Schelde-estuarium.

- In de huidige studie zijn een aantal hypothesen genoemd die met een modelinstrumentarium zoals boven genoemd kunnen worden onderbouwd. Dit betreft bijvoorbeeld de samenhang in de ontwikkeling van beide geulen in cel 4 bij Hansweert.

- De absolute waarde van het theoretisch 10%-criterium zoals het nu wordt gebruikt is bepaald m.b.v. een gevalideerd waterbewegingsmodel. De berekende zandtransporten vanuit de waterbeweging zijn niet getoetst aan de hand van de daaruitvolgende morfologische ontwikkelingen. Met een modelinstrumentarium zoals boven genoemd zou de absolute waarde daarom moeten worden geverifieerd.

- Uit deze studie blijkt dat het Cellenconcept op een aantal punten nog verbeterd kan worden. Dit betreft met name de invloed van de autonome ontwikkeling van een geul en de verschillen in de morfologie tussen de ebgeul en de vloedgeul, op de absolute en relatieve grootte van de stortcapaciteit. Daarnaast verdient het aanbeveling om na te gaan of het theoretisch stortcriterium kan worden gerelateerd aan de (bruto) transportcapaciteit door een geul i.p.v. de macrocel als geheel.

- Om de eventuele invloed van de wijziging van het zandwinbeleid op de sediment import/export van de Westerschelde te bekijken zouden model berekeningen met ESTMORF moeten worden uitgevoerd.

7 Referenties

Bray, R.N. A.D. Bates, J.M. Land (1997), Dredging. A handbook for engineers. New York, John Wiley.

Dekker, L. (2002) Getijsimulatie Scalwest bodem 2001 (intern RWS-memo, d.d. 4 september 2002). Rijkswaterstaat, Directie Zeeland.

De Jong, J.E.A. (2000) Zandbalans Westerschelde en monding. Periode 1955-1999. Rijkswaterstaat Directie Zeeland Notitie NWL-00.16.

Jeuken, M.C.J.L. (2000), On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary. Proefschrift Universiteit Utrecht.

Jeuken, M.C.J.L., I. Tanczos, P. Thoolen, M.A.G. van Helvert, M. Rozemeijer, Z.B. Wang (2002). Onderbouwing van het Cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer, WL|Delft Hydraulics, rapport z2838/z3288.

Krijger, G. M. 1993, Het verdronken land van Saeftinghe komt weer boven water. Werkdocument GWWS-93.838x, RWS, DGW

Krijger, G. M. 1993, Het verdronken land van Saeftinghe komt weer boven water. Werkdocument GWWS-93.838x, RWS, DGW

Rijkswaterstaat (1998), Milieuaspectenstudie Baggerspeciestort Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Middelburg.

Rijkswaterstaat (2000), Zand in de Hand. Beleidsplan Zandwining Westerschelde 2001-2011, Nota NWL-00.50, Directie Zeeland.

Rijkswaterstaat Directie Zeeland en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2001) Langetermijnvisie Schelde-estuarium.

Schuttelaars, H.M. en H.E. de Swart (2000) Multiple morphodynamic equilibria of tidal embayments. Journal of Geophysical Research, vol…

Uit den Bogaard, L.A., 1995, Resultaten zandbalans Westerschelde 1955-1993. Universiteit Utrecht Imau-rapport R95-08.

Uit den Bogaard, L.A., 1995, Resultaten zandbalans Westerschelde 1955-1993. Universiteit Utrecht Imau-rapport R95-08.

Van der Male, K. (2001), Analyse van de inhouds- en oppervlakteontwikkleing van geulen, platen en slikken in de Westerschelde tussen 1955-1999. Concept rapport. RIKZ

Van Kerckhoven, J. D.M. (1995), Morphological modelling of ebb and flood channel systems in estuaries. Afstudeerrapport, Faculteit van Civiele Techniek, TU Delft.

Wang Z.B. , P.M.C. Thoolen, R.J. Fokkink (1997), Studie naar de morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde. Ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal, Rapport Z2310, WL|Delft Hydraulics.

Wang Z.B., M. de Vries, R.J. Fokkink, A. Langerak (1995), Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models. Journal of Hydraulic research, Vol 33, No 6.

Wang, Z.B. (2002). A validation and improvement of the cell-concept: the influence of a flood-ebb circulation on the dumping capacity. WL|Delft Hydraulics, concept-rapport Z3288

Wang, Z.B. en M.C.J.L. Jeuken, 2002. Baggerbezwaar vanwege vaargeulonderhoud en actualisering van de stortcapaciteit in de Westerschelde op basis van het onderbouwde Cellenconcept. Memo WL|Delft Hydraulics, november 2002.

Wang, Z.B. en Th. van der Kaaij (1994), Morphodynamic development of secondary channel systems along Rhine branches in The Netherlands, Rapport Q1963, WL|Delft Hydraulics.

Wang, Z.B., P.T. Thoolen, I. Tanczos, 2002 Onderbouwing van het Cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer. Toetsing van aanames met SOBEK berekeningen. WL | Delft Hydraulics rapport Z3325, cofinanciering doelsubsiside Z3288 door RIKZM.

Wang, Z.B., P.T. Thoolen, I. Tanczos, 2002 Onderbouwing van het Cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer. Toetsing van aanames met SOBEK berekeningen. WL|Delft Hydraulics rapport Z3325, co-financiering doelsubsiside Z3288 door RIKZM.

Winterwerp, J.C. en K. Kuyper (2002) Morfologisch model Westerschelde; verkennende studie naar operationalisering, WL | delft hydraulics, rapport Z3222.

Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuyper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen en Z.B. Wang (2000), Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie (2 delen). WL|Delft Hydraulics.

A Cellenconcept

Inleiding - wat is het Cellenconcept?

Het cellenconcept is een schematisatie en aggregatie van de morfologie en transportcapaciteit in het geulsysteem van de Westerschelde om de invloed van storten en baggeren op de stabiliteit van dat geulsysteem te kunnen bestuderen. Dit betekent dat het concept in essentie uit twee onderdelen bestaat: een schematisatie van het systeem van geulen en platen en een stabiliteitanalyse van het geschematiseerde geulsysteem. Beiden zullen in de volgende paragrafen kort worden toegelicht. Tot slot wordt een overzicht gegeven van de stortcapaciteit in de Westerschelde.

Schematisatie van het geul-plaat systeem

De Westerschelde wordt gekenmerkt door een mooi regelmatig patroon van geulen en platen. Morfologisch gezien kunnen deze geulen worden onderverdeeld in eb- en vloedgeulen. Het onderscheid tussen eb- en vloedgeulen is gebaseerd op de ligging van de drempel (ondiepte) in de geulen: vloedgeulen hebben landwaarts een drempel, ebgeulen hebben zeewaarts een drempel (Van Veen, 1950). Daarnaast kunnen de geulen, in deelgebieden van de Westerschelde, worden onderverdeeld in grote hoofdgeulen en kleinere kortsluitgeulen. Deze hoofdgeulen en kortsluitgeulen vormen samen een regelmatig repeterend patroon dat wordt aangeduid als estuariene sectie of bochtgroep (zie Fig. 1, Jeuken, 2000). Een estuariene sectie bestaat uit een grote gekromde ebgeul met daarnaast een rechte vloedgeul. Deze geulen worden meestal gescheiden door langgerekte plaatgebieden en met elkaar verbonden door de kleinere kortsluitgeulen. Iedere sectie wordt gekenmerkt door een eigen gedrag. Dit betekent dat de bochtgroep als een aparte morfologische eenheid kan worden beschouwd (Jeuken, 2000).

Figuur 1 Morfologische schematisatie van het geulsysteem in de Westerschelde (Jeuken, 2000).

Op deze manieren van het schematiseren van het systeem van geulen en platen is in het kader van de LTV-studie voortgeborduurd (Winterwerp e.a., 2000). Het systeem van geulen is geschematiseerd als een ketting van morfologische cellen (Fig. 2) op basis van berekende getij-gemiddelde zandtransporten en het morfologische onderscheid tussen grote en kleine eb- en vloedgeulen. Iedere cel bestaat uit een ebgedomineerde (eb)geul, een vloedgedomineerde (vloed)geul met daar tussen een plaat. De grote geulen (hoofdgeulen) vormen de macro-cellen. De meso-cellen zijn geassocieerd met de kleinere geulen of inscharingen. Een aantal van deze meso-cellen valt samen met de eerder genoemde kortsluitgeulen (cel 1, 3a-d, Fig. 2). Een belangrijke basis hypothese in dit cellenconcept is dat het systeem van macro en meso-cellen blijft bestaan zolang de individuele macro-cellen in stand blijven.

Figuur 2 Macro- en mesocellen in de Westerschelde (Winterwerp e.a., 2000). Geulen in de macro-cellen: Cel 1= Honte, uitloop Wielingen en (Eb)Schaar van de Spijkerplaat, cel 3 = Everingen, Pas van Terneuzen, cel 4= Middelgat, Gat van Ossenisse, cel 5= Zuidergat / Overloop van Valkenisse, Schaar van Waarde/Valkenisse/Zimmermangeul, cel 6= Nauw van Bath, Schaar van de Noord, cel 7= Vaarwater boven Bath , Appelzak.

Stabiliteits-analyse

De stabiliteit van de morfologische cel vertoont veel overeenkomsten met een riviersplitsing, waarbij een geul zich splitst in twee kleinere geulen: tijdens eb is het landwaartse deel van de cel een splitsing en het zeewaartse deel een samenvloeiing. Tijdens vloed treedt de tegenovergestelde situatie op. De stabiliteit van dergelijke splitsingen wordt bepaald door de verdeling van het sedimenttransport als gevolg van locale drie-dimensionale stroomverschijnselen. In 1D-modellen wordt de verdeling van het sediment transport en de stabiliteit van een splistingspunt gemodelleerd door middel van een zogenaamde knooppuntrelatie. Veld- en laboratoriumonderzoek en analyses van 1D-netwerk modellen geven aan dat de volgende knooppuntrelatie het meest geschikt is voor het modelleren van dergelijke splitsingen (Wang e.a., 1995; Fokkink e.a., 1995):

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1-k} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{k} \tag{2.1}$$

Hierin is k een dimensieloze coëfficiënt S_1, S_2 het sedimenttransport in de geulen 1 en 2, B_1, B_2 de breedte van de geulen en Q_1 en Q_2 de waterafvoer door de twee geulen.

In het verleden zijn verschillende studies uitgevoerd naar de stabiliteit van riviersplitsingen (zie bijv. Wang e.a., 1995, Wang en Van der Kaaij, 1994). Uit deze studies is gebleken dat de knooppuntrelatie een grote invloed heeft op de stabiliteit van een (rivier)splitsing. Voor grote waarden van k is de splitsing stabiel. Beide geulen blijven open. Voor kleine waarden is de splitsing instabiel: een van de geulen verzandt. Wanneer het sediment transport evenredig is met een macht n van de snelheid is de kritische grens voor k gelijk aan $n/3$. Voor de Engelund-Hansen transportformulering betekent dit dat de kritische k-waarde gelijk is aan 5/3.

De analyses voor riviersplitsingen hebben betrekking op stationaire rivierstromingen. Om de conclusies voor riviersplitsingen te kunnen vertalen naar niet-stationaire getijsystemen wordt aangenomen dat de totale transport capaciteit gedurende één getij vergelijkbaar is met de transportcapaciteit in het riviersysteem. Dit betekent dat het totale instantane sedimenttransport bepalend is voor de stabiliteit van het eb-vloedgeulsysteem en niet zozeer het residuele sedimenttransport. Op basis van deze aanname zijn in het kader van de Milieu Aspecten Studie (RWS, 1998) en de studie voor de LTV stabiliteits-analyses uitgevoerd voor het geulsysteem in de Westerschelde die vergelijkbaar zijn met de theoretische analyses voor riviersplitsingen. Belangrijkste verschil is dat de invloed van baggeren en storten is meegenomen door het toevoegen van bron- en puttermen in de morfodynamische vergelijkingen (Wang e.a., 1997; Winterwerp e.a., 2000). Tijdens de LTV studie is tevens de interactie tussen geulen en platen op een vereenvoudigde manier gemodelleerd. Het doel van deze analyses was drieledig:

- Nagaan of baggeren en storten de stabiliteit van een morfologische cel beïnvloedt.
- Als dat het geval is, nagaan bij welke omvang van baggeren en storten het geulsysteem van de cel instabiel wordt en tendeert naar een één-geul-systeem.
- Nagaan in hoeverre de intergetijdegebieden de stabiliteit van het geulsysteem beïnvloeden.

De stabiliteit van een cel voor relatief kleine verstoringen wordt bepaald door het evenwicht tussen de verdeling van het sedimenttransport over de twee geulen en het transport door het geulsysteem als geheel. Een kleine verondieping (storting) in één van de geulen leidt lokaal tot het vernauwen van de geuldoorsnede en daarmee tot het vergroten van de lokale stroomsnelheid, waardoor de transportcapaciteit toeneemt, en de verondieping geërodeerd wordt. Dit is dus een stabiele situatie. Indien echter de verondieping een zekere grootte overschrijdt, neemt de hydraulische ruwheid van die geul snel toe, met als gevolg dat er minder water door de verondiepte geul, en meer water door de verdiepte geul stroomt. Het gevolg is dan een afnemende transportcapaciteit in de verondiepte geul. Dit is een zichzelf versterkend proces: de verondiepte geul wordt steeds ondieper en degenereert. Dit is dus een instabiele situatie. Een stabiliteitsanalyse kan dit proces kwantificeren (voor details zie

Winterwerp e.a., 2000). Met behulp van deze analyse is onderzocht wanneer een verstoring, in de vorm van baggeren en/of storten, in de geulen uitdempt (stabiel situatie) of groeit (instabiele situatie). De groei van een verstoring wordt geïnterpreteerd als de aanzet tot een degeneratie van het geul-plaatsysteem.

In het morfodynamisch model waarmee de stabiliteitsanalyses zijn uitgevoerd wordt elk van de twee geulen geschematiseerd door middel van een lengte en een uniforme breedte en diepte. Dus de morfologische kenmerken van eb- en vloedgeulen (zie boven) worden niet expliciet gemodelleerd. De waterbeweging wordt quasi-stationair beschouwd. Voor de sediment transporten is uitgegaan van de formulering van Engelund-Hansen. De D_{50} van het bodemmateriaal is gesteld op 220μm. Opgemerkt wordt dat de gekozen korrelgrootte van invloed is op de absolute grootte van transport, maar niet op de relatieve grootte van het stortcriterium. De constante *k* in de knooppuntrelatie is 2.

Uit de stabiliteitsanalyses zijn de volgende conclusies getrokken (Wang e.a., 1997, Winterwerp e.a., 2000; Wang en Winterwerp 2001; Torenga, 2001):

1. Een tweegeulsysteem kan zich ontwikkelen tot een beperkt aantal (meestal drie) evenwichtssituaties, namelijk één van de geulen dicht en de andere open (twee evenwichtssituaties, 1-geulsysteem) en beide geulen open (2-geulsysteem).
2. Het netto storten van sediment beïnvloedt de stabiliteit van een twee-geulensysteem. Er is een kritische hoeveelheid voor te storten sediment waarboven het geulsysteem instabiel wordt. De kritische stortcapaciteit van een geul mag tijdelijk overschreden worden. Hoe lang dit precies is, is afhankelijk van de grootte van de geulen en de omvang van de ingrepen (zie Intermezzo Tijdschalen). Echter, een overschrijding over een te lange periode leidt *waarschijnlijk* tot een irreversibele degeneratie.
3. De kritische stortcapaciteit bedraagt ongeveer 10% van de totale (bruto) transportcapaciteit (eb + vloedtransport) in het geulsysteem. De precieze waarde is afhankelijk van gebruikte parameters in het model, met name de k-waarde. Echter, de spreiding in het stortcriterium (ca. 5%) ten gevolge van realistische parameter variaties is klein ten opzichte van de onzekerheden in de bagger- en storthoeveelheden.
4. Ook wanneer de storthoeveelheden beneden de kritische waarden liggen, beïnvloedt het storten de ontwikkeling van het twee-geulensysteem: ten eerste verandert het stabiele evenwicht met beide geulen open. Het één-geulsysteem, waar in de verzande geul gestort wordt, wordt stabiel in plaats van instabiel.
5. Het netto baggeren in één van de geulen heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem; het tussenliggende intergetijdegebied zal naar verwachting echter een paar cm per jaar eroderen via de plaat-geulinteractie. Echter, in combinatie met het storten in de andere geul heeft het baggeren een negatieve invloed op de stabiliteit van het geulsysteem: in het slechtste geval betekent dit een reductie van de stortcapaciteit van 10 naar 5%.
6. Wanneer in beide geulen netto evenveel gestort wordt bedraagt de maximale stortcapaciteit van het geulsysteem in de cel 20% (Torenga, 2001).

Intermezzo - Tijdschalen

De tijdschaal waarop het verondiepen van een geul ten gevolge van storten zichtbaar wordt kan worden afgeschat met

$$T_1 = \frac{BHL}{S}$$

B=de gemiddelde breedte van de geul waar gestort wordt, H=de gemiddelde diepte van de geul waar gestort, L= de lengte van de geul waar gestort wordt. BHL=geulvolume, S= de bruto transportcapaciteit van de cel (in m^3/jr).

Getallen voorbeeld: Stel B=2000, H=7m, L=6000m, S=15*$10^6 m^3$/jr dan wordt het kantelen zichtbaar op een tijdschaal van ongeveer 5 jaar. Een schatting van T_1 voor de zes cellen in de Westerschelde is als volgt:

cel:	1	3	4	5	6	7
L:	5500	12500	7000	6000	2000	3500
H:	13	11	12	6.7	5	5
B:	2000	1500	1500	1500	1000	1000
S	14	18.5	18.5	17	7.5	4.5
T_1	10	11	7	4	1	4

De tijdsduur van de totale degeneratie van een verondiepende geul ligt tussen de T_2 en T_3:

$$T_2 = \frac{BHL}{I - I_{cr}}$$

$$T_3 = \frac{BHL}{I}$$

waarbij I= de stortomvang en I_{cr} de kritische stortomvang waarbij een geul gaat verondiepen. Stel dat in het bovenstaande getallen voorbeeld I=2,7 *$10^6 m^3$/jr en I_{cr}=0,9 *$10^6 m^3$/jr dan duurt het totale degeneratieproces, waarbij het twee-geulsysteem overgaat in een ééngeul-systeem, 30 à 50 jaar (bij continu storten van 2.7Mm^3/jr). Voorwaarde is dat het benodigde sediment beschikbaar is.

De transport- en stortcapaciteit in de Westerschelde

Voor de bepaling van de transport- en stortcapaciteiten in het geulsysteem van de Westerschelde zijn door Winterwerp e.a. (2000) 2DH sedimenttransport berekeningen uitgevoerd met het software pakket Delft3D. Deze berekeningen zijn gemaakt voor de morfologische situatie van 1996 (voor de 48'/43' verdieping) en 1999 (na de verdieping). Als hydrodynamische randvoowaarde is gekozen voor een zogenaamd morfologisch, representatief getij (zie Latteux, 1995 voor methodiek). Dit getij is circa 10% sterker dan het gemiddelde getij. Verder is in de sedimenttransportberekeningen (met Delft3D) is gebruik gemaakt van de transport formulering van Engelund-Hansen. De D_{50} waarde van

het bodemmateriaal is uniform verondersteld en gesteld op 240μm. Merk op dat dit de waarde is die in de transportberekeningen met Delft3D is gebruikt en niet de korrelgrootte zoals die in de stabiliteitsanalyse is toegepast. De keuze van de korrelgrootte beïnvloedt de absolute grootte van de bruto transportcapaciteit, maar niet de relatieve grootte van het stortcriterium (5-10% van de transportcapaciteit).

De berekende transport- en stortcapaciteiten in de macrocellen, zoals bepaald door Winterwerp e.a. (2000), zijn door Jeuken (2001) verder bewerkt door rekening te houden met: 1) de korrelgrootte variaties zoals die voorkomen in de Westerschelde en 2) de variaties ten gevolge van de beschouwde morfologische situatie (1996 en 1999). Deze bewerking resulteert in een onder- en bovengrens van de theoretische stortcapaciteit in iedere macrocel (tabel 1).

Tabel 1 Transport- en stortcapciteiten in de macro-cellen (Jeuken 2001, ontleend aan Winterwerp e.a., 2000).

	cel 1	cel 3	cel 4	cel 5	cel 6	cel 7
D_{50} bodemmateriaal (in μm)[a]						
Geulen & platen, gemiddeld	190	190	170	160	160	145
Geulen	210	210	190	170	170	150
Transport en stortcapaciteit, *Mton*/jr						
minimum transportcapaciteit[b]	20.6	27.4	27.8	24.0	11.3	6.4
maximum transportcapaciteit	24.0	32.8	32.5	31.5	12.8	8.3
5%-stortcriterium (minimum)	1.0-1.2	1.4-1.6	1.4-1.6	1.2-1.6	0.6	0.3-0.4
10%-stortcriterium (maximum)	2.1-2.4	2.7-3.3	2.8-3.2	2.4-3.2	1.1-1.3	0.6-0.8
Transport en stortcapaciteit, Mm3/jr-*profiel*kuubs						
minimum transportcapaciteit[b]	12.9	17.3	17.5	15.1	7.1	4.0
maximum transportcapaciteit	15.1	20.7	20.4	19.8	8.0	5.2
5%-stortcriterium (minimum)	*0.6-0.8*	*0.9-1.0*	*0.9-1.0*	*0.8-1.0*	*0.4*	*0.2-0.3*
10%-stortcriterium (maximum)	*1.3-1.5*	*1.7-2.1*	*1.7-2.0*	*1.5-2.0*	*0.7-0.8*	*0.4-0.5*
Transport en stortcapaciteit, Mm3/jr-*beun*kuubs						
minimum transportcapaciteit[b]	14.2	19.0	19.3	16.6	7.8	4.4
maximum transportcapaciteit	16.6	22.8	22.4	21.8	8.8	5.7
5%-stortcriterium (minimum)	*0.7-0.8*	*1.0-1.1*	*1.0-1.1*	*0.8-1.1*	*0.4*	*0.2-0.3*
10%-stortcriterium (maximum)	*1.4-1.7*	*1.9-2.3*	*1.9-2.3*	*1.7-2.2*	*0.8-0.9*	*0.4-0.6*

[a] Gegevens ontleend aan Jeuken, 2000 (tabel 1.1, analyse 'McLaren bemonstering')
[b] De minimum en maximum waarden komen voort uit de variatie in berekende transportcapaciteit voor 1996 en 1999 en de korrelgrootte variatie onder het kopje D_{50} bodemmateriaal.

Volgens Tabel 1 varieert de totale stortcapaciteit in de Westerschelde (=som van de stortcapaciteit in de cellen) tussen de 4 en 9 Mm^3/jaar, respectievelijk in het geval van het 5% en het 10%-criterium (= *profielkuubs* = 4-10Mm^3/jaar *beunkuubs*). Tellen we hierbij de jaarlijkse zandwinning van ongeveer 2.4Mm^3 bij op dan betekent dat een totale stortcapaciteit in de Westerschelde die varieert tussen de 6.4 en 11.4 Mm^3 (= 7-12.5 Mm^3 beunkuubs)[8], afhankelijk van de wijze/plaats waarop er gebaggerd en gestort wordt.

[8] *In de LTV-studie van Winterwerp et al. (2000) wordt de totale stortcapaciteit, inclusief zandwinning, begroot op 5.5-8.6Mm^3 (profiel, =6,0-9.5 Mm^3 in het beun).*

Gemiddeld is er in periode 1997-1999 11.4 Mm^3/jr. (profielkuubs) gestort en 11.7 Mm^3/jr. gebaggerd (0.3Mm^3/jr is onttrokken als zandwinning door de Belgen, RWS 2000).

De theoretsiche stortcapaciteit in de macrocellen is geverifieerd op basis van historische gegevens (Jeuken, 2001). Hieruit blijkt dat het theoretisch stortcriterium redelijkerwijs kan worden toegepast op de *macro*-cellen. Dit betekent dat 5-10% van de totale bruto transportcapaciteit in een van de twee geulen van een macro-cel kan worden gestort zonder dat het geulsysteem gaat kantelen als gevolg van het storten en baggeren. Het precieze percentage is afhankelijk van de hoeveelheden en wijze waarop er gebaggerd en gestort wordt, en waarschijnlijk van de autonome ontwikkeling. Dit betekent tevens dat,

- met het huidige baggeren en storten (sinds 1997-1999) de maximale stortcapaciteit van de totale Westerschelde gebruikt wordt en,
- deze stortcapaciteit zo optimaal mogelijk moet worden benut om ongewenste verondiepingen van geulen te voorkomen.

Onderbouwing van het Cellenconcept

In het kader van het RWS-doelsubsidie project Inzicht in Watersystemen Westerschelde (IWW, Z3288) wordt door WL | Delft Hyadraulics de komende paar jaren gewerkt aan: i) het onderbouwen, ii) operationaliseren, en iii) toepassen van het 'Cellenconcept Westerschelde' als instrument voor het ontwikkelen en evalueren van nieuwe, geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning in de Westerschelde.

In 2002 is het Cellenconcept onderbouwd. Hierbij heeft de nadruk gelegen op het verifiëren van de meest cruciale aannames die ten grondslag liggen aan het concept, en het verbeteren van de theoretische basis van het Cellenconcept. Hiervoor is een 1D morfologisch netwerk model onder SOBEK opgezet. De getijbeweging en de bruto en residuele zandtransporten in het model zijn gevalideerd (Jeuken et al, 2002). Vervolgens zijn met behulp van dit model zes aannames geverifieerd (Wang et al, 2002). Uit de analyses blijkt dat niet alle aannames in het Cellenconcept juist zijn; de stortcapaciteit wordt wel beïnvloed door: i) de autonome ontwikkeling van het geulsysteem: het van nature eroderen en sedimenteren van individuele geulen en de daarmee samenhangende erosie/sedimentatie van een macrocel en de sedimentuitwisseling tussen de macrocellen, ii) de morfologie van de geulen en de verschillen daarin tussen de ebgeul en de vloedgeul, het zogenaamde eb-vloedgeul karakter, en iii) de exacte locatie waar gestort wordt. .

Uit de resultaten van de modelberekeningen met betrekking tot de invloed van de autonome ontwikkelingen (i) is het volgende geconcludeerd:

1. In een, van nature, eroderende vloedgeul bleek de stortcapaciteit groter te zijn dan 10% van de totale bruto transport capaciteit van de *macrocel*. Deze grotere stortcapaciteit kan twee oorzaken hebben:
   - <u>De morfologische verandering van de geul.</u> Als een geul van nature erodeert betekent dat, in vergelijking tot een morfologisch niet veranderende geul, grotere stroomsnelheden en bruto sedimenttransporten en dus een grotere *absolute* stortcapaciteit in de betreffende geul. Met betrekking tot deze conclusie kan nog de

volgende aanvullende opmerking worden gemaakt: Als de erosie van de geul wordt veroorzaakt door baggeren, zullen de stroomsnelheden, de bruto transportcapaciteit en de *absolute* stortcapaciteit juist kleiner zijn dan in een morfologisch stabiele geul. Het is niet bekend in hoeverre erosie en sedimentatie van een individuele geul van invloed zijn op de relatieve grootte van het stortcriterium (het percentage van de bruto transportcapaciteit).

- De verschillen in de morfologie tussen de ebgeul en de vloedgeul. De gemiddelde dwarsdoorsnede en diepte van de beschouwde vloedgeul zijn groter dan van de ebgeul. Hierdoor heeft de vloedgeul een grotere bruto transport capaciteit dan de ebgeul.Het cellenconcept houdt hier (nog) geen rekening mee en relateert de stortcapaciteit aan het bruto zandtransport door de gehele cel en niet aan de brutotransport capaciteit in de individuele geulen.

De afzonderlijke invloed van deze twee aspecten op de absolute en relatieve stortcapaciteit in eroderende en sedimenterende geulen dient nog nader te worden uitgezocht.

2. In een van nature eroderende macrocel, die sediment exporteert naar aangrenzende cellen, is de *absolute* transport- en stortcapaciteit groter dan in een cel die morfologisch stabiel is (qua sedimentinhoud en gemiddelde diepte). Met betrekking tot deze conclusie kan nog de volgende aanvullende opmerking worden gemaakt: als de erosie van de macrocel wordt veroorzaakt door baggeren, zullen de stroomsnelheden, de bruto zandtransporten en de *absolute* stortcapaciteit juist kleiner zijn dan in een morfologisch stabiele macrocel. Wanneer de erosie leidt tot een toename van de gemiddelde diepte zullen, bij een gelijk blijvend getijvolume, de stroomsnelheden, de bruto zandtransporten en de *absolute* stortcapaciteit in de cel gedurende het erosieproces afnemen. In een macrocel waar sedimentatie plaats vindt treden de tegengestelde effecten op.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat morfologische veranderingen van de geulen en de verschillen in morfologie tussen de ebgeul en vloedgeul van invloed zijn op de *absolute* grootte van de stortcriterium. Het is op dit moment echter nog niet duidelijk in hoeverre en op welke wijze deze zaken de *relatieve* grootte van het stortcriterium (het te hanteren percentage van het bruto transport, het zogenaamde 10%-criterium) beinvloeden.

Na het verifiëren van aannames is vervolgens de theoretische basis van concept verbeterd. Hierbij is nagegaan hoe de morfologische verschillen tussen de eb en vloedgeul, en de daarmee samenhangende residuele circulaties van water en zand, van invloed zijn op het stortcriterium en hoe dit in het cellenconcept kan worden meegenomen (Wang, 2003) . De stortcapaciteit die volgt uit het cellenconcept is gerelateerd aan de bruto transportcapaciteit door het geulsysteem en niet aan het resttransport. De residuele circulatie veroorzaakt indirect een enigszins grotere stortcapaciteit, d.w.z. via een toename van het totale transport. Dit betekent dat het eb-vloedgeulkarakter en de daarmee samenhangende residuele circulatie leiden tot een iets grotere transport- en stortcapaciteit in het geulsysteem. Deze theoretische bevinding wordt bevestigd door een numerieke stabilteitsanalyse. Praktisch gezien heeft deze uitkomst geen invloed op de toepassing van het cellenconcept, zolang de totale transportcapaciteit inclusief het effect van het resttransport wordt bepaald.

De resultaten van de onderbouwing van het Cellenconcept vormen de basis voor het operationaliseren van het concept in 2003 (en 2004).

B Diepte-kaarten

C Erosie- en Sedimentatie kaarten

D Ingreeplocaties 1990-2002

.

E De 1D zandbalans

Inleiding

Zoals eerder aangegeven is de sedimentuitwisseling tussen de verschillende macrocellen, en daarmee samenhangend de erosie- en sedimentatie in de macrocellen als geheel, van invloed op de stortcapaciteit in het geulsysteem. In een geulsysteem dat erodeert en sediment transporteert naar aangrenzende macrocellen is de stortcapaciteit lager dan in een systeem dat morfologisch (qua sedimentinhoud) niet verandert (Wang et al, 2002). Immers, erosie betekent een toename van de gemiddelde diepte, een afname van de snelheid (bij gelijkblijvend debiet) en daarmee een afname van de absolute transport- en stortcapaciteit. In een sedimenterend, importerend geulsysteem treedt het tegenovergestelde effect op.

Aanpak

De sedimentuitwisseling tussen de cellen en de inhoudsveranderingen van de totale cellen vormen samen de zandbalans. Deze wordt als volgt bepaald:

1. Het bepalen van de tijdreeksen van V_{tot}, V_I en V_{nat} van de macrocellen als geheel door samenvoeging van de gegevens per eb- en vloedgeul.
2. Dezelfde tijdreeksen maken voor de 'niet-macrocel' vakken,: 7 (Zuid-Everingen), 8 (Boerengat en stukje Plaat van Baarland), 3+300 (Vaarwater langs Hoofdplaat), vak 16+17 nabij Hansweert (overgang tussen cel 4 en 5). Voor het opstellen van de zandbalans zijn vak 7 en 8 aan macrocel 3 (bij Terneuzen) toegevoegd.
3. Voor het bepalen van de natuurlijke sedimentuitwisseling op de zeewaartse rand van iedere macrocel worden de volgende aannamen gedaan:
   a. Het transport op de grens Nederland-België is gelijk aan 0, conform alle eerdere zandbalansstudies (Uit den Bogaard, 1993; De Jong, 2000). In het kader van de LVT zijn met Delft3D ressttransportvelden berekend voor de gehele Westerschelde en een stuk Beneden Zeeschelde (tot Antwerpen). Deze duiden op een zeewaarts gedomineerd restttransport op de grens in de orde van 0.5 Mm^3/jr. Daar staat tegenover dat Uit den Bogaard (1993, op basis van kuberingsgegevens van de Beneden Zeeschelde voor 1969 en 1991, komt tot een landwaarts gericht sediment transport van delfde orde van grootte. De onzekerheden in het laatstgenoemde getal zijn echter bijzonder groot.
   b. In het Land van Saeftinghe sedimenteert jaarlijks 0.3 Mm^3/jr. Van Saethinghe zijn drie inhoudscijfers bekend: voor 1931, 1962 en 1992. Uit deze gegevens zijn twee sedimentatiesnelehden afgeleid (Krijger, 1993): 0.5 Mm^3/jr gedurende de periode 1931-1962 en een sedimentatiesnelheid van 0.3 Mm^3/jr voor de periode 1962-1992. Voor het opstellen van de sedimentbalans in de huidige studie wordt aangenomen dat dit sediment afkomstig is uit cel 5 (Valkenisse)
   c. Het sediment dat wordt afgezet in het vaarwater langs Hoofdplaat (mesocellen gebied 2) komt via het mondingsgebied binnen; de sedimentuitwisseling tussen

de ebgeul Pas van Terneuzen (cel 3) en deze nevengeulen wordt verwaarloosd (=0).

Nu kan het transport op de zeewaarts gelegen rand van iedere cel worden bepaald door de natuurlijke inhoudsveranderingen van die cel en de landwaarts gelegen cellen bij elkaar op te tellen. Dus bijvoorbeeld, het transport op de zeewaarts gelegen rand van cel 5, T_{cel5} , is gelijk aan $V_{nat,\ cel\ 7} + V_{nat,cel6} + V_{nat,cel5}$. Een negatief transport duidt op een naar zee gericht transport ('export') een positief transport betekent een landwaarts gericht transport ('import'). Ook voor deze sedimentuitwisselingen worden de momentane en cumulatieve reeksen samengesteld en gemiddelde transportsnelheden voor bepaalde perioden bepaald.

Resultaten

Figuur E.1 toont de tijdreeksen van de cumulatieve sedimentuitwisseling op de zeewaarts gelegen rand van ieder cel. Een stijgende lijn (positieve richtingscoefficient) duidt op een landwaarts gericht transport (de cel in). Een dalende lijn (negatieve richtingscoefficient) betekent een naar zee gericht sedimenttransport (de cel uit). De tijdreeksen van de erosie- en sedimentatietendensen in de macrocellen als geheel zijn weergegeven in Figuur 3.8. Omdat bij het opstellen van de balans op de kleinste rand (de grens Nederland – Belgie) wordt begonnen is de volgorde van de diverse grafieken in Figuur E.1 en E.2 ook als zodanig weergegeven. Figuur E.3 toont de zandbalanzen voor enkele karaktersitieke perioden. Vanwege de kortdurende fluctuaties in de transporten die waarschijnlijk door de 18.6 jarige cyclus in het getij worden bepaald (zie onder) is er voor gekozen om alleen de balanzen over langere perioden (orde 10 jaar) te kwantificeren. Enige uitzondering hierop vormen de perioden 1990-1997 en 1997-2002 omdat deze nodig zijn voor het evalueren van het huidige beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning (in hoofdstuk 5). In zijn algemeenheid geldt dat het beschouwen van zandbalanzen van de Westerschelde over kortere perioden eigenlijk alleen zin heeft als expliciet rekening wordt gehouden met de kort-termijn fluctuaties.

Sedimentuitwisseling tussen cellen

De grafieken met de (cumulatieve) sedimentuitwisseling tussen de cellen toont een aantal in het oog springende aspecten waarbij de Westerschelde kan worden onderverdeeld in twee delen (Fig.E.1):

De drie landwaarts gelegen macrocellen, het zogenaamde oostelijk deel van de Westerschelde, worden allen gekenmerkt door eenzelfde soort temporele variatie in de overwegend landwaarts gerichte transporten op de zeewaarts gelegen rand: een kortdurende fluctuatie in het transport rond 1970, gevolgd door een toename van de transporten in de perioden 1975-1981 en 1981-1990, waarna in de periode 1990-2002 de landwaarts gerichte transporten halveren (cellen 6 en 7) of min of meer gelijk blijven (cel 5).

De drie zeewaarts gelegen cellen vertonen eveneens een onderling vergelijkbare temporele variatie in het sedimenttransport op de zeewaarts gelegen rand. Deze variatie verschilt echter wezenlijk van de variaties in het oostelijk deel: na fors landwaarts gerichte transporten (7-10Mm^3/jr) in de periode 1962-1970, nemen de transporten af tot gemiddeld 0.8-1.6Mm^3/jr gedurende de periode 1970-1990. Na 1990 vindt er een omslag plaats.

Cel 7, nabij de grens

Cel 6, nabij Bath

Cel 5, nabij Valkenisse

Cel 4, nabij Hansweert

Cel 3, nabij Terneuzen

Cel 1, nabij Vlissingen

Import/export nabij Vlissingen

Figuur E.1 Cumulatieve transporten (in Mm^3) op de zeewaarts gelegen randen van de macrocellen. Een stijgende lijn (positieve richtingscoefficient) duidt op een landwaarts gericht transport (de cel in). Een dalende lijn (negatieve richtingscoefficient) betekent een naar zee gericht sedimenttransport (de cel uit). 'Natuurlijk' transport = blauw, totaal transport = zwarte lijn

Sindsdien is er sprake van overwegend zeewaarts gerichte transporten met een gemiddelde grootte van 0,5-2.2Mm^3/jr. Verder vertonen de tijdreeksen van de transporten enkele kortdurende fluctuaties waarbij de transporten op een tijdschaal van ongeveer 5 jaar van teken wisselen (dalende lijn gevolgd door stijgende lijn in Fig. 3.7). De amplitude van deze fluctuaties lijkt in de tijd af te nemen. Uit een vergelijking tussen berekende ESTMORF resultaten en gemeten inhoudsveranderingen over de periode 1968-1998, is gebleken dat deze fluctuaties waarschijnlijk worden veroorzaakt door de 18,6-jarige cyclus in het getij (Jeuken et al, 2002).

1D morfologische zandbalanzen

Door de informatie over de sedimentuitwisseling te combineren met de natuurlijke erosie- en sedimentatiesnelheden (Figuur E.2) is het mogelijk om 1D morfologische zandbalanzen te maken van het geul-plaat systeem. Figuur E.3 toont tet resultaat van een 1D morfologische zandbalans voor zes min of meer karakteristieke perioden, te weten: 1960-1970, 1970-1981, 1981-1990, 1990-2002, 1990-1997 (voor de tweede verdieping) en 1997-2002 (tijdens en net na de tweede verdieping). Dit levert de volgende beelden op met betrekking tot de sedimentbalans van de macrocellen en de Westerschelde in haar totaliteit:

De twee meest landwaarts gelegen cellen, 6 en 7 nabij Bath, verliezen sediment door het netto baggeren in de vaargeul (dalende lijn V_{tot} in Fig. E.2 die tegengesteld is aan V_{nat}, zie ook Fig. E.3). Hierdoor wordt het geul-plaat systeem in deze cellen als geheel dieper en ontstaat de 'import' van sediment uit de zeewaarts aangrenzende macrocel van Valkenisse (6, zie Fig. E.3 en E.1). Dit beeld kenmerkt alle deelperioden sinds 1960 waarvoor zandbalanzen zijn opgesteld.

De sedimentbalans van macrocel 5, nabij Valkenisse, ontwikkelt zich enigzins anders: van 1950 tot 1970 wordt dit geul-plaatsysteem gekenmerkt door een natuurlijke tendens van sedimentatie die versterkt is geweest door het netto storten van sediment (Fig. E.2). Deze sedimentatie manifesteert zich in de vloedgeul (§3.5) waar sediment vanuit de zeewaarts grenzende macro-cel 4, nabij Hansweert, wordt afgezet (Fig. E.3). Deze sedimentatietendens slaat rond 1970 om waarna het geulsysteem als geheel tot 1990 'van nature' erodeert; V_{tot} en V_{nat} hebben hetzelfde teken (Fig. E.2-3). Deze tendens wordt in belangrijke mate bepaald door de erosie van de gehele ebgeul (§3.5). Het meerendeel van het geerodeerde materiaal verdwijnt naar de landwaarts aangrenzende macrocellen, 6 en 7 nabij Bath (Fig. E.3). Na 1990 bepaalt het netto baggeren van sediment de van de sedimentbalans van de gehele macrocel (Fig. E.2). Het geulsysteem verdiept netto nog steeds (V_{tot} in Fig. E.2 en E.3), maar het zogenaamde natuurlijke effect (V_{nat} in Fig. E.2 en E.3) wordt nu echter sedimentatie. Deze sedimentatie komt tot uitdrukking in de transporten op de randen van de cel; met name het sedimenttransport naar de landwaarts gelegen cel 6 (en cel 7) halveert ten opzichte van de voorgaande periode (Fig. E.1 en Fig. E.3). De verdieping van de vaargeul in 1997 versterkt deze tendenzen (Fig. E.2 en deelperioden 1990-1997 en 1997-2002 in Fig.E.3).

De macrocel nabij Hansweert (cel 4) sedimenteert van nature tussen ongeveer 1960 en 1990 (V_{tot} en V_{nat} in Fig. E.2 hebben hetzelfde teken). Deze tendens hangt samen met de bochtafsnijding van de ebgeul (functiewisseling tussen eb en vloedgeul, §3.4) en wordt sinds 1975 vrij sterk beinvloed door het netto storten (Fig. E.2). Het sediment dat in de cel

wordt afgezet is in hoofdzaak afkomstig uit de zeewaarts grenzende cel van Terneuzen (fig. E.3, Jeuken, 2000). Alleen tussen 1970 en 1981 is er ook sprake van een aanvoer van sediment vanuit de landwaarts grenzende Valkenisse cel (Fig. E.3). Deze tendens slaat na 1990 om in een erosie (Fig. E.2). Het sediment wordt voor een belangrijk deel getransporteerd naar de landwaarst aangrenzende cel 5. Een klein deel wordt ook naar de zeewaarts grenzende Terneuzen cel geexporteerd. De tweede verdieping heeft dit beeld van de cel in haar totaliteit niet wezenlijk veranderd (zie Fig. E.3). Op de schaal van de individuele eb en vloedgeul heeft het sinds de verdieping gewijzigde stort- en baggerbeleid wel dramatische gevolgen gehad (zie §3.4 en hoofdstuk 6).

Het geulsysteem van de gehele macro-cel nabij Terneuzen (cel 3), erodeert van nature (Fig.E.2). De erosie wordt voor een deel bepaald door het netto baggeren. Tot 1990 is het merendeel van het geërodeerde sediment afgezet in de landwaarts grenzende cel van Hansweert (Fig. E.3) onder invloed van het gedrag van de kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul Everingen (Jeuken, 2000). Sinds 1990 exporteert de macrocel het geërodeerde sediment in zeewaartse richting (Fig. E.3). Deze export is niet wezenlijk veranderd sinds de tweede verdieping (vergelijk de laatste twee perioden in Fig. E.3). De grootte van het transport naar de macro-cel bij Vlissingen lijkt iets te zijn toegenomen sinds 1997. Deze verandering kan echter ook samenhangen met de 18,6-jarige cyclus (zie Fig. E.1) en hoeft dus niet het gevolg te zijn van de verdieping.

Cel 1 nabij Vlissingen wordt gekenmerkt door een natuurlijke erosie gedurende de periode 1960-1970 (Fig. E.2 en Fig E.3). Het sediment wordt getransporteerd naar de landwaarts gelegen eroderende Terneuzen cel. Ongeveer de helft van het sediment wordt geexporteerd richting mondingsgebied. Deze erosietendens wordt gevolgd door een natuurlijke sedimentatie die tot circa 1981 voortduurt. Dit sedimentatieproces wordt bepaald door de verondieping van de ebgeul als reactie op het verdiepen van de drempel in de vloedgeul (§3.2). De cel kent een stabiele sedimentbalans in de periode 1981-1990. Na 1990 slaat de balans weer om in erosie, waarbij het sediment wordt geexporteerd richting mondingsgebied. De richting en grootte van deze export is door de verdieping niet wezenlijk veranderd. De toegenomen netto stortactiviteiten hebben wel een kritische invloed op de inhoudsverandering van de cel (zie teken van V_{tot} en V_{nat} in Fig E.2 en E.3).

De sedimentbalans van de gehele Westerschelde kent perioden van import en export. Tussen 1960 en 1970 exporteert het systeem gemiddeld 0.4 Mm^3/jr. Vanaf eind jaren zestig tot eind jaren tachtig importeert het estuarium 1.4-1.8 Mm^3 sediment per jaar, waarbij de 18,6-jarige cyclus korte periode van sediment export veroorzaakt (bijv. tussen 1975 en 1981, Fig E.1g). Sinds 1990 is er sprake van een sediment export van ongeveer 1.5Mm^3/jr (zie Fig. E.2 en E.3). Kijken we naar de tijdreeks van de erosie en sedimentatie van de gehele Westerschelde (Fig. E.2) dan wordt de sedimentbalans op deze ruimteschaal en op de lange termijn sterk beinvloed door de zandwinning van gemiddeld 2.6Mm^3/jr (V_{tot} en V_{nat} hebben tegengestelde tekens). De omslag van sedimentimport naar -export rond 1990 valt samen met de verplaatsing van de zandwinning van het westelijk deel (cellen 1 en 3) naar het oostelijk deel (cel 5). Tegelijkertijd neemt het landwaarts gerichte transport van de Hansweert cel naar de Valkenisse cel met bijna 1 Mm^3/jr toe. Deze constatering suggereert dat zandwinning gepaard gaat met een import van sediment uit het gebied net zeewaarts van de plaats waar het zand wordt gewonnen. Dit zou kunnen betekenen dat het verplaasten van

de zandwinning naar het oostelijk deel van de Westerschelde (mede) bepalend is geweest voor de export van sediment uit de Westerschelde naar de monding. Eerdere ESTMORF studies geven aan dat het concentreren van het storten van sediment in het westelijk deel ook aanleiding kan zijn voor het ontstaan van een export. Een vergelijking van de

Figuur E.2 Cumulatieve erosie / sedimentatie in de macrocellen en de Westerschelde (in Mm^3). Dikke doorgetrokken zwarte lijn = $\Delta V_{tot,cum}$ zwarte gestippelde lijn = $V_{l,cum}$ ten gevolge van netto ingrepen , dikke blauwe lijn = 'natuurlijke' volumeverandering $\Delta V_{nat,cum}$.

zandbalanzen voor de perioden 1990-1997 en 1997-2002 geeft echter aan dat dit niet van doorslaggevend belang is geweest; In beide perioden is er sprake van een export. Wellicht dat de ESTMORF-berekeningen hier meer duidelijkheid over kunnen geven.

Figuur E.3 1D-Zandbalanzen voor opeenvolgende perioden. Rode getallen met pijlen = zandtransporten tussen macrocellen (in Mm^3/jr). V_{nat} = rode onderstreepte getallen , V_{tot} = zwarte getallen (erosie (-) en sedimentatie (+) die je in de dieptekaart meet.

Figuur E.3 Vervolg