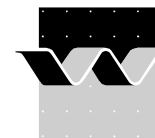


Onderbouwing van het cellenconcept
Westerschelde als instrument voor beleid en
beheer (1)

C. Jeuken
I. Tánczos
P. Thoolen
M. van Helvert
M. Rozemeijer
Z.B. Wang

december 2002

Z2838 / Z3288



OPDRACHTGEVER: WL|Delft Hydraulics
Doelsubsidie V&W, project Veerkracht 2001 (deel B)
Doelsubsidie V & W, project Inzicht in Watersystemen

TITEL: Onderbouwing van het cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer

SUMMARY:

During the study for Long-Term Vision of the Schelde Estuary the cell-concept Westerschelde has been developed. Basically, the concept is a schematisation and aggregation of the morphology and sand transport capacity in the system of tidal channels in the Westerschelde. The concept was developed to assess the stability (maintenance) of the channel system under the influence of dredging and dumping (of sand).

The manager of the estuary aims to optimise the strategy for dredging and dumping in the estuary in such a way that the maintenance of the channel system, the navigation-function and the safety against flooding are ensured. The cell-concept has the potential to be used as an instrument for developing and evaluating such strategies.

The 'RWS-doelsubsidie' project 'Inzicht in watersystemen' aims: 1) to found the assumptions and to improve the theoretical basis of the cell-concept, 2) to make the concept operational as an instrument for defining and evaluating new, integrated sustainable strategies for sand mining and dredging, and 3) to apply the instrument, i.e. evaluate existing and define new integrated strategies for sand mining, dredging and dumping that ensure the maintenance of the channel and shoal system, the safety against flooding and the navigability of the shipping lane in the most optimal way?

This report describes the first results of the founding of the cell-concept. Chapter 2 considers the cell-concept in the wider context of the management of the estuary. It gives answers to the questions: What is the cell-concept? How did it originate?, and, in which way and to what extent is the cell-concept an elaboration of the management conception resilience. The principal assumptions of the cell-concept are outlined in Chapter 3. In addition this chapter describes the set-up and validation of two morphological models that will be used at a later stage of the project to verify the assumptions. The validation results for the '1-branch model' show that the model provides a solid basis for the set-up and validation of a network-model that contains a single cell, the so called 'cell-model'. The application of this cell model to verify the assumptions first requires a fine-tuning of the bed-roughness in the ebb and flood channel during ebb. Finally, Chapter 4 presents a proposal for the development of a support tool based on the cell-concept that helps the manager of the estuary to decide whether a licence for dredging and dumping at specific locations should be given or not. In this process uncertainties should be considered as things are. Emphasis should be put on the consequences of a 'wrong' decision for the principal functions of the estuary, i.e. Safety, Navigation and Nature/Ecology.

REFERENTIES: Westerschelde, cellenconcept, baggeren, storten, morfologie, geulen en platen, modellen, onzekerheden

VER.	AUTEUR		DATUM		OPMERK.	REVIEW		GOEDKEURING		
1.0	Jeuken e.a.		22 maart 2002			B.G. Ruessink		T. Schilperoort		
2.0	Jeuken e.a.		december 2002			K. Kuyper				
PROJECTNUMMER:			Z2838/Z3288							
TREFWOORDEN:										
INHOUD:		TEKST	45	TABELLEN	8	FIGUREN		9	APPENDICES	0
STATUS:		☐ VOORLOPIG		☐ CONCEPT		☒ DEFINITIEF				

Dit document is een concept-rapport, niet een definitief rapport, en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel en aanpak	2
2	Het cellenconcept Westerschelde en het beleid en beheer	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Wat is het cellenconcept?	4
2.2.1	Inleiding	4
2.2.2	Schematisatie van het geul-plaat systeem	4
2.2.3	Stabiliteits-analyse	6
2.2.4	De transport- en stortcapaciteit in de Westerschelde	8
2.3	Het cellenconcept en de studie LTV-SE	11
2.3.1	Ontstaan van het cellenconcept	11
2.3.2	Rol van het cellenconcept in het huidige beheer	11
2.3.3	Rol van het cellenconcept in LTV-SE	12
2.4	Het cellenconcept als uitwerking van het beleidsbegrip veerkracht	13
2.4.1	Het beleidsbegrip veerkracht	13
2.4.2	Het cellenconcept en veerkracht	14
3	Een morfologisch model voor de kwantificering van aannamen en onzekerheden in het cellenconcept	16
3.1	Inleiding	16
3.2	Aannamen in het cellenconcept	16
3.3	Opzet van het model	17
3.3.1	Netwerk en bodemschematisatie	17
3.3.2	Randvoorwaarden	20
3.4	Validatie van het één-tak model	21
3.4.1	Het verticale getij	21
3.4.2	Het horizontale getij	24
3.4.3	Sedimenttransporten	26
3.5	Validatie van het cel-model	27
3.5.1	Het verticale getij	27
3.5.2	Het horizontale getij	28

3.5.3	Sedimenttransporten	31
3.6	Discussie, conclusies en aanbevelingen.....	32
4	Hoe om te gaan met onzekerheden - een plan van aanpak	37
4.1	Inleiding.....	37
4.2	Probleemstelling	38
4.3	Plan van aanpak	39
4.4	Voorlopige werkbegroting	40
5	Samenvatting en conclusies.....	41
6	Referenties	44

I Inleiding

I.1 Achtergrond

De beheerder van de Westerschelde, Directie Zeeland, is verantwoordelijk voor de Veiligheid, Natuurlijkheid en Toegankelijkheid in het Schelde estuarium. De streefbeelden, ontwikkelingsschetsen en beleidsdoelen op deze drie gebieden zijn verwoord in de Lange-Termijn Visie Schelde-estuarium (RWS&MVG, 2001), hierna aangeduid als LTV. Belangrijk uitgangspunt hierbij is de instandhouding van het open en natuurlijke mondingsgebied, een systeem van hoofd- en nevengeulen met tussenliggende platen en ondiepwatergebieden (een meergeulensysteem) in de Westerschelde en een riviersysteem met een meanderend karakter in de Zeeschelde.

Tijdens het morfologisch onderzoek dat in het kader van de studie voor de LTV is uitgevoerd is het zogenaamde cellenconcept Westerschelde ontwikkeld om de invloed van ingrepen op de stabiliteit van het meergeulensysteem te bestuderen. Uit dit concept blijkt dat een zeer zorgvuldig bagger-, stort- en zandwinbeheer nodig is om het meergeulensysteem in de Westerschelde duurzaam in stand te houden. Met name het stortbeleid is cruciaal. Dit wordt bevestigd door de waargenomen historische ontwikkelingen in het oostelijk deel van de Westerschelde. Ook recente ontwikkelingen in het westelijk deel, sinds de laatste vaargeulverdieping, duiden hierop (Jeuken, 2001): omvangrijke sedimentstortingen gaan gepaard met locale verondiepingen in de nevengeulen / vloedgeulen en hebben mogelijk al geleid tot ongewenste morfologische veranderingen in de nabije omgeving.

Uit een verificatie van het cellenconcept op basis van historische gegevens over de periode 1955-1999 blijkt dat het cellenconcept redelijkerwijs kan worden toegepast op de macro-cellen (Jeuken, 2001). Dit betekent tevens dat met het huidige stort- en zandwinbeleid de grenzen voor het storten van sediment in de Westerschelde bereikt zijn. De analyses geven echter ook aan dat het stort- en zandwinbeleid niet optimaal zijn ingevuld en geïntegreerd. Dit geldt ook voor de onlangs afgegeven nieuwe stortvergunningen en het in werking getreden nieuwe zandwinbeleid (Jeuken en Wang, 2001). De belangrijkste vraag op dit gebied vanuit beleid en beheer is dan ook:

Wat is de optimale strategie (op een tijdschaal van jaren) voor baggeren, storten en zandwinning in het Schelde-estuarium, waarbij het meergeulensysteem gehandhaafd blijft, en bevaarbaarheid en veiligheid tegen overstromen gewaarborgd blijven?

Zowel de LTV als deze beleidsvraag geven aan dat een duurzame instandhouding van het meergeulensysteem in de Westerschelde een belangrijk uitgangspunt (doel) vormt voor het beleid en beheer. Bij het formuleren en uitvoeren van een nieuw beleid voor vaargeulonderhoud en zandwinning kan een veerkracht strategie een middel zijn. Dit betekent dan het zoveel mogelijk meewerken met natuurlijke processen en het inspelen op het vermogen van het systeem om zich zodanig te herstellen na veranderde omstandigheden en/of verstoringen dat de essentiële kenmerken (het meergeulensysteem) behouden blijven.

Het is echter denkbaar dat een meer op weerstand gebaseerde strategie tijdelijk en/of lokaal noodzakelijk is voor een duurzaam behoud van het meergeulensysteem.

Het cellenconcept en het daaruit volgende stortcriterium hebben de potentie om te worden ingezet als instrument voor het ontwikkelen van nieuwe geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning (zandbeheer) in de Westerschelde. Dit vraagt echter om een verdere onderbouwing van de meest cruciale aannamen (onzekerheden) in het concept en een operationalisering en toepassing van het concept voor beleid en beheer. De operationalisering van het concept bestaat uit: 1) een vertaling van het concept naar een set eenduidige, samenhangende (morfologische) indicatoren die de achterliggende ingreep-effect relaties kwantificeren, en 2) het opstellen van richtlijnen en voorbeelden hoe de set indicatoren moet worden gebruikt om nieuwe beleid- en beheersstrategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud te ontwikkelen en evalueren. Een belangrijk aspect bij het operationaliseren van het concept bestaat uit het inzichtelijk maken van de implicaties van onzekerheden (waaronder kennisleemten) voor beleidsmakers.

1.2 Doel en aanpak

De doelstelling voor het project Veerkracht 2001 (deel B) en het nieuwe doelsubsidieproject Inzicht in Watersystemen, WL-thema Innovatief kustwaterbeheer, luidt:

Het onderbouwen, operationaliseren en toepassen van 'het cellenconcept Westerschelde' als instrument voor het ontwikkelen en evalueren van nieuwe, geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud (zandbeheer) in de Westerschelde.

De in paragraaf 1.1 genoemde vraag vanuit beleid en beheer staat centraal binnen het onderzoek. Het cellenconcept wordt onderbouwd en geoperationaliseerd als instrument om die vraag te beantwoorden. Dit proces vindt plaats in nauwe samenspraak met de beleidsmakers en beheerders.

Praktisch gezien betekent dit een onderverdeling van het project in vier resultaatgebieden.

1. Een *onderbouwing* van het cellenconcept als potentieel instrument voor het ontwikkelen en evalueren van nieuwe, veerkrachtige beleid- en beheersstrategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud.
2. Een *operationalisering* van het cellenconcept als instrument voor het ontwikkelen en evalueren van nieuwe, veerkrachtige beleid- en beheersstrategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud.
3. Een *toepassing* van het geoperationaliseerde instrument waarin het huidige beleid en beheer wordt geëvalueerd en waarin nieuwe beleid- en beheersstrategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud worden ontwikkeld.
4. Een *eindevaluatie* van het project. Deze zal zich richten op het identificeren van de algemene lessen uit het onderzoek ten aanzien van het ontwikkelen en operationaliseren van concepten als het cellenconcept voor andere watersystemen.

Voorliggende studie maakt deel uit van resultaatgebied 1, de onderbouwing van het cellenconcept, en is uitgevoerd binnen het kader van het doelsubsidieproject Veerkracht dat eind 2001 is afgerond en nieuwe doelsubsidieproject 'Inzicht in Watersystemen - Westerschelde' (IWW). De onderbouwing van het cellenconcept bestaat uit de volgende werkzaamheden:

- 1.1 Het cellenconcept in de bredere context van beleid en beheer. Hierbij zal worden ingegaan op de vragen: Wat is het cellenconcept? Hoe is het ontstaan? Is het cellenconcept een uitwerking van het beleidsbegrip veerkracht? Zo ja, op welke wijze?
- 1.2 Het inventariseren en onderbouwen van de meest cruciale aannamen in het cellenconcept, onder te verdelen in de activiteiten: 1.2a Opzetten en kalibratie van een model op basis van Sobek, 1.2b het daadwerkelijk onderbouwen van de aannamen
- 1.3 Het verbeteren van de theoretische basis van het cellenconcept.
- 1.4 Het maken van een plan van aanpak over hoe de implicaties van natuurwetenschappelijke onzekerheden in het cellenconcept en natuurlijke variabiliteit duidelijk kunnen worden gemaakt voor beleid en beheer tijdens de operationalisering en toepassing van het cellenconcept.

In deze rapportage wordt verslag gedaan van de werkzaamheden 1.1 (hoofdstuk 2), 1.2a (hoofdstuk 3) en 1.4 (hoofdstuk 4). Een uitwerking van de aannamen in het cellenconcept en een verbetering van de theoretische basis van het cellenconcept (activiteit 1.3) staat gepland voor 2002, evenals een stuk operationalisering (resultaatgebied 2) en een stukje toepassing (resultaatgebied 3). Het ontwikkelen van nieuwe strategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud en de eindevaluatie van het project staan op het programma voor 2003.

2 Het cellenconcept Westerschelde en het beleid en beheer

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het cellenconcept Westerschelde. Na een uitleg over wat het concept inhoudt (paragraaf 2.2) wordt het in de bredere context van het beleid en beheer geplaatst. De volgende vragen komen hierbij aan de orde:

- Hoe is het cellenconcept ontstaan en welke rol speelt het in de beleidsdoelen en streefbeelden zoals die in de Lange Termijn Visie Schelde-estuarium zijn verwoord en het huidige beheer (paragraaf 2.3).
- In hoeverre en op welke wijze is het cellenconcept een uitwerking van het beleidsbegrip veerkracht (paragraaf 2.4).

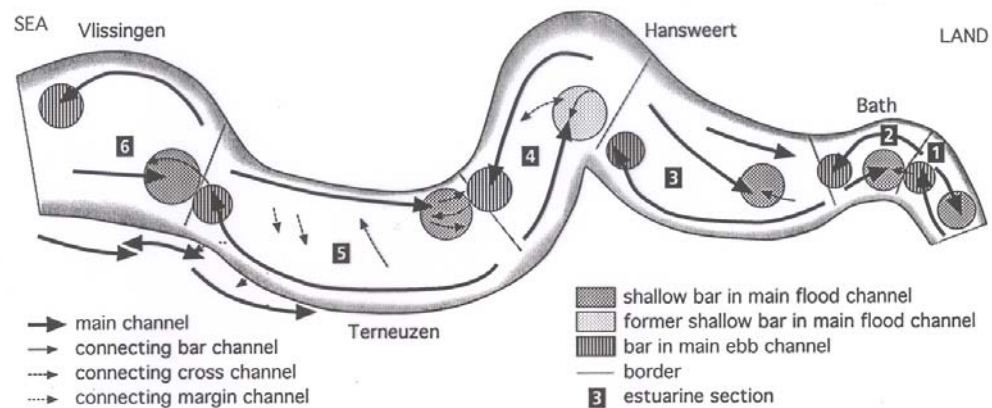
2.2 Wat is het cellenconcept?

2.2.1 Inleiding

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 in paragraaf 2.2.4 een overzicht gegeven van de stortcapaciteit in de Westerschelde en de wijze waarop het stortcriterium moet worden gehanteerd.

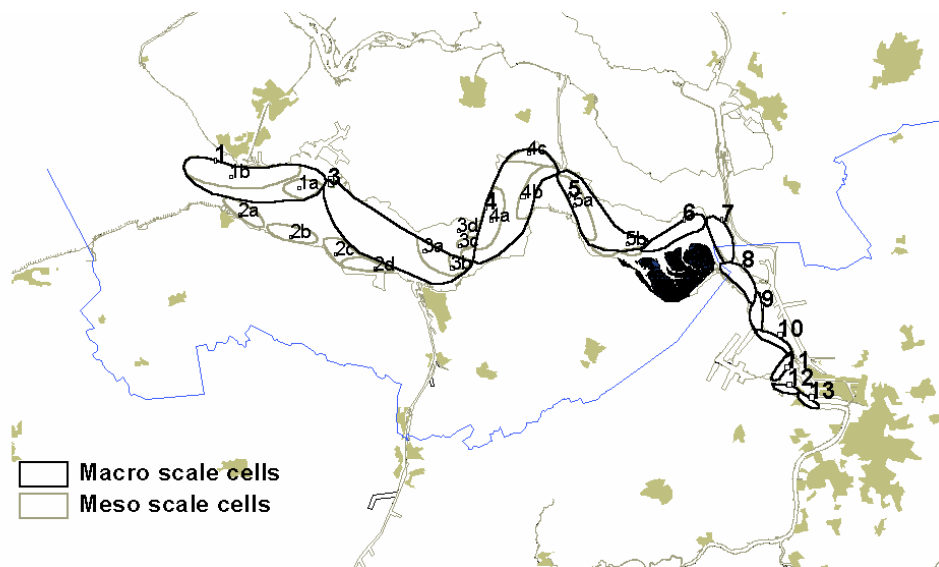
2.2.2 Schematisatie van het geul-plaat systeem

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. 2.1, 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 2.1 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. 2.2) 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. 2.2). 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 2.2 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 Ossensisse, 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.

2.2.3 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 lokale drie-dimensionale stroomverschijnselen. In 1D-modellen wordt de verdeling van het sediment transport en de stabiliteit van een splittingspunt 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):

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

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 verzand. 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-vloedgeulstelsel 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 geulstelsel 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 geulstelsel van de cel instabiel wordt en tendert naar een één-geul-systeem.
- Nagaan in hoeverre de intergetijdegebieden de stabiliteit van het geulstelsel 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 (stabiele 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 $220\mu\text{m}$. 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 netto¹ 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-geulensysteem, waar in de verzande geul gestort wordt, wordt stabiel in plaats van instabiel.

¹ Met netto wordt bedoeld de som van alle ingrepen in de geul.

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 m³/jr).

Getallen voorbeeld: Stel B=2000, H=7m, L=6000m, S=15*10⁶m³/jr dan wordt het kantelen zichtbaar op een tijdschaal van ongeveer 5 jaar.

De tijdsduur van de totale degeneratie van een verondiepende geul ligt tussen de T₂ en T₃:

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

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

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 *10⁶m³/jr en I_{cr}=0,9 *10⁶m³/jr dan duurt het totale degeneratieproces, waarbij het twee-geulsysteem overgaat in een ééngeul-systeem, 30 à 50 jaar (bij continu storten van 2.7Mm³/jr). Voorwaarde is dat het benodigde sediment beschikbaar is.

2.2.4 De transport- en stortcapaciteit in de Westerschelde

Bepaling van de theoretische waarden

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 randvoorwaarde 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 $240\mu\text{m}$. 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 2.1).

Tabel 2.1 Transport- en stortcapaciteiten 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, $M\text{ton/jr}$						
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, Mm^3/jr - <i>profielkuubs</i>						
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, Mm^3/jr - <i>beunkuubs</i>						
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 2.1 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* = 4-10 Mm^3/jaar *beunkuubs*). Tellen we hierbij de jaarlijkse zandwinning van ongeveer 2.4 Mm^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)², afhankelijk van de wijze/plaats waarop er gebaggerd en gestort wordt. Gemiddeld is er in periode 1997-1999 11.4 Mm³/jr. (profielkuubs) gestort en 11.7 Mm³/jr. gebaggerd (0.3Mm³/jr is onttrokken als zandwinning door de Belgen, RWS 2000).

Verificatie en gebruik van het stortcriterium

De theoretische 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.

Op basis van de analyseresultaten wordt voorgesteld om het stortcriterium als volgt toe te passen (Jeuken, 2001; Torenga, 2001):

- Het 10-20%-stortcriterium is van toepassing als in beide geulen netto gestort wordt. In ieder geul mag dan maximaal 10% van de transportcapaciteit netto worden gestort.
- Het 10%-stortcriterium is van toepassing bij de volgende situaties:
 - In één van de geulen wordt netto gestort in de andere geul wordt netto niet ingegrepen.
 - In één van de geulen wordt netto gebaggerd in de andere geul wordt netto niet ingegrepen.
 - In één van de geulen wordt netto gestort in de andere geul wordt *lokaal* gebaggerd, d.w.z. dat het baggeren *niet* gepaard gaat een uitruiming van de aangrenzende geuldelen.
 - In beide geulen wordt netto gebaggerd.
- Het 5-10%-stortcriterium (tussen de 5 en 10%) is van toepassing als in geul 1 netto gestort wordt en het baggeren in geul 2 een *globaal* effect heeft (aangrenzende geuldelen eroderen als reactie op het baggeren). Echter, het verschil tussen het theoretische 10%-stortcriterium $SC_{10\%}$ en de netto baggeromvang $B_{2, \text{globaal}}$ in geul 2 (met een globaal effect) is *groter* dan het 5%-stortcriterium $SC_{5\%}$:

$$SC_{10\%} - B_{2, \text{globaal}} > SC_{5\%}$$

² In de LTV-studie van Winterwerp et al. (2000) wordt de totale stortcapaciteit, inclusief zandwinning, begroot op 5.5-8.6Mm³ (profiel, =6,0-9.5 Mm³ in het beun).

- Het 5%-stortcriterium is van toepassing als in geul 1 netto gestort wordt en het baggeren in geul 2 een *globaal* effect heeft (aangrenzende geuldelen eroderen als reactie op het lokaal baggeren elders in de geul). Echter, het verschil tussen het theoretische 10%-stortcriterium $SC_{10\%}$ en de netto baggeromvang $B_{2, \text{globaal}}$ in geul 2 (met een globaal effect) is *kleiner* dan het 5%-stortcriterium $SC_{5\%}$:

$$SC_{10\%} - |B_{2, \text{globaal}}| < SC_{5\%}$$

2.3 Het cellenconcept en de studie LTV-SE

2.3.1 Ontstaan van het cellenconcept

Het morfologisch gedrag van de Westerschelde wordt gekenmerkt door een meergeulenstelsel en speelt zich af op diverse schalen: de mega-schaal dynamiek (schaal van het hele estuarium), macro-schaal dynamiek (hoofd- en nevengeulen), meso-schaal dynamiek (kortsluitgeulen, plaat-geul uitwisseling) en micro-schaal dynamiek (verandering van beddingvormen). De *basishypothese* van de morfologische studie die door WL in opdracht van de cluster Morfologie van de LTV-SE is uitgevoerd is dat het gehele systeem van geulen en platen in de Westerschelde zichzelf in stand houdt door transport processen op macro- en mesoschaal. Via deze processen vindt dan overdracht plaats naar de mega-schaal van het estuarium. Indien de plaat-geulcomplexen onomkeerbaar worden verstoord, zal het Westerschelde systeem degenereren tot een ééngeulstelsel. Het is dus belangrijk dat de effecten van verstoringen gekwantificeerd kunnen worden op een zodanige manier dat eventueel voorkomen kan worden dat het meergeulensysteem verloren gaat onder invloed van ingrepen. Daartoe is het cellenconcept ontwikkeld. Hierin wordt het Schelde estuarium onderverdeeld in morfometrische eenheden op macro- en meso schaal (cellen bestaande uit een ebgeul, een vloedgeul en de tussenliggende plaat) die elk *afzonderlijk* kunnen worden onderzocht op hun stabiliteit middels de stabiliteitsanalyse beschreven in paragraaf 2.2.3 en gebruikmakend van bathymetrische kaarten en (gesimuleerde) residuele sedimenttransporten.

2.3.2 Rol van het cellenconcept in het huidige beheer

Het beheer van de Westerschelde richt zich op de instandhouding van het meergeulenstelsel met zijn kenmerkende overgangen tussen platen, slikken, geulen en ondiep water. Met deze strategie worden voordelen bereikt voor veel functies van het estuarium, en met name de drie belangrijkste functies Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid. Veiligheid is gericht op veiligheid tegen overstromen, waarin ruimte voor de rivier een belangrijke rol speelt. Toegankelijkheid is gericht op optimale toegang tot de Scheldehavens, en Natuurlijkheid is gericht op behoud en ontwikkeling van natuurwaarden en veerkracht. Onderling zijn de drie functies aan elkaar gerelateerd, omdat bijvoorbeeld maatregelen voor het vergroten van de veiligheid de functies Natuurlijkheid en Toegankelijkheid niet in de weg mogen zitten.

Voor het huidige beheer van de Westerschelde kan het cellenconcept een belangrijke rol spelen, omdat het een hulpmiddel is bij de kwantificering van de stabiliteit van het

meergeulensysteem onder invloed van menselijke ingrepen. Zo kan het effect van de huidige bagger-, stort- en zandwinstrategie op de morfologische ontwikkeling onderzocht en geoptimaliseerd worden door toepassing van het cellenconcept. Met behulp van dit concept kan bijvoorbeeld informatie worden verkregen over

- de maximale stortcapaciteit in de totale Westerschelde, en de lokale verdeling in (macro)cellen van deze stortcapaciteit
- de (on)omkeerbaarheid van de morfologische ontwikkelingen die door het huidige bagger-, stort- en zandwinbeleid in gang is gezet
- een zo optimaal mogelijk gebruik van de stortcapaciteit ten einde ongewenste verondiepingen van geulen te voorkomen.

In het kader van de LTV-SE zijn met behulp van het cellenconcept de grenzen van de stortcapaciteit voor de (huidige) Westerschelde bepaald (zie paragraaf 2.2).

2.3.3 Rol van het cellenconcept in LTV-SE

Bij het beleid en beheer van het Schelde estuarium zijn zowel Nederland als België zeer nauw betrokken. Beide landen hebben overeenkomstige, maar ook tegenstrijdige belangen. Dit maakt het noodzakelijk om, vanuit de drie geprioriteerde functies Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid, te komen tot een bilateraal, integraal Scheldebeleid. Het project LTV-SE (Langetermijn Visie Schelde Estuarium) is uitgevoerd in opdracht van de Technische Schelde Commissie (TSC) en biedt de basis voor de ontwikkeling van een integraal beleid. Voor elk van de drie bovengenoemde functies zijn binnen de LTV-SE beleidsdoelen gesteld. Voor Veiligheid zijn dit eisen t.a.v. te halen hoogwaternormen. Hierbij dient zowel rekening te worden gehouden met natuurlijke ontwikkelingen als ook met de effecten van menselijke ingrepen. Voor Toegankelijkheid zijn dit eisen t.a.v. de toegankelijkheid van de scheldehavens, in combinatie met de natuurlijke draagkracht van het systeem. Voor Natuurlijkheid betekent dit ruimte voor natuurlijke dynamische, fysische, chemische en biologische processen en behoud/versterking van het estuariene ecosysteem met alle typische habitats en levensgemeenschappen langs de volledige zoet-zoutgradient. Op een termijn van 30 jaar is vervolgens in het kader van LTV-SE een Streefbeeld opgesteld met de volgende vijf kenmerken:

1. Instandhouding van de fysieke systeemkenmerken van het estuarium is uitgangspunt van het beheer
2. maximale veiligheid is de belangrijke bestaansvoorwaarde voor beide landen
3. scheldehavens zijn optimaal toegankelijk
4. estuarien systeem is gezond en dynamisch
5. Nederland en Vlaanderen werken bestuurlijk-politiek en operationeel samen

Voor alle drie geprioriteerde functies (zie boven) en voor het daarmee samenhangende Streefbeeld wordt nu de morfologie van het estuarium gezien als de belangrijkste bepalende factor. Zo is de morfologische ontwikkeling van belang voor met name de punten 1 t/m 4 van het Streefbeeld.

Het voorspellen van de lange termijn morfologische ontwikkeling is moeilijk en onderhevig aan grote onzekerheden. Met behulp van het cellenconcept kunnen weliswaar geen uitspraken gedaan worden over de lange termijn morfologische ontwikkeling (als functie van de natuurlijke ontwikkeling en de diverse ingrepen in het systeem), maar kan wel het effect van ingrepen worden gekwantificeerd en gemonitord. Dit biedt vervolgens aanknopingspunten voor een duurzaam beleid en beheer waarbij zo veel als mogelijk

rekening wordt gehouden met de grenzen waarbinnen het systeem in staat is zich op een bepaalde tijdschaal te herstellen.

De uitwerking van het cellenconcept (in opdracht van het cluster Morfologie van de LTV-SE) is na afronding door onafhankelijk onderzoekers beoordeeld. Hoewel het zeker nog onderbouwing behoeft (zie hoofdstuk 3) heeft de TSC vastgesteld dat het cellenconcept (en de overige onderzoeken die in het kader van het cluster Morfologie zijn uitgevoerd) voldoende basis bieden voor het opstellen van een Langetermijnvisie.

2.4 Het cellenconcept als uitwerking van het beleidsbegrip veerkracht

2.4.1 Het beleidsbegrip veerkracht

In de vierde Nota Waterhuishouding (1998) heeft het beleidsbegrip veerkracht voor het eerst een centrale plaats gekregen in het waterbeleid. In deze Nota wordt gesproken over ‘een veerkrachtig watersysteem’ waarmee wordt bedoeld dat het systeem, of onderdelen daarvan, in staat moet zijn zodanig te reageren op veranderende omstandigheden of verstoringen dat essentiële kenmerken van het systeem hersteld worden. Het begrip is tegengesteld aan het begrip ‘weerstand’, hetgeen in de context van waterbeleid betekent dat het water wordt ‘bedwongen’ met behulp van dijken, het afsluiten van zeearmen, door intensieve kustverdediging etc. Nadeel van een dergelijke strategie is dat de natuurlijke eigenschappen van het systeem regelmatig geweld worden aangedaan. In het verleden was dit minder belangrijk omdat de nadruk van het waterbeheer destijds op veiligheid en economisch rendement lag. Tegenwoordig hechten we steeds meer belang aan behoud van natuurwaarden, maar wel in combinatie met veiligheid en economische ontwikkeling. Bij watersystemen die alleen op basis van een weerstandstrategie beheerd worden zullen steeds vaker aanvullende maatregelen nodig zijn om ongewenste neveneffecten, met name op het gebied van natuurwaarden, het hoofd te bieden. Deze aanvullende maatregelen kunnen echter ook weer leiden tot ongewenste neveneffecten. Een vicieuze cirkel die doorbroken lijkt te kunnen worden door in plaats van een weerstandstrategie een veerkrachtstrategie te volgen in het waterbeheer.

Voor het beheer van het Westerschelde estuarium betekent dit een grote verandering. De huidige vorm van de Westerschelde is het resultaat van een eeuwenlange strijd tegen het water (weerstandstrategie). Door landaanwinning, het uitdiepen van de geulen naar de haven van Antwerpen, het storten van gebaggerd materiaal en zandwinning, is de vorm van de Westerschelde in de loop der jaren sterk veranderd. Door de vormverandering en de volumeverandering van de (hoofd)geulen zijn de getijkarakteristieken in het systeem fors veranderd. Dit heeft (negatieve) gevolgen voor de veiligheid en de natuurlijkheid van het systeem.

Toepassing van een veerkrachtstrategie voor het Westerschelde estuarium betekent dat het beleid erop gericht moet zijn dat de veerkracht van het systeem vergroot wordt. Dit houdt in dat het systeem snel in staat moet zijn na een verstoring zich weer in oude staat, met behoud van de belangrijkste essentiële kenmerken, te herstellen. Bij verstoringen kunnen we denken aan natuurlijke (seizoens)dynamiek, incidentele natuurlijke extremen, lange termijn autonome ontwikkelingen en verstoringen door menselijke invloeden. Essentiële kenmerken worden bepaald door de functie die de mensen aan (delen van) het estuarium hebben toegekend: dit zijn bijvoorbeeld vaargeuldiepte, zoutindringing, ondiepwater areaal, etc. Bij

ieder kenmerk kan de vraag worden gesteld of het veerkrachtig reageert op een bepaalde verstoring. Dit betekent dat de totale veerkracht van het systeem wordt bepaald door (de som van) de veerkracht van de afzonderlijke essentiële kenmerken.

Bij het zoeken naar concrete maatregelen om de veerkracht van watersystemen te versterken zijn door RIKZ en RIZA in het document ‘Werken met water, veerkracht als strategie’ een aantal gidsprincipes gedefinieerd die een hulpmiddel zijn bij het denken over vernieuwingen in het waterbeheer.

A. Gidsprincipes voor versterking van de veerkracht van watersystemen:

1. natuurlijke dynamiek: waar is deze beperkt en hoe is dit te herstellen
2. ruimte: welke gebieden moeten (weer) onder de invloedssfeer van water komen te vallen
3. netwerken: hoe kunnen we ontsnippering tegengaan/herstellen
4. differentiatie: is er voldoende variatie in de inrichting van het watersysteem?
5. gradienten: heeft het systeem voldoende geleidelijke overgangen of overheersen harde grenzen?

B. Gidsprincipes voor aanpassing van beleid, inrichting, beheer en gebruik van het watersysteem:

1. waterbewustzijn: zorg dat mensen bewust worden (kosten/baten) van wat het betekent in een waterland te wonen
2. afwenteling van problemen: houd rekening met interactie met omliggende systemen
3. prioriteiten in functietoekenning: niet teveel functies, creëer prioriteiten of zonering van functies
4. ruimte in functie-eisen: houd rekening met natuurlijke processen, zorg zoveel mogelijk voor omkeerbare maatregelen
5. inrichting naar natuurlijke karakteristieken: sluit aan bij natuurlijke patronen en processen
6. draagkracht normstellend: hoe wordt het watersysteem door de mens gebruikt en kan het systeem dit verwerken

2.4.2 Het cellenconcept en veerkracht

De gidsprincipes, genoemd in paragraaf 2.4.1., kunnen worden uitgewerkt voor de Westerschelde met als doel het verkrijgen van praktische hulpmiddelen voor het instellen en handhaven van een veerkrachtig estuarium beheer. Het cellenconcept kan tot een van deze praktische hulpmiddelen worden gerekend daar waar het gaat om het vinden van nieuwe geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning (zandbeheer) in de Westerschelde. Zo kan het cellenconcept met name toegepast worden

- bij gidsprincipe A1, omdat het middels het stortcriterium (zie paragraaf 2.2.4) kan aangeven in hoeverre vaargeulonderhoud en zandwinning de natuurlijke dynamiek in stand houden dan wel belemmeren (gaat het systeem (lokaal) ‘kantelen’ of niet).
- bij gidsprincipe A4. Dit principe geeft aan dat het behoud van het meergeulensysteem (meer differentiatie) leidt tot een veerkrachtiger systeem met een groter herstelcapaciteit. Het cellenconcept is juist ontwikkeld om het meergeulensysteem op een abstracte manier te beschrijven en te hanteren.
- bij gidsprincipes B5 en B6. Ook hier speelt het stortcriterium en de (natuurlijke) stabiliteit van de afzonderlijke morfometrische eenheden een rol. Door kwantificering van de stabiliteit van de morfologische cellen als functie van menselijke ingrepen (m.b.v.

modelresultaten of data analyse) kan het gebruik van het systeem zo aangepast worden dat de natuurlijke stabiliteit en herstelcapaciteit van de morfologische cellen zo min mogelijk wordt aangetast.

3 Een morfologisch model voor de kwantificering van aannamen en onzekerheden in het cellenconcept

3.1 Inleiding

Het cellenconcept Westerschelde is gebaseerd op verschillende aannamen (paragraaf 3.2) met als gevolg onzekerheden in de grootte van het stortcriterium. Een aantal van deze aannamen en onzekerheden zal naar verwachting aansluiten bij technische en praktische vragen vanuit het beheer. Eén van de doelen van het project bestaat uit het onderbouwen van deze aannamen (zijn ze juist?) en het kwantificeren van de onzekerheden in het stortcriterium ten gevolge van deze aannamen (zie paragraaf 1.2). Voor deze onderbouwing en kwantificering is een 1-dimensionaal morfologisch model van de Westerschelde opgezet op basis van het software pakket Sobek. De opzet en validatie van dit model worden in dit hoofdstuk beschreven.

3.2 Aannamen in het cellenconcept

Het cellenconcept, zoals beschreven in paragraaf 2.2, kent een aantal belangrijke aannamen. Dit zijn voornamelijk modeltechnische aannamen die voortkomen uit een gebrek aan kennis (kennisleemten in het modelleren). Deze aannamen worden in de navolgende alinea's toegelicht.

Aanname 1: de stabiliteitrelatie zoals die is afgeleid voor rivieren is van toepassing op getijgebieden. De relatie zegt dat voor grote waarden van de coëfficiënt k in de knooppuntrelatie het geulsysteem stabiel is en voor kleine waarden instabiel. Voor de kritische waarde van k geldt $k = n/3$, waarbij n de macht van de snelheid in de transportrelatie is. Een hiermee samenhangende aanname is dat de totale sediment transportcapaciteit over één representatief getij (som van het absolute transport tijdens eb en vloed) bepalend is voor de stabiliteit van het geulsysteem en niet de residuele transportcapaciteit. Het stortcriterium bedraagt dan circa 10% van die totale transportcapaciteit. Baggeren heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem.

Aanname 2: het eb- vloedgeul karakter van het geulsysteem heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium. De bruto en ook de residuele sediment transportcapaciteit vertonen ruimtelijke variaties die samenvallen met variaties in de geometrie in de lengterichting van de geul: in de ondiepere maar bredere drempelgebieden van de geulen is de transportcapaciteit vaak groter dan in de diepere inloop van de geul. Deze ruimtelijke variatie wordt verondersteld geen invloed te hebben op het stortcriterium.

Aanname 3: de autonome ontwikkeling van het geulenstelsel heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium. Het geul-plaatsysteem in de cellen wordt verondersteld in evenwicht te zijn (niet te veranderen). Ontwikkelingen waarbij geulen van nature eroderen

of sedimenteren worden dus (nog) niet door het concept beschreven; er wordt verondersteld dat deze ontwikkelingen geen invloed hebben op de grootte van het stortcriterium. Dergelijke tendensen, waarbij de ene geul van nature erodeert en de andere sedimenteert, zijn echter wel waargenomen (Jeuken, 2000, 2001).

Aanname 4: voor de grootte van het stortcriterium maakt het niet uit of er gelijkmatig in de gehele geul of in een klein vak binnen de geul wordt gestort. Deze aanname hangt waarschijnlijk samen met de tweede en derde aanname. In de analyses tot dusverre worden de ingrepen (storten, baggeren en zandwinnen) uitgesmeerd over de gehele lengte van de geul. In de praktijk gebeurt dit lokaal: baggeren en storten vindt plaats in specifieke bagger- en stortvakken binnen een geul.

Aanname 5: de sedimentuitwisseling tussen cellen / bochtgroepen heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium. Deze aanname hangt samen met aanname 3. Het cellenconcept richt zich expliciet op individuele morfologische cellen. De sedimentuitwisseling tussen macrocellen, en de eventuele rol van mesocellen daarin (Jeuken, 2000), worden niet door het concept beschreven. Achterliggende gedachte c.q. aanname is dat de instandhouding van het gehele meergeulenstelsel gewaarborgd is als individuele macrocellen kunnen worden gehandhaafd.

Aanname 6: zeespiegelstijging heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem en de grootte van het stortcriterium. Deze aannamen kan niet met het 1D morfologische model worden geverifieerd. Wel is het mogelijk om het effect van deze aanname te onderzoeken met behulp van de theoretische stabiliteitanalyses (activiteit 1.3).

Aanname 7: de invloed van de plaat-geul interactie op de stabiliteit van het geulsysteem en de grootte van het stortcriterium is klein. Dit volgt uit eerdere stabiliteitsanalyses waarin vereenvoudigende aannamen zijn gemaakt voor de formulering van de plaat-geulinteractie (Winterwerp e.a., 2000; Torenga, 2001). Uit deze vereenvoudigende aannamen blijkt dat platen een licht destabiliserende werking hebben. Grootste onduidelijkheid is echter de juiste formulering van de plaat-geulinteractie; hierover is nog zeer weinig bekend (is onderwerp van lopend promotieonderzoek).

3.3 Opzet van het model

3.3.1 Netwerk en bodemschematisatie

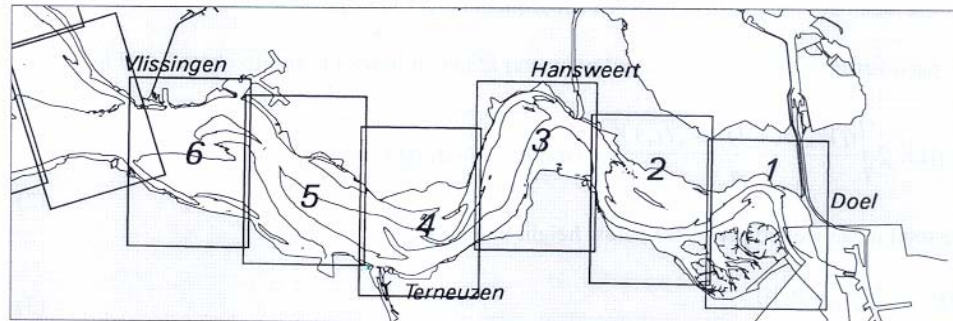
Voor de huidige studie zijn twee modelopzetten gemaakt:

1. een één-tak model, en;
2. een celmodel

beiden gebaseerd op het software pakket Sobek. Het één-tak model is als eerste opgezet en vormde de basis voor het maken van het celmodel. Beide modellen worden in de volgende alinea's kort toegelicht.

Het één-tak model

Voor het opzetten van het één-tak model van de Westerschelde is uitgegaan van de verdeling in zes vaklodingsbladen (zie Fig. 3.1) en de ervaringen van Schoeman (2000). In Sobek wordt de geometrie van het geul-plaat systeem beschreven door de variatie van de breedte als functie van de diepte. Deze schematisatie van het geulsysteem in de Westerschelde is afgeleid uit de hypsometrische krommen³ van de zes lodingsvakken in 1994 en een schatting van de lengte van het estuarium in ieder lodingsvak. De variatie van de breedte als functie van de diepte $B(z)$ is bepaald door het wateroppervlak op een bepaalde diepte te delen door de lengte.



Figuur 3.1 Verdeling van de Westerschelde in zes vaklodingsbladen (Jeuken, 2000).

De bodem van het riviersysteem tussen de grens Nederland-België en Gent is in sterk geschematiseerde vorm aan het model toegevoegd om het gedeeltelijk progressieve karakter van de getijgolf te kunnen simuleren. Hiervoor is gebruik gemaakt van de dwarsprofielen in het model van Schoeman (2000). Dit resulteert in een één-tak model dat het estuarium van Vlissingen tot aan Gent beschrijft.

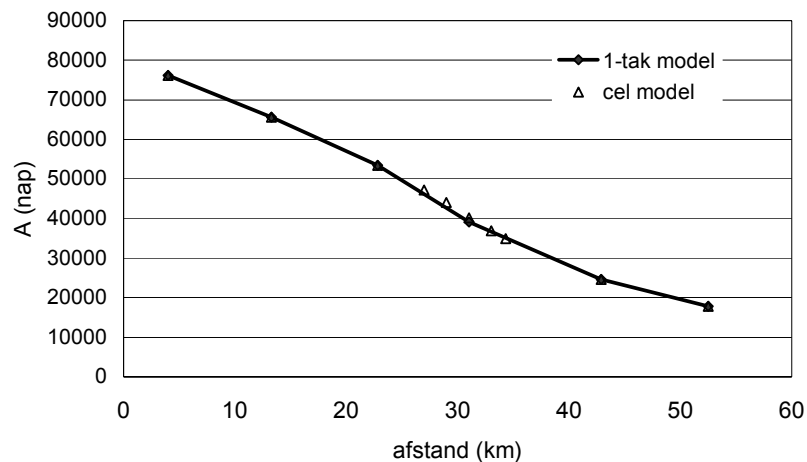
Het schorgebied Land van Saeftinghe, dat vooral een kombergingsfunctie heeft, is niet in het model geschematiseerd. De invloed van Saeftinghe op de simulatie van de algemene waterbeweging in het model is vrij klein (zie paragraaf 3.4), terwijl het meenemen van dergelijke doodlopende takken vermoedelijk tot (stabiliteits)problemen leidt in morfologische berekeningen.

Tot slot wordt opgemerkt dat de standaard Sobek-methode voor het interpoleren van de profielen $B(z)$ voor de Westerschelde niet goed werkt. Daarom is het verfijnen van het netwerk gebaseerd op een handmatige interpolatie (om de ca. 2 km) van de diverse profielen.

Het celmodel

³ hypsometrische krommen ook wel kombergingsgrafieken genoemd, zijn grafieken die de verdeling van het wateroppervlak en -volume als functie van de waterdiepte beschrijven. Deze grafieken zijn ondermeer voor de zandbalans Westerschelde bepaald (De Jong, 2000).

Het Sobek één-tak model is vervolgens uitgebreid tot het celmodel door de geometrie van één macrocel in te voeren. Het gaat hierbij om het geulsysteem Middelgat en Gat van Ossenise ten zuiden van Hansweert in 1994 (vaklodingsblad 3 in Fig. 3.1). Voor de schematisatie van dit gebied is gebruik gemaakt van informatie over de verdeling van $B(z)$ tussen eb- en vloedgeul zoals bepaald door Jeuken (2000). De relatieve verdeling van $B(z)$ is opgelegd aan het één-tak model om er voor te zorgen dat beide modellen consistent zijn qua totale doorstroomoppervlak. De consistentie tussen beide modellen wordt bevestigd door Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Totale doorstroomoppervlak ten opzichte van NAP in het één-tak model en het celmodel als functie van de afstand (in km) tot de monding.⁴

De basiskkenmerken van de geometrie van het geulsysteem in de macrocel zijn samengevat in tabel 3.1. Hieruit blijkt dat de macrocel in 1994 niet geheel gekenmerkt wordt door een

Tabel 3.1 Geometrische eigenschappen van het eb- vloedgeulsysteem in het celmodel 1994

afstand tot monding (km)	$A \text{ (m}^2\text{)}$		Breedte (m)		$R \text{ (m)}$	
	vloedgeul	ebgeul	vloedgeul	ebgeul	vloedgeul	ebgeul
27	28065	19171	1841	2557	15,2	7,5
29	25907	18165	1768	2456	14,7	7,4
31	21419	18794	2230	1721	9,6	10,9
33	20108	16804	2289	1479	8,8	11,4
34,6	19118	15830	2217	1432	8,6	11,1

klassiek eb-vloedgeul systeem: de vloedgeul is gemiddeld namelijk dieper (11.4m) dan de ebgeul (9.7m). Dit hangt samen met de zogenaamde functiewisseling: in 1955 heeft de

⁴ Het totale doorstroomoppervlak op de zeewaartse rand van de macrocel volgens de gegevens van Jeuken (2000) is ca. 29.% kleiner dan in het celmodel en het één-tak model. Op de landwaartse rand komen de absolute waarde van Jeuken (2000) en de modellen wel overeen.

ebgeul het grootste doorstroomoppervlak en diepte. Deze situatie is wel kenmerkend voor een klassiek eb-vloedgeulstelsel. Tussen 1955 en 1994 is de ondiepe drempel in vloedgeul doorgebroken en geërodeerd waardoor er een soort bochtasfijding van de ebgeul heeft plaatsgevonden (voor meer details zie bijv. Jeuken, 2000). Hierdoor heeft de vloedgeul in 1994 het grootste doorstroomoppervlak en diepte. Het verloop van de geuldiepte en -breedte in beide geulen is in 1994 wel karakteristiek voor eb- en vloedgeulen: in de vloedgeul neemt de breedte toe en diepte af in landwaartse richting. In de ebgeul neemt de breedte toe en diepte af in zeewaartse richting.

3.3.2 Randvoorwaarden

Waterbeweging

Voor de hydrodynamische randvoorwaarden op de zeerand van het Sobek cel-model (de lijn Vlissingen-Breskens) is uitgegaan van de waterstanden van 11 en 12 mei 1971 zoals die ook in het gekalibreerde Implic-Estmorph⁵ model van de Westerschelde worden gebruikt. Dit is een matig ontwikkeld springtij (gemiddeld tij +7-10%), ook wel aangeduid als morfologisch getij. Hoewel het hier relatief oude waterstandsgegevens betreft, is hier om verschillende redenen voor gekozen:

- Ten eerste is het voor het doel van deze studie niet nodig dat de waterbeweging in de Westerschelde in al haar details wordt gesimuleerd. De voortplanting van de getijgolf en de aanwezigheid van de karakteristieke residuele circulatiepatronen op macroschaal moeten kwalitatief overeenkomen.
- De resultaten van het gekalibreerde Implic/Estmorph model kunnen hiervoor als referentie worden gebruikt.
- Het verticale getij bij Vlissingen is slechts weinig veranderd sinds 1971.

De getijrandvoorwaarden zijn cyclische gemaakt. Op de landrand van het Sobek cel-model (Gent) is geen rivierdebiet voorgeschreven om de interpretatie zo gemakkelijk mogelijk te houden. Bovendien heeft een afvoer van slechts 29m³/s bij Gent, zoals gebruikt in eerdere Implic/Estmorph studies (zie bijv. Van der Weck en Jeuken, 1999), geen noemenswaardige invloed op het getij in de Westerschelde.

In de uiteindelijke simulaties zijn de ruimtelijk variërende Chezy-ruwheden van Schoeman (2000) gebruikt. Voor eb en vloed zijn steeds dezelfde waarden gebruikt:

monding	55.5 m ^{0.5} /s	naar	zeerand macrocel	52.4
begin cel	52.4	naar	eind cel	50.2
eind cel	50.2	naar	Valkenisse gebied	42.6
Valkenisse	42.6	naar	grens	40
grens	40	naar	Antwerpen	65
Antwerpen	64	naar	Gent	45

⁵ het Implic/Estmorph model beschrijft het estuarium van Vlissingen tot Gent. De waterbeweging wordt met Implic berekend. De bodemschematisatie in Implic bestaat uit een specificatie van de breedte, doorstroomoppervlak en hydraulische straal tussen NAP-2.5m en NAP+5m. Sobek gaat uit van de variatie in breedte als functie van de waterdiepte.

Sediment transporten

In het Sobek cel-model zijn de zandtransporten berekend met behulp van de transportformulering van Engelund-Hansen, conform de eerdere studies van Wang en Winterwerp (2001) en Winterwerp e.a.(2001). Voor de D_{50} -waarde van het bodemmateriaal is uitgegaan van 225 μm . Voor de waarde van k in de knooppuntrelatie is uitgegaan van $k=2$ (zie hoofdstuk 2 en paragraaf 3.2).

3.4 Validatie van het één-tak model

3.4.1 Het verticale getij

Observaties

Het ruimtelijk verloop van de getijslag in het estuarium is kenmerkend voor hypersynchrone estuaria (Nichols en Biggs, 1985). De getijslag neemt toe van 3.8 meter bij Vlissingen, via 4.8m bij Bath tot 5.3 meter net bovenstrooms van Antwerpen (tijdens gemiddeld tij), om vervolgens weer af te nemen tot 2 meter vlak voor Gent.

De rijzing van het getij duurt korter dan de daling: het verticale getij heeft een vloedgedomineerde duurasymmetrie. Het tijdsverschil tussen rijzing en daling neemt landwaarts toe. Bij Vlissingen bedraagt het tijdsverschil tijdens gemiddeld getij ongeveer een half uur, bij Antwerpen is dat 2 uur en nabij Gent bijna 4 uur. Deze duurasymmetrie neemt verder toe met de getijslag: in Bath bijvoorbeeld, is het duurverschil 30 minuten tijdens doottij en 70 minuten tijdens springtij.

De getijgolf in het estuarium heeft een gedeeltelijk progressief karakter: het faseverschil tussen het verticale en horizontale getij bedraagt ongeveer 2,5 uur, wanneer wordt gekeken naar de nuldoorgangen en de fasen van de M_2 -getijcomponent. Dit karakter van de getijgolf en de vloedgedomineerde duurasymmetrie van het verticale getij gaan gepaard met een asymmetrie in het horizontale getij: de over de totale dwarsdoorsnede geïntegreerde maximale debieten en snelheden zijn tijdens vloed groter dan tijdens eb. De kleine rivierafvoer resulteert in een klein zeewaarts gericht restdebiet. Ook de stroomkromme zelf is asymmetrisch van vorm: De maximale vloeddebieten en -snelheden treden ongeveer 1 uur voor hoog water op, gedurende een korte periode. Deze periode wordt voorafgegaan door een periode van relatief lage snelheden en debieten tijdens het onderlopen van de intergetijdegebieden. De snelheden en debieten tijdens eb vertonen een geleidelijker verloop en bereiken hun maximale waarde bij een waterstand van ongeveer NAP-niveau. De gemiddelde waterstand is tijdens ebstroom lager dan tijdens vloedstroom. Dit veroorzaakt, naast de rivierafvoer, een kleine zeewaarts gerichte restsnelheid (de zogenaamde Stokes' drift).

Model

Tijdens het valideren van het Sobek model is nagegaan in hoeverre de bovengenoemde aspecten van de getijvoortplanting goed worden gesimuleerd in met name de Westerschelde.

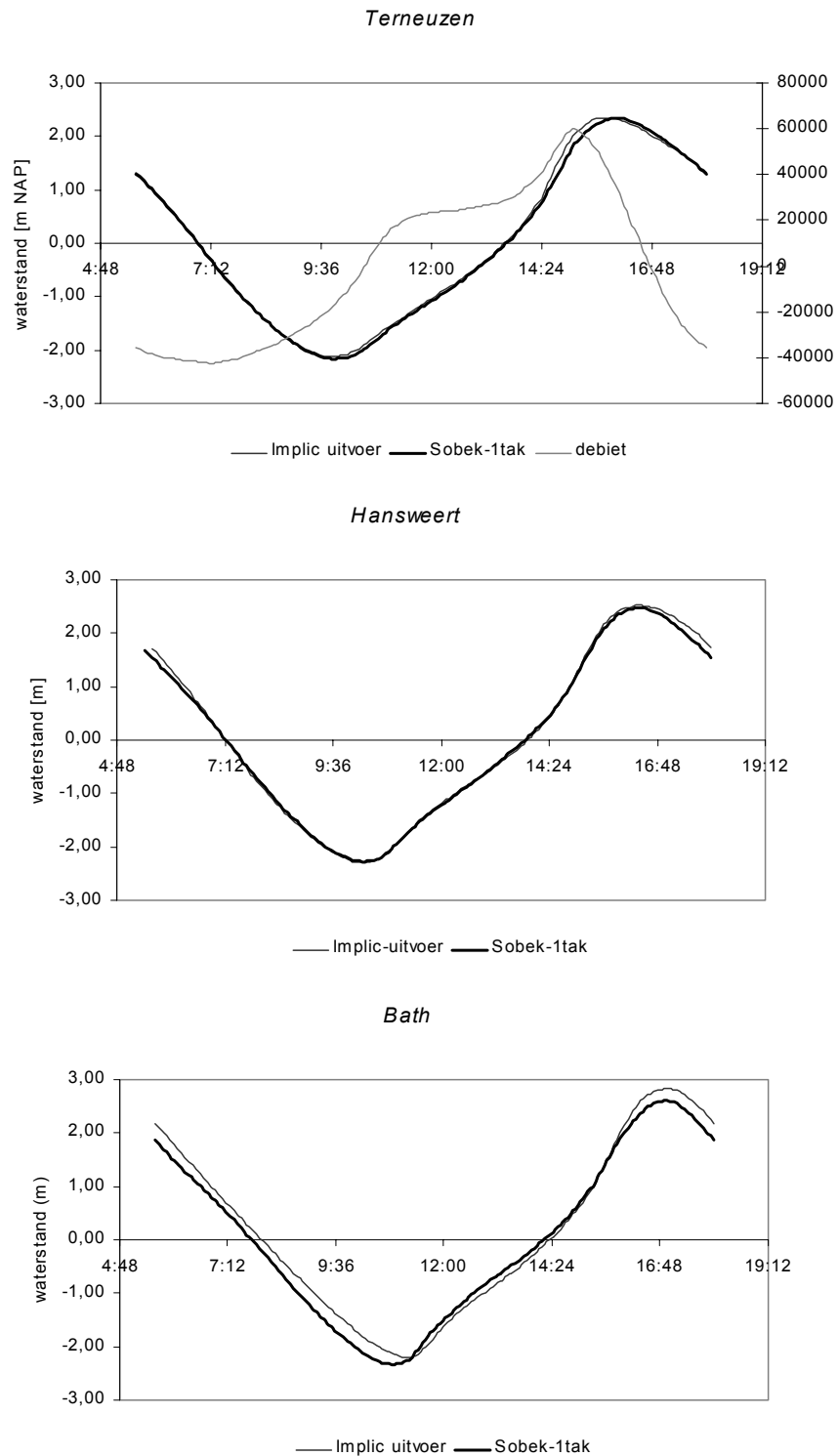
Hiervoor zijn de resultaten van het gekalibreerde Implic/Estmorf model als referentie gebruikt. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het Implic/Estmorf model betrekking heeft op de morfologische situatie van 1968 en niet die van 1994. De belangrijkste veranderingen in het verticale getij in de Westerschelde die in de tussenliggende periode zijn opgetreden hebben betrekking op het waterstandsstation Bath. Sinds begin jaren zeventig, toen de eerste grootschalige verdieping van de vaargeul is uitgevoerd, is het getijverschil in dit station met ca. 0.24m toegenomen (zie bijv. Claessens en Meyvis, 1994; Vroon et al, 1997, Dillingh en Heinen, 1994). Het hoog water is circa 0.12m gestegen en het laagwater is met 0.12m gedaald (Dillingh en Heinen, 1994). De veranderingen in het verticale getij ter hoogte van Vlissingen, Terneuzen en Hansweert gedurende de periode 1970-1994 zijn kleiner dan 0.1m en zijn voor de huidige studie niet relevant. De loopsnelheid van de getijgolf is de Westerschelde niet noemenswaardig veranderd sinds 1970.

Het één-tak model reproduceert de waterstanden goed in de stations Terneuzen en Hansweert (Fig. 3.3). In Bath is de overeenkomst tussen beide modellen duidelijk minder goed:

- Het laagwater niveau is in het Sobek model 1994 ca 0.12m lager dan in het Implic-model van 1968. Dit komt overeen met de opgetreden veranderingen in het laagwaterniveau tussen 1968 en 1994 (zie boven).
- In het Sobek-model is het ca 15 minuten eerder laagwater dan in het Implic model. Het faseverschil in de nuldoorgang tijdens eb bedraagt slechts 5 minuten. Dit zijn acceptabele verschillen.
- De grootste afwijkingen hebben betrekking op de reproductie van de hoogwaterstand. Het hoogwater in het Sobek model is 0.23m lager dan in het Implic model. Nemen we de toename van 0.12m tussen 1968 en 1994 mee, dan is het hoogwater in het Sobek in totaal 0.35m te laag. Echter, uit een vergelijking tussen het gekalibreerde Implic model en waarnemingen van 1971 blijkt dat het Implic model het hoogwater bij Bath circa 0.12m overschat (zie bijv. Van der Weck en Jeuken, 1999). Nemen we dit mee dan betekent dat het Sobek model 1994 het hoogwater bij Bath met 0.23m onderschat.

De afwijking in met name het hoogwater in Bath zal gepaard gaan met iets te kleine getijvolumina zeewaarts van Bath. De oorzaak van het te lage hoog water in Bath wordt waarschijnlijk vooral veroorzaakt door potentiële fouten in de bodemschematisatie:

- De riviertak landwaarts van de grens Nederland-België is op een vereenvoudigde manier geschematiseerd. Bij het afleiden van de dwarsprofielen uit beschikbare inhoudsberekeningen is aangenomen dat de hypsometrische curven in dit deel van het estuarium dezelfde vorm hebben als in de Westerschelde (voor details zie Schoeman, 2000). De richting en grootte van de fouten hierin zijn niet bekend.



Figuur 3.3 Het verloop van de waterstanden in de Westerschelde in het Implic en Sobek 1-tak model. Voor het Sobek model is tevens de debietkromme ter hoogte van het waterstandstation Terneuzen weergegeven. Vlissingen is de zeewaartse rand van het model.

- Mogelijke fouten in de geschatte lengten van het geul-plaatsysteem in de lodingsvakken 1 en 2 beïnvloeden het doorstroomoppervlak en de getijdoordringing (getijslag). Een te grote lengte gaat gepaard met een te klein doorstroomoppervlak en een geringere getijslag in Bath.

Daarnaast ontbreekt het Land van Saeftinghe in het model. Echter, de getijvoortplanting vertraagt en de getijslag bij Bath neemt iets af door de aanwezigheid van dit kombergingsgebied. Uit een gevoeligheidsberekening blijkt dat de getijvolumina zeewaarts van het Land van Saeftinghe ongeveer 10-20 Mm³ groter door het toevoegen van het Land van Saeftinghe.

Het gedeeltelijk progressieve karakter van de getijgolf blijkt duidelijk uit Figuur 3.3: het fase verschil tussen horizontaal en verticaal getij bedraagt inderdaad 2.5 uur. Ook de asymmetrische vorm van de waterstandskromme en de debietkromme zijn kwalitatief juist: het verticale getij heeft een vloed gedomineerd duurasymmetrie. De maximale vloeddebieten zijn groter dan de maximale ebdebieten. Bovenstaande betekent dat het model de algemene karakteristieken van de getijvoortplanting in de Westerschelde voor de huidige studie goed genoeg weergeeft.

3.4.2 Het horizontale getij

Om een inzicht te krijgen in hoe goed het model het horizontale getij weergeeft, zijn gemeten en berekende getijvolumina met elkaar vergeleken. Hiervoor zijn de gemeten en naar gemiddeld tij herleide getijvolumina in de debietraaien 10, 7, 6, 2 en 1 (zie Fig. 3.4) vermenigvuldigd met een factor 1.08 om ze vergelijkbaar te maken met de morfologische getijcondities in de berekeningen. Tabel 3.2 geeft een overzicht.

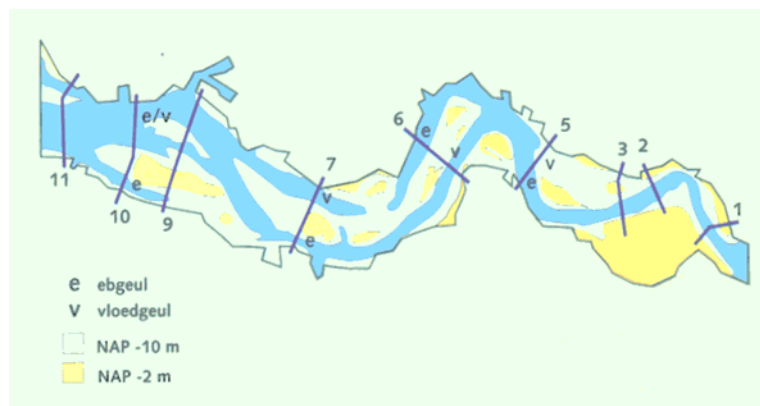


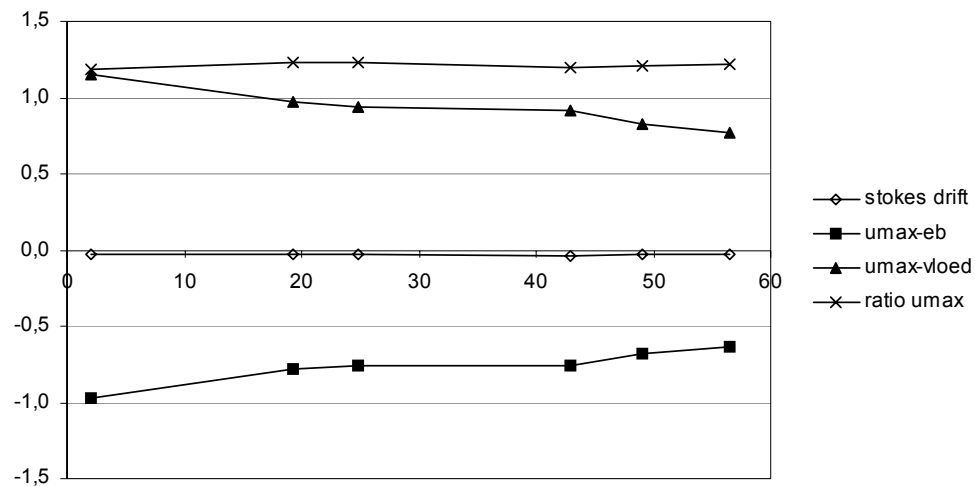
Fig. 3.4 Locatie met debietraaien (uit Vroon et al., 1997)

De berekende getijvolumina in het model zijn overwegend 5-10% kleiner dan de waargenomen getijvolumina, met name in het interesse gebied, raai 6 (Tabel 3.2). De verschillen vallen echter binnen de nauwkeurigheid van de metingen (10%) en eventueel kleine afwijkingen doordat de meetraai en de modelraai niet geheel samenvallen. De mogelijk iets te kleiner getijvolumina zeewaarts van Hansweert worden deels verklaard door het ontbreken van het kombergingsgebied 'Land van Saeftinghe' en de te kleine getijslag (hoogwater) bij Bath.

Tabel 3.2 Gemeten en naar Sobek tij herleide getijvolumina (=gemiddeld tij waarden * 1.08) en de met het Sobek model berekende getijvolumina. De Sobek observaties vallen niet precies samen met locatie van de debietraaien. Voor de debietraaien is de gemeten range van waarden weergegeven.

debietraai	observaties	Sobek één-tak model	verschil (in Mm^3 , %)
10	1044	1077	-30 (3%)
7	730-760	681	50-80 (4-9%)
6	540-570	497	40-70 (7-14%)
2	230	219	10 (5%)
1	163	171	-8 (5%)

Enkele andere hydrodynamische gegevens zijn samengevat in Figuur 3.5. Concreet gaat het om de residuele (getijgemiddelde) stroomsnelheden en het verloop van de maximale eb- en vloodsnelheden en de verhouding van deze snelheden.



Figuur 3.5 Berekende residuele en maximale eb en vloed stroomsnelheden en de verhouding tussen de snelheden langs de Westerschelde. Negatief is ebgedomineerde (zeewaarts gerichte) snelheid, positief is vloedgedomineerde snelheid.

Figuur 3.5 toont de volgende kenmerken:

- De residuele stroomsnelheden in het één-tak model zijn ebgedomineerd en variëren tussen de -0.024 en -0.037 m/s.
- De maximale snelheden, gecorrigeerd voor het effect van de ebgedomineerde restsnelheid, nemen landwaarts geleidelijk af.
- De maximale vloedstroomsnelheden zijn 18-23% groter dan de maximale ebsnelheden. De dwarsdoorsnede gemiddelde vloodsnelheden variëren tussen de 0.77 en 1.15 m/s. De ebsnelheden variëren tussen de 0.64 en 0.97 m/s. In de Terneuzen bochtgroep, op een afstand van 19-25 km zijn de maximale ebsnelheden orde 0.8 m/s en de maximale vloodsnelheden 0.9-1.0m/s.

Een vergelijking met eerdere studies leert het volgende: Gedetailleerde debietmetingen ter hoogte van raai 7 (op een afstand van ca 20 km van de monding), tijdens een sterk ontwikkeld springtij, duiden op een ebgedomineerde reststroming van circa 0.02m/s

(Jeuken, 2000). Dit komt qua orde van grootte en richting overeen met de waarden gevonden in het huidige Sobek model. Deze zeewaarts gerichte reststroming wordt veroorzaakt door het faseverschil tussen verticaal en horizontaal getij: als gevolg van dit faseverschil is de gemiddelde waterstand tijdens vloedstroming (NAP+0.3m) hoger dan tijdens ebstroming (NAP-0.4m). Met andere woorden het doorstroomoppervlak is tijdens ebstroom kleiner dan tijdens vloedstroom, waardoor de gemiddelde ebsnelheid groter is dan de gemiddelde vloodsnelheid. Dit resulteert in de ebgedomineerde reststroming, die ook wel wordt aangeduid als Stokes' drift (Bakker en de Vriend, 1995; Jeuken en Wang, 2000; Jeuken, 2000). Schoeman (2000) vindt vergelijkbare reststroomsnelheden.

Over het verloop van de maximale snelheden langs het estuarium is weinig bekend. In theorie kan dit worden afgeleid uit debietmetingen en proces-georiënteerde waterbewegingsmodellen.

Jeuken (2000) beschrijft de variatie in maximale stroomsnelheden in de Terneuzen bochtgroep op basis van debietmetingen en een 2D-waterbewegingsmodel op een afstand van ca 20 en 25 km vanaf de monding (Tabel 3.3). De waarden in deze tabel suggereren dat de snelheden in het Sobek model wellicht iets aan de lage kant zijn (orde 5-10%). Dit beeld past bij de geconstateerde verschillen tussen waargenomen en berekende getijvolumina (4-9%).

Tabel 3.3 Vergelijking van maximale stroomsnelheden in het Sobek model en volgens gegevens van Jeuken (2000). De vergelijking heeft betrekking op de Terneuzen bochtgroep.

Bron	maximale ebsnelheid (m/s)	maximale vloodsnelheid (m/s)
Sobek model	0.8	0.9-1.0
veldobservaties (Jeuken, 2000)	1.0	1.0-1.1
2D-model (Jeuken, 2000)	0.7-0.8	1.0-1.05

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de simulatie van het horizontale getij alleszins acceptabel is. De gesimuleerde snelheden in het interessegebied, waar de macrocel is gelegen, zouden orde 5-10% te klein kunnen zijn. Dit is echter niet met zekerheid te zeggen.

3.4.3 Sedimenttransporten

Tabel 3.4 toont de bruto sediment transporten (inclusief porositeit) in het midden van de bochtgroep/macro-cel bij Terneuzen en bij Hansweert. Ter vergelijking zijn de sedimenttransporten uit een proces georiënteerd 2D model op basis van Delft3D weergegeven. In deze proces-georiënteerde modellen is gewerkt met een D_{50} van 200-240 μm . De transporten zoals bepaald door Winterwerp e.a. (2000) en Jeuken (2001) zijn eveneens gebaseerd op de formulering van Engelund-Hanssen.

Uit tabel 3.4 blijkt dat de transporten in het Sobek model een factor 2.4-3 te klein zijn. Een deel (factor 1.3-2.0) kan worden verklaard doordat de stroomsnelheden vermoedelijk iets aan de lage kant zijn (5-15%, zie vorige paragraaf). Het resterende verschil hangt samen met het verschil tussen een 1D (het Sobek model) en een 2D benadering (Delft3D): het eerst middelen van de ruimtelijke variatie in stroomsnelheden gevolgd door een sedimenttransportberekening (Sobek) geeft kleinere bruto transporten dan wanneer eerst per

punt de sedimenttransporten worden bepaald gevolgd door integratie (Delft3D). Dit kan worden geïllustreerd met het volgende getallenvoorbeeld:

Stel snelheid $u1 = 0.7$ m/s en snelheid $u2 = 1.1$ m/s, een realistische ruimtelijke variatie in stroomsnelheden. De gemiddelde snelheid $u12$ bedraagt dan 0.9 m/s. Als benadering voor het transport S nemen we $S \propto u^5$. In geval van de gemiddelde snelheid $u12$ betekent dit een transport $S12 = 0.6$. Bepalen we eerst de transporten $S1 = u1^5 = 0.17$ en $S2 = u2^5 = 1.6$, dan wordt het gemiddelde transport van $S1$ en $S2 = 0.88$. Dit is een factor 1.5 groter dan het transport $S12$.

Tabel 3.4 Vergelijking van de bruto sediment transporten (in Mm^3/jaar) in het Sobek één-tak model en eerder met het proces- georiënteerde Delft3D-modellen (Winterwerp e.a. 2000, Jeuken, 2001) bepaalde transporten. Transporten inclusief porositeit. De Sobek-transporten zijn omgerekend naar jaarwaarden door de getijgemiddelde transporten te vermenigvuldigen met 44700 (aantal seconden in een getij) en 705 (aantal getijden per jaar).

bochtgroep	Sobek	Winterwerp e.a. 2000, Jeuken 2001
Terneuzen	5.3	16
Hansweert	5.1	13.7

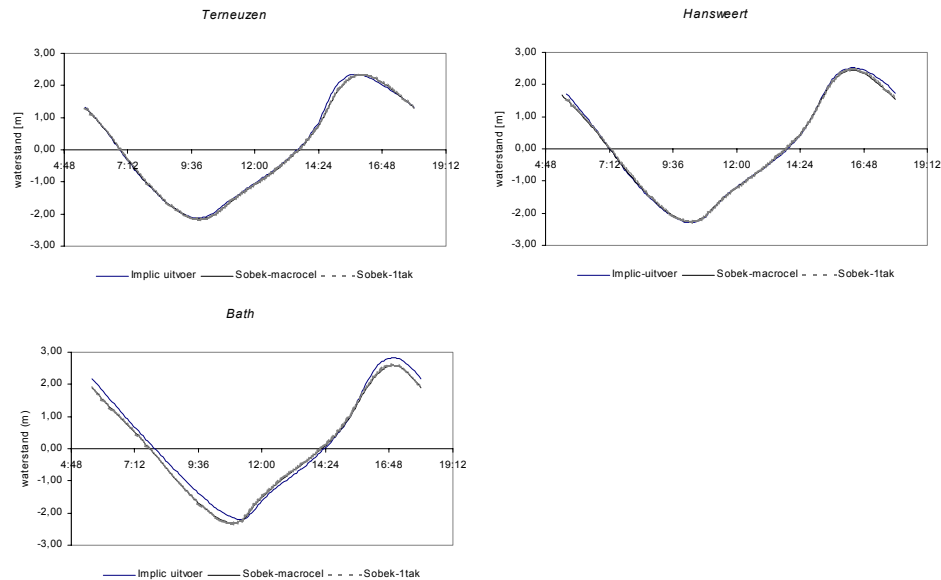
Dus de sedimenttransporten in het één-tak model zijn een factor 2.7-3 te klein doordat de snelheden waarschijnlijk iets te laag zijn en het model gebaseerd is op een 1D-benadering.

3.5 Validatie van het cel-model

3.5.1 Het verticale getij

Voor de validatie van het verticale getij is alleen gekeken of het celmodel de waterstanden op eenzelfde wijze simuleert als het één-tak model. De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in Figuur 3.6.

Hieruit blijkt dat beide modellen het verticale op dezelfde wijze simuleren. De verschillen zijn verwaarloosbaar klein. Deze overeenkomst geeft aan dat de geometrie van de macro-cel op een juiste wijze is geïmplementeerd.



Figuur 3.6 Vergelijking van de waterstanden in het één-tak en het celmodel.

3.5.2 Het horizontale getij

Een macrocel bestaat uit een gekromde (lange) ebgeul en rechte (korte) vloedgeul al dan niet gescheiden door intergetijde gebieden (zie ook paragraaf 2.2.2). Kenmerkend voor een dergelijke cel is de aanwezigheid van een residuele (getijgemiddelde) circulatie van water en zand (zie bijv. Jeuken, 2000 en Winterwerp e.a., 2001): in de vloedgeul is er een overwegend door de vloed gedomineerd residueel transport van water en zand. In de ebgeul zijn de residuele snelheden en zandtransporten door de eb gedomineerd, dat wil zeggen zeewaarts gericht. Bij de validatie van het celmodel wordt nagegaan of deze circulaties ontstaan en of de orde van grootte juist is. In deze paragraaf ligt de nadruk op het horizontale getij. De modelresultaten worden wederom vergeleken met debietmetingen en resultaten uit gekalibreerde, proces georiënteerde modellen (Jeuken, 2000; Winterwerp e.a., 2000; zie tabel 3.5).

De belangrijkste bevindingen in tabel 3.5 kunnen als volgt worden samengevat:

- Het totale getijvolume, door de eb- en vloedgeul samen, is in het Sobekmodel ca 60Mm^3 (12%) kleiner dan in het 2D-model en de observaties (497Mm^3 tegen 560 en 556Mm^3).
- In het Sobek model wordt het meeste water door de vloedgeul getransporteerd zowel tijdens eb als tijdens vloed. Dit beeld wordt bevestigd door het 2d-model en in iets mindere mate door de observaties. De relatieve verdeling van de watertransporten klopt echter niet helemaal:
 - Met name tijdens eb is het watertransport door de ebgeul in het Sobek model te klein (14% van het totale ebvolume). Een juiste procentuele verdeling (50%-50%) van een correct totaal getijvolume (560 in plaats van 497Mm^3) betekent dat het ebvolume door beide geulen ongeveer 280Mm^3 zou moeten zijn. Met andere woorden het ebvolume (ebsnelheden) door de ebgeul moet met 100Mm^3 (55%) omhoog. Het ebvolume (ebsnelheden) door de vloedgeul moet met 37Mm^3 (15%) omlaag. Wordt het te kleine totale getijvolume buiten beschouwing gelaten dan betekent een juiste

relatieve verdeling van de ebdebieten dat de debieten door de ebgeul met 38% (=14% van totale ebvolume) omhoog moeten ten koste van het watertransport door de vloedgeul dat met 22% omlaag moet.

- De absolute watertransporten tijdens vloed zijn in beide geulen aan de lage kant. De relatieve verdeling van de watertransporten is wel juist: ongeveer 40% van de totale hoeveelheid water wordt door de ebgeul getransporteerd. Deze verdeling gecombineerd met een juist totaal vloedvolume (560Mm^3 in plaats van 497Mm^3) betekent dat het vloedvolume in de ebgeul met 23Mm^3 (11%) omhoog moet. Het vloedvolume (vloedsnelheden) in de vloedgeul moet dan met 40Mm^3 (14%) omhoog
- De rest circulatie (RV) in het Sobek model is tegengesteld gericht is aan de circulatie volgens het 2d-model en de metingen: in het Sobek model wordt de ebgeul gekenmerkt door een vloedgedomineerd restdebiet en de vloedgeul kenmerkt zich door een ebgedomineerd restdebiet.

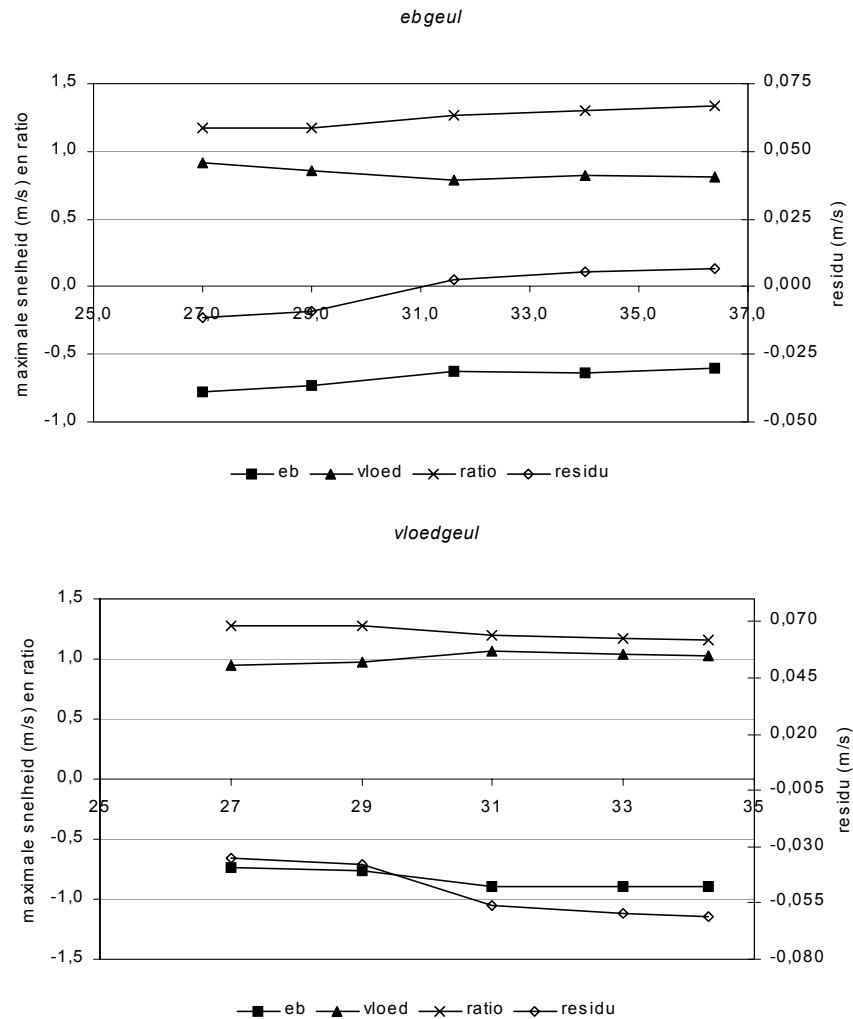
Tabel 3.5 Validatie van de water- en sedimenttransport beweging in de macrocel. Observaties gebaseerd op metingen van 1988 die herleid zijn naar het morfologisch getij van de berekening (gemiddeld tij+8-9%). TV=getijvolume, (ebvolume+vloedvolume)/2, EV=ebvolume, FV=vloedvolume, RV=restvolume, VV-EV. een positief RV betekent vloedgedomineerd, een negatief RV betekent een ebgedomineerde transport van water. Gegevens 2d-model ontleend aan Jeuken (2000).

	Ebgeul			Vloedgeul		
	Sobek	2d-model	observatie	Sobek	2d-model	observatie
TV	191	244	261	247	316	297
EV	180 (36%)	264 (47%)	280 (51%)	317	301	272*
VV	201 (40%)	224 (40%)	242 (43%)	296	331	321
RV	21	-40	-42	-21	30	49

*De debietverdeling in het geulsysteem is sinds 1988 nog wel veranderd (debieten door de vloedgeul zijn nog toegenomen, Jeuken, 2000).

Figuur 3.7 toont het beeld van de residuele stroomsnelheden, de maximale eb en vloedsnelheden en de ratio tussen deze maximale snelheden in beide geulen. Hieruit blijkt het volgende:

- De reststroming wordt gekenmerkt door ebgedomineerde residuele snelheden (0.04-0.06m/s) in de vloedgeul en overwegend zeer kleine vloedgedomineerde snelheden in de ebgeul (orde 0.01m/s). De restsnelheden vertonen een tendens tot afname in zeewaartse richting.
- De maximale vloedsnelheden in de vloedgeul variëren tussen 0.95 en 1.07 m/s. De vloedstroom versnelt enigszins in de geul. De vloedsnelheden in de ebgeul zijn met 0.79 tot 0.92 m/s duidelijk kleiner. De maximale vloedstroom vertraagt in de ebgeul.
- De maximale ebsnelheden in de vloedgeul variëren tussen 0.74 en 0.89 m/s. De ebstroom vertraagt in deze geul. De maximale ebsnelheden in de ebgeul zijn met 0.61 tot 0.78 m/s duidelijk kleiner. De maximale ebstroom versnelt in de geul (de snelheden nemen zeewaarts toe).
- De verhouding tussen de maximale snelheden varieert tussen 1.17 en 1.33. Met andere woorden in beide geulen zijn de maximale vloedsnelheden groter dan de maximale ebsnelheden.



Figuur 3.7 Het verloop van reststromen, maximale getijsnelheden en de ratio van de snelheden. Negatieve restsnelheden duiden op ebgedomineerde residuen, positieve waarden op vloedgedomineerde residuen. Op de x-as staat de afstand (in km) tot de monding.

Er is geen direct kwantitatief vergelijkingsmateriaal voorhanden. Een vergelijking van de hierboven geschetste stroompatronen met kennis en informatie over de waterbeweging in de Terneuzen bochtgroep (Jeuken, 2000) leidt tot de volgende constatering:

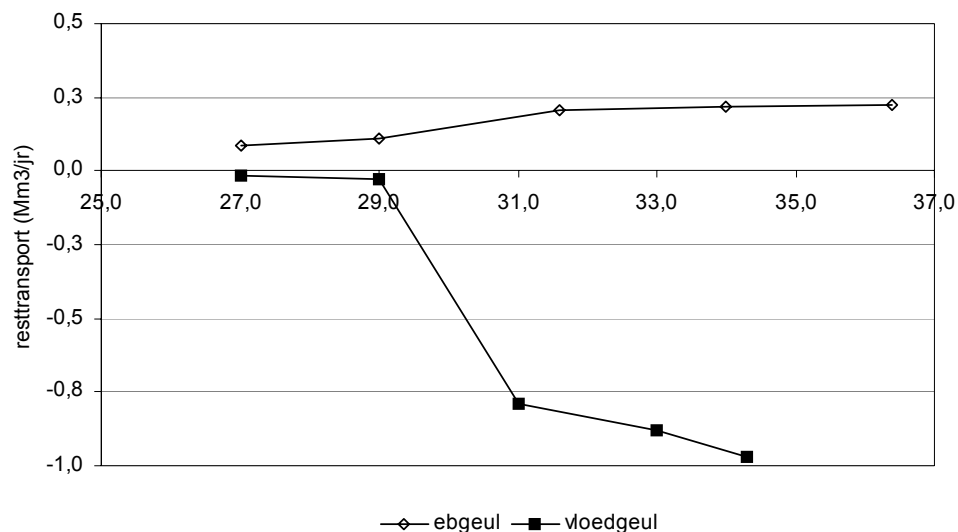
- Het patroon van restsnelheden is tegengesteld aan de verwachting: ebgeulen zijn in het algemeen ebgedomineerd en vloedgeulen vloedgedomineerd.
- De maximale vloodsnelheden en het patroon van stroomversnelling in de vloedgeul en -vertraging in de ebgeul lijken van de juiste orde te zijn. Wanneer ook het vermoedelijk te kleine totale getijvolumina (tabel 3.5) hierin wordt betrokken zou kunnen worden gesteld dat de maximale vloodsnelheden in de geulen ongeveer 11-14% groter mogen zijn.
- De maximale ebsnelheden in de vloedgeul lijken van de juiste orde. De maximale ebsnelheden in de ebgeul lijken te laag. Wanneer wordt gekeken naar de debietverdeling (tabel 3.5) dan zijn de ebsnelheden in het midden van de vloedgeul 22% te hoog en in de ebgeul 38% te laag.

- De verhouding van de maximale stroomsnelheden sluit aan bij het beeld dat bekend is voor de Terneuzen sectie: de maximale vloodsnelheden zijn in beide geulen groter dan de maximale ebsnelheden.

Samenvattend, kan worden gesteld dat het berekende beeld van residuele stroomcirculaties niet aansluit bij de verwachtingen gebaseerd op veldobservaties en resultaten van 2d-waterbewegingsmodellen. De essentie van het probleem lijkt te worden veroorzaakt door een onjuiste verdeling van het ebvolume over de twee geulen: het ebdebiet en de ebsnelheden door de ebgeul zijn in het midden van de cel circa 38% te klein, terwijl deze waarden in de vloedgeul ongeveer 22% te groot zijn. Hierop wordt in paragraaf 3.6 teruggekomen.

3.5.3 Sedimenttransporten

De residuele zandtransporten in een klassiek systeem van eb- en vloedgeulen worden in sterke mate bepaald door de residuele stroming en in mindere mate door de asymmetrie in de maximale stroomsnelheden (Jeuken, 2000; Jeuken en Wang, 2000): ebgeulen hebben meestal ebgedomineerde stroomresiduen en resttransporten, terwijl vloedgeulen veelal vloedgedomineerd zijn. Figuur 3.8 toont het plaatje met de resttransporten in de twee geulen van de Hansweert sectie in 1994.



Figuur 3.8 Patroon van resttransporten in de ebgeul en vloedgeul van de macrocel. Positief = vloedgedomineerd, negatief = ebgedomineerd. Opmerking transporten excl. het effect van porositeit.

Opvallend is in de eerste plaats het teken van de resttransporten: ebgedomineerd in de vloedgeul en vloedgedomineerd in de ebgeul. Dit plaatje past in grote lijnen bij het berekende beeld van restsnelheden (Fig. 3.5). Ook de vloedgedomineerde maximale stroomsnelheden lijken van invloed te zijn op het patroon van resttransporten, getuige de vloedgedomineerde transporten in de ebgeul op een afstand van 27 en 29km waar de reststroming net ebgedomineerd is (verg. met Fig. 3.7). Opmerkelijk is verder dat afgezien van het teken, dat andersom had moeten zijn, de orde van grootte van de resttransporten

tussen 31 en 37 km wel overeenkomt met resultaten uit proces-georiënteerde 2D-modellen: het ebgedomineerde resttransport in de ebgeul varieert tussen de 0.3-0.5 Mm³/jr, terwijl het vloedgedomineerde transport in de vloedgeul orde 0.6-1.1Mm³/jr is (zie bijv. Jeuken en Wang, 2000; Jeuken, 2000, en Winterwerp et al., 2000). Kijken we naar de gradiënten in het resttransport dan duiden die op een erosie in de ebgeul (orde 0.3Mm³/jr) en een forse sedimentatie (orde 1.6Mm³/jr) in de vloedgeul. De waarnemingen duiden echter op tegenovergestelde trends: een geringe tot geen sedimentatie in de ebgeul en een erosie in de vloedgeul (zie bijv. Jeuken, 2000, 2001).

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de berekende residuele sedimenttransporten en afgeleide erosie- en sedimentatietrends in de macrocel niet overeenkomen met de waarnemingen.

3.6 Discussie, conclusies en aanbevelingen

Het doel van de deelstudie, zoals besproken in dit hoofdstuk, bestaat uit het opzetten van een 1D morfologisch model voor de Westerschelde waarmee in een vervolgstudie de aannamen in het cellenconcept kunnen worden onderbouwd en onzekerheden (bandbreedten) in het stortcriterium kunnen worden gekwantificeerd.

Er zijn twee modellen opgezet met behulp van de Sobek software: het zogenaamde *één-tak model* waarin geen afzonderlijke eb- en vloedgeulen worden onderscheiden en het daaruit afgeleide *cel-model*. In dit laatste model wordt het eb-vloedgeul systeem in de bochtgroep/macrocel bij Hansweert, met de ebgeul Middelgat en de vloedgeul Gat van Ossensisse/Overloop van Hansweert, expliciet gemodelleerd. Beide modellen zijn opgezet voor de morfologische situatie van 1994.

Het *één-tak model* is gevalideerd op basis van waterstanden, getijvolumina, maximale eb- en vloedsnelheden, restsnelheden en bruto sedimenttransporten in de Westerschelde, zoals bekend uit eerdere studies waarin veldmetingen en resultaten van modelonderzoek worden beschreven. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- Het model reproduceert de algemene karakteristieken van de getijvoortplanting in de Westerschelde voor de huidige studie goed genoeg. Alleen het hoog water bij Bath is ca. 0.23m te laag. Deze onderschatting wordt vermoedelijk veroorzaakt door onbekende fouten in de vereenvoudigde bodemschematisatie landwaarts van Bath.
- De verschillen tussen gemeten en berekende getijvolumina in de Westerschelde vallen binnen de meetnauwkeurigheid. Als er al sprake is van systematische verschillen, dan is dat een kleine onderschatting (5-15%) van de getijvolumina zeewaarts van Hansweert, als gevolg van het ontbreken van het Land van Saeftinghe en de te kleine getijslag in Bath.
- Het fase verschil tussen het horizontale en verticale getij gaat gepaard met een Stokes drift die ook door Schoeman (2000) en Jeuken (2000) is waargenomen: doordat de ebstroom bij een gemiddeld lagere waterstand (NAP-0.4m) optreedt dan de vloedstroom (NAP+0.3m) ontstaat er een kleine ebgedomineerde reststroming van orde 0.024-0.037m/s.
- De bruto sedimenttransporten zijn een factor 2.7-3 te klein. Dit is voor een belangrijk deel (factor 1.5-2) inherent aan de 1D benadering. In vergelijking tot een 2D-benadering

worden de snelheden eerst worden gemiddeld voordat het transport wordt berekend. Dit leidt tot lagere transporten. Ook de vermoedelijk iets te lage snelheden dragen bij aan de te lage bruto transporten. Dit kan eventueel worden verholpen door in Sobek een correctiefactor toe te passen in de transportberekeningen (hierdoor zullen ook de resttransporten groter worden, maar het teken verandert niet).

Samenvattend kan worden gesteld dat het één-tak model een goede basis vormt voor het opzetten van het celmodel.

Net als het één-tak model is vervolgens het *celmodel* gevalideerd op: consistentie met het één-tak model (aan de hand van het waterstandsverloop), en de verdeling van getijvolumina, maximale eb- en vloednelheden, restsnelheden en residuele sedimenttransporten in het eb-vloedgeulsysteem. Hierbij is wederom gebruik gemaakt van informatie uit eerdere studies waarin veldmetingen en resultaten van modelonderzoek worden beschreven. De belangrijkste verwachting op basis van deze eerdere studies is, dat het geulsysteem in de cel gekenmerkt wordt door een residuele (getijgemiddelde) circulatie van water en zand, waarbij de ebgeul ebgedomineerd is en de vloedgeul vloedgedomineerd. Het Sobek model produceert echter precies het tegenovergestelde beeld: De ebgeul wordt overwegend gekenmerkt door een vloedgedomineerd (landwaarts gericht) restvolume, restsnelheid en resttransport. De vloedgeul kent een ebgedomineerd restvolume, restsnelheid en -transport. Dit roept de vraag op waardoor dit tegengestelde beeld ontstaat en welke mechanisme er in een 1d-model en in ‘werkelijkheid’ een rol spelen bij het ontstaan van restcirculaties.

De residuele circulatie is een locale asymmetrie in de stroming die wordt veroorzaakt door eigenschappen van het morfodynamisch systeem. In een 1D-model kunnen drie mechanismen zorgen voor een residuele stroming q_0 (van Kerckhoven, 1995; Fokkink et al, 1998; Jeuken en Wang, 2000):

1. Een ruwheid die afhankelijk is van de stroomrichting. Met andere woorden de ruwheid tijdens ebstroom verschilt van de ruwheid tijdens vloedstroom. De reststroming q_0 die hierdoor ontstaat kan worden benaderd als (Fokkink et al., 1998):

$$q_0 = \frac{3\pi\Delta C}{8C} q_1$$

met ΔC het verschil in ruwheid ten opzichte van de gemiddelde ruwheid tijdens eb en vloed, C en q_1 de helft van het totale debiet (of getijvolume).

2. Een variatie van de stroomvoerende oppervlakte van de geul in geullangsrichting. Deze variatie werkt door via de advectieterm in de waterbewegingsvergelijking en zorgt ervoor dat stroming in de richting van toenemende dwars oppervlakte makelijk is dan in de omgekeerde richting. In eb- en vloedgeulen (en ook in het model) neemt de breedte van de geul toe (en de diepte af) in de richting van de drempel in de geul. Dat wil zeggen in de ebgeul neemt de breedte zeewaarts toe (en de diepte af). In de vloedgeul neemt de breedte landwaarts toe (en de diepte af). Voor het geval dat de diepte van de geul niet verandert langs de geul kan de restcirculatie die hierdoor ontstaat worden benaderd met (Fokkink et al, 1998):

$$q_0 = \frac{3\pi C^2 h \Delta B}{16gLB} q_1$$

waarin h de waterdiepte is, ΔB het verschil tussen de maximale en gemiddelde geulbreedte, L de lengte van de geul en B de gemiddelde breedte van de geul.

Voor het algemene geval moet deze vergelijking worden vervangen met

$$q_0 = \frac{3\pi C^2 h \Delta A}{16gLA}$$

Waarin A de dwars oppervlakte van de geul is.

3. Een (gedeeltelijk) progressieve getijgolf in combinatie met verschil in de gemiddelde diepte van de ebgeul en de vloedgeul leidt tot een residuele circulatie ter grootte van (Jeuken en Wang, 2000):

$$q_{0,vloedgeul} = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{\frac{h_2}{h_1} + \frac{\delta}{h_1}}{1 + \frac{\delta}{h_1}} \right)^\alpha} - \frac{1}{1 + \left(\frac{\frac{h_2}{h_1} - \frac{\delta}{h_1}}{1 - \frac{\delta}{h_1}} \right)^\alpha} \right) q_{tot}$$

waarin : h_1 is de waterdiepte in de vloedgeul, h_2 is de waterdiepte in de ebgeul, δ is de gemiddelde waterstand waarbij gemiddelde eb / vloedstroom optreedt, q_{tot} is het totale debiet door de cel. α is een macht gerelateerd aan de ruwheidsformulering (= 3/2 bij Chezy en 5/3 bij Manning). Deze relatie zegt dat de reststroming ebgedomineerd is in de diepste geul.

De bijdragen van de verschillende mechanismen zijn samengevat in tabel 3.6. Hieruit blijkt dat de schatting aan de hand van de hierboven gegeven vergelijkingen goed overeenkomen met de SOBEK-resultaat en dat mechanisme drie relatief gezien de kleinste bijdrage levert. Volgens de SOBEK berekening kent de vloedgeul een negatief restvolume van 21 Mm³. Mechanisme 2 is aanwezig via de schematisatie. Mechanisme 1 is nog niet ingebracht. Toch kan dit wel worden verantwoord.

Tabel 3.6 Bijdrage drie mechanismen op het ontstaan van de restcirculatie. De volgende waarden zijn gebruikt: $q_1=250\text{Mm}^3$, $\alpha=3/2$, $\Delta C=7$, $h_1=11.4\text{m}$, $h_2=9.7\text{m}$, $L=9400\text{m}$, $\Delta A=-8947\text{m}^2$, $B=23591\text{m}^2$, $\delta=0.35\text{m}$

mechanisme 1	mechanisme 2	mechanisme 3
35	-20	-2

In werkelijkheid en in een 2D model heeft de variabele aanstroomrichting ook invloed op het patroon van reststromingen. Als een ebgeul in een macrocel meer openligt voor de ebstroom dan de vloedgeul komt dat niet tot uitdrukking in een 1D-model en wel in een 2D-model. Dit effect speelt vermoedelijk ook een rol in het waargenomen circulatiepatroon in het Sobekmodel. Kijken we naar figuur 3.4 dan liggen de eb- en vloedgeul beiden evenveel ‘open’ voor de vloedstroom. Dit verklaart, naast een juiste schematisatie, waarom de verdeling van de vloedvolumina over de twee geulen juist wordt weergegeven in het Sobek model. Voor de ebstroming ligt dit duidelijk anders: de ebgeul ligt in het verlengde (‘open’) van de ebstroom uit het Valkenissegebied. De kortere en diepere vloedgeul staat hier bijna haaks op. Het 1D-model kan dit onderscheidt niet zondermeer maken en stuurt een te groot ebdebiet door de vloedgeul. Zoals aangegeven in paragraaf 3.5.2 zou het berekende ebdebiet in het midden van de vloedgeul 22% kleiner moeten zijn en in het midden van de ebgeul 38% groter moeten zijn. De enige manier om dit in een 1D-model te sturen is het gebruik van ruimtelijk variable ruwheden in de macrocel tijdens eb: de Chezywaarde in de ebgeul (nu ca $51 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$) moet groter (gladder) zijn dan in de vloedgeul. Een mogelijk bezwaar hiervan zou kunnen zijn dat een grotere Chezy waarde weer leidt tot lagere sedimenttransporten. Een kleine gevoeligheidsanalyse (in een spreadsheet) suggereert echter dat dit mee zou kunnen vallen en dat een juiste verdeling van de ebdebieten cruciaal is voor het patroon van restcirculaties:

Stel dat de Chezy waarden in de ebgeul binnen realistische grenzen kunnen worden aangepast zodanig de verdeling van de ebdebieten in het midden van het geulsysteem juist is: met andere woorden de ebsnelheden in de ebgeulen worden verhoogd met 38%, de ebsnelheden in de vloedgeul worden verlaagd met 22%. De vloedsnelheden blijven gelijk. Het resulterende beeld van restsnelheden in de geulen is samengevat in tabel 3.7a. De ebgeul krijgt een vrij sterke ebgedomineerde reststroming en de vloedgeul wordt beperkt vloedgedomineerd.

Tabel 3.7a Effect van snelheidsverandering (debietverdeling) tijdens eb de residuele snelheden.

afstand tot monding (km)	ebgeul		vloedgeul	
	huidige model	aanpassing ebsnelheden	huidig model	aanpassing ebsnelheden
27	-0.011	-0.116	-0.035	0.027
31 / 31.6	0.003	-0.081	-0.056	0.020
34.3 / 36.4	0.006	-0.077	-0.061	0.015

Stel dat dit stroombeeld kan worden verkregen door de Chezywaarde in de ebgeul te verhogen tot 65 in plaats van $51 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, dan leidt dit tot een patroon van residuele sedimenttransport zoals samengevat in tabel 3.7b. De ebgeul kent dan een ebgedomineerd zand transport en de vloedgeul een vloedgedomineerd zandtransport. De ruimtelijk gradiënten in het sedimenttransport kloppen nog niet in dit vereenvoudigde rekenvoorbeeld, gelet op de waargenomen morfologische ontwikkelingen (Jeuken, 2000; 2001) maar de tekens van de residuele circulaties zijn wel conform verwachtingen.

Tabel 3.7b Effect van snelheidsverandering (debietverdeling) tijdens eb en een Chezy-waarde van 65 in plaats van $51 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ in de ebgeul op de residuele sediment transporten (in Mm^3/jr excl. porositeit).

afstand tot monding	ebgeul	vloedgeul
---------------------	--------	-----------

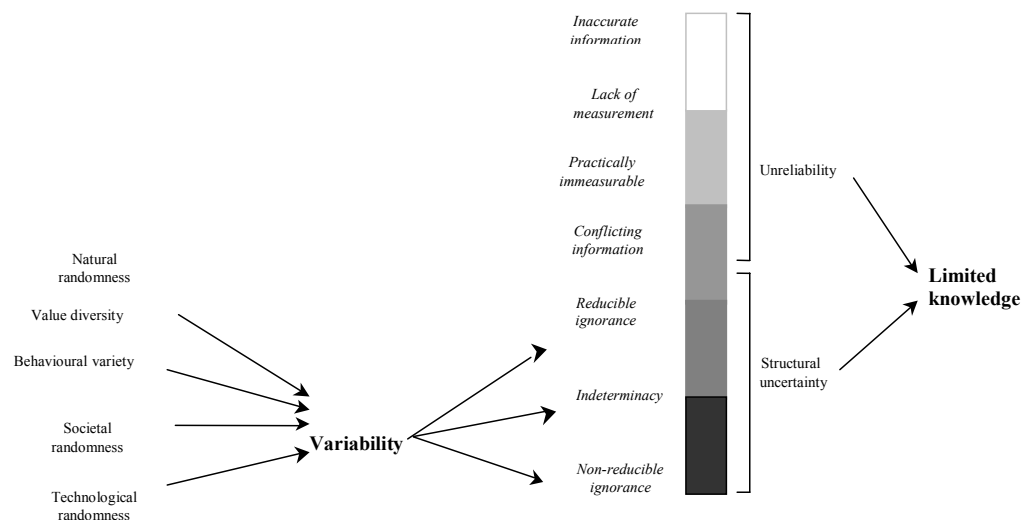
(km)	huidige model	aanpassing ebsnelheden	huidig model	aanpassing ebsnelheden
27	0.08	-1.26	-0.02	0.50
31 / 31.6	0.21	-0.23	-0.79	0.69
34.3 / 36.4	0.22	-0.10	-0.97	0.50

Op basis van voorgaande discussie kan worden geconcludeerd dat er voor de vervolgstudie nog een fine-tuning van het celmodel nodig is waarbij gezocht wordt naar een optimale verdeling van de ruwheden tussen de ebgeul en de vloedgeul tijdens eb. Hierbij lijkt het zinvol om in de sedimenttransport berekening te werken met correctiefactor van 1.5 om te compenseren voor het feit dat de 1D-benadering kleinere transporten oplevert dan een 2D-benadering (paragraaf 3.4.3). Voorts verdient het aanbeveling om ook een modelopzet te maken voor de situatie van 1955 en/of 1968 omdat de vloedgeul toen gemiddeld ondieper was dan de ebgeul. Mechanisme drie zorgt er dan voor dat de vloedgeul vloedgedomineerd wordt en de ebgeul ebgedomineerd.

4 Hoe om te gaan met onzekerheden - een plan van aanpak

4.1 Inleiding

Beleidsmakers en beheerders hebben te maken met allerlei vormen van onzekerheid bij het maken van beleid en het nemen van beslissingen (zie figuur 4.1). Dit betreft niet alleen wetenschappelijke onzekerheden in, bijvoorbeeld, modelresultaten. Ook opvattingen over, onder anderen, de waarde van natuur veranderen continu in een samenleving. In de beleidscyclus van 1) probleem definitie, 2) definitie oplossing, 3) bepalen van potentiële effecten van oplossingen, 4) afweging en besluit, en 5) implementatie, monitoring en evaluatie, is iedere stap onderhevig aan onzekerheden. Dergelijke sociaal culturele onzekerheden hebben invloed op het te voeren beheer en beleid.



Figuur 4.1 Vormen van onzekerheid (Van Asselt, 1999)

In het geval van het Schelde-estuarium richten de 'problemen' zich op de drie hoofdfuncties Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid. Onzekerheden hierbij zijn de manier waarop hieraan gerelateerde items gemeten zijn (wetenschappelijk: hoe zeker zijn de veranderingen?) en een abstractie niveau hoger: hoe zeker is het dat regering en stakeholders dit (blijven) zien als de items waar het in de Westerschelde omdraait (sociologische, maatschappelijke onzekerheid)? Gegeven deze onzekere uitgangspunten hebben de beheerders een aantal oplossingen bedacht, geïmplementeerd en instrumenten ontwikkeld om de toestand van de Westerschelde te monitoren en te evalueren. Het cellenconcept is ontwikkeld om de Natuurlijkheid te waarborgen en toch de noodzakelijke verdieping van de geulen te kunnen uitvoeren. Verdieping van de geulen is noodzakelijk

voor de gewenste Toegankelijkheid. De onzekerheden behorende bij het cellenconcept vormen dus slechts een onderdeel van het totaal aan onzekerheden waar ‘de beheerder’ van de Westerschelde mee te maken heeft.

Door het vergroten van de wetenschappelijke kennis over het systeem en het verbeteren van meetmethoden kan men de onzekerheid in de uitkomsten van het cellenconcept verkleinen. Echter, het zal niet mogelijk zijn om deze tot nul te reduceren. Bovendien zijn er andere vormen van onzekerheid welke men niet kan beïnvloeden. De vraag waar het in dit hoofdstuk over gaat is hoe we beheerders kunnen helpen om met deze onzekerheden om te gaan. Dit onderzoek richt zich vooral op de beleidscyclus fase ‘implementatie, monitoring en evaluatie’. Binnen Nederland richt de Universiteit Twente (in persoon van Rien Kolman) zich vooral op de fase ‘probleem definitie’ en het International Centre for Integrative Studies (ICIS) te Maastricht richt zich vooral op de fase van ‘afweging en besluit’. Potentieel heeft het WL ook een rol in de betekenis van onzekerheden tijdens de fases van ‘definitie oplossing’ en ‘potentiele effecten van oplossingen’.

Het uitgangspunt van deze studie is dat het cellenconcept voor de Westerschelde de randvoorwaarden geeft waarbinnen de functies Natuurlijkheid en Toegankelijkheid kunnen worden gewaarborgd. Dit concept is gebaseerd op de aanname dat het meergeulenstelsel van de Westerschele een voorwaarde is voor het behouden van de natuurlijkheid. De juistheid van dit uitgangspunt is geen onderwerp van deze onzekerheidsstudie.

4.2 Probleemstelling

De Directie Zeeland heeft als ‘beheerder’ van de Westerschelde slechts een beperkt aantal mogelijkheden om het morfodynamisch gedrag van het systeem te sturen: niets doen, sediment weghalen en sediment toevoegen binnen de daarvoor geldende regelgevingen. In de praktijk betekent dit dat bagger- en stortvergunningen voor bepaalde locaties kunnen worden afgeven of niet⁶. Het cellenconcept dient als instrument om te kunnen bepalen waar en hoeveel er gebaggerd en gestort kan worden zonder dat het geul-plaat-systeem van het estuarium in gevaar komt als gevolg van die ingrepen.

De vraagstelling luidt als volgt:

Welk criterium kan de beheerder gebruiken om te beslissen of hij een stort- of baggervergunning kan afgeven of moet weigeren op basis van het cellenconcept? Hierbij moeten onzekerheden als gegeven worden beschouwd en dient er te worden gekeken naar de eventuele gevolgen van een ‘foute’ beslissing voor de gebruikersfuncties Natuurlijkheid en Toegankelijkheid.

Daarnaast moet een beheerder een besluit, naar diegene die het betreft (havenautoriteiten, baggeraars, maar ook gemeenten), goed kunnen onderbouwen. Een goed en inzichtelijk proces bij het al dan niet afgeven van een vergunning maakt het handhaven van een gekozen beleid en het creëren van een (maatschappelijk) draagvlak voor eventueel nieuw beleid makkelijker. Dit betekent dat er een duidelijke beschrijving van de methode met alle bijbehorende voorbehouden moet komen.

⁶ *Er zijn vergunningen afgegeven voor langere tijd maar deze moeten wel steeds worden verlengd na een evaluatie van het beleid. De bagger- en storthoeveelheden per locatie kunnen dan worden aangepast. Het definiëren van nieuwe locaties impliceert het formuleren van nieuw beleid.*

4.3 Plan van aanpak

Om te komen tot een integratie van onzekerheden in het bagger- en stortbeleid stellen wij het volgende plan van aanpak voor:

1. Een onderzoek onder of gesprek met 'beheerders' en belanghebbenden om de wensen, ideeën, belangen, problemen etc. t.a.v. het bagger- en stortbeleid te inventariseren.
2. Stel de onzekerheden vast in de bagger- en storthoeveelheden die volgen uit het cellenconcept. Dit kan door een inventarisatie van de gegevens die nodig zijn om op basis van het cellenconcept te komen tot een beslissing. Denk aan afmetingen van de geul, sedimentkarakteristieken, bijbehorende transportcapaciteiten (of alle onderliggende gegevens die daarvoor nodig zijn). Van deze gegevens moet worden aangegeven waar ze vandaan komen, waar ze op gebaseerd zijn en wat de bijbehorende onzekerheidsmarge is. Bij het laatste zo mogelijk aangeven welke aard die heeft (karakterisering van de onzekerheden). Op deze manier wordt er inzicht verkregen in de samenstelling en de grootte van de onzekerheidsmarges en wat er moet gebeuren om ze eventueel te verkleinen. Deze taken vallen voor een groot deel onder het onderbouwen van het cellenconcept (zie Hoofdstuk 1).
3. Een 'verkeerd' bagger-stort beleid leidt er toe dat het geulensysteem van de Westerschelde instabiel wordt en naar een één-geul-systeem tendeert. Bij het operationeel maken van het cellenconcept hoort het ontwikkelen van een set indicatoren die kan worden gebruikt om het proces te monitoren om zo te kunnen ingrijpen als dat nodig mocht zijn. Ook hiervoor moeten onzekerheidsmarges worden bepaald zoals beschreven onder 2. Dit gebeurt tijdens het operationaliseren van het cellenconcept (zie Hoofdstuk 1).
4. Hoe kunnen de eventuele gevolgen van een 'foute' beslissing worden gekwantificeerd? Een onterecht afgeven of slechte vergunning leidt tot het instabiel worden van het systeem en daarmee een aantasting van de 'natuurlijkheid'. De gevolgen van het niet afgeven van een vergunning zijn voor de toegankelijkheid; de diepgang voor de schepen wordt bijvoorbeeld beperkt en/of het vaargeulonderhoud wordt duurder. Een mogelijkheid is om beide gevolgen in geld uit te drukken. Hierbij kunnen bijvoorbeeld de boetes die gelden binnen de Habitat Richtlijn worden gebruikt. Voor de toegankelijkheid zouden bijvoorbeeld het aantal schepen dat de haven van Antwerpen niet meer kan bereiken of de verandering in vaartijd (tijpoort) als grootheden kunnen worden gebruikt. Om dit te doen moet contact worden gezocht met een (milieu)econoom en bijvoorbeeld een socioloog. Dit laatste omdat publieke opinie en politiek mogelijk belangrijke factoren zijn die de wenselijkheid van bepaalde besluiten kan beïnvloeden. Een literatuuronderzoek kan aanvullende inzichten geven. Op basis van de informatie wordt er een inventarisatie van de mogelijkheden gemaakt voor het kwantificeren van de financiële gevolgen, met de bijbehorende voor- en nadelen.
5. Hoe kan een gegeven onzekerheid om worden gezet in bijvoorbeeld een kans dat het fout gaat? Tijd is hierbij een belangrijke factor: binnen welke termijn kun je een bepaalde gebeurtenis nog (redelijkerwijs) toeschrijven aan het al dan niet baggeren of storten? Ook hiervoor willen wij contact zoeken met experts zoals bijvoorbeeld statistici, meteorologen, verzekeraars en beleggers, en een literatuuronderzoek uitvoeren. Dit resulteert in een inventarisatie van de mogelijkheden om onzekerheid om te zetten in een kans dat de verkeerde beslissing wordt genomen inclusief de voor- en nadelen.
6. Op basis van de informatie uit 4 en 5 wordt er een beslissingscriterium voor het bagger- en stortbeleid van de Westerschelde gemaakt.

4.4 Voorlopige werkbegroting

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de werkbegroting (in mensdagen) voor de uitvoering van het plan van aanpak.

Tabel 4.1 Een overzicht van het benodigde aantal mensdagen per activiteit.

Activiteit	Omschrijving	Dagen
1	Onderzoek/gesprek beheerders	4
2	Inventarisatie gegevens	2
3	Inventarisatie indicatoren	2
4	Kwantificeren gevolgen	7
5	Omzetten onzekerheid naar kans	17
6	beslissingscriterium	8
7	rapporteren	5
8	presentatie voor BB	2
9	management	4
	totaal	51

Naast externe expertise is er natuurlijk ook binnen het WL zelf de nodige kennis van zaken aanwezig. Voor de economische aspecten kan bijvoorbeeld Paul Baan een bijdrage leveren.

De onderdelen 2 en 3 zijn direct gekoppeld aan het operationeel maken van het cellenconcept. De vier dagen moeten gezien worden als de extra tijd nodig voor het inventariseren, kwantificeren en classificeren van de onzekerheden in de uitkomsten van het cellenconcept en de bijbehorende indicator.

De resultaten zullen worden gerapporteerd en gepresenteerd. Het is het streven om de uiteindelijke methode ook in operationele vorm, d.w.z. een spreadsheet o.i.d., op te leveren.

5 Samenvatting en conclusies

Achtergrond en doelstelling

De beheerder van de Westerschelde, Directie Zeeland, is verantwoordelijk voor de Veiligheid, Natuurlijkheid en Toegankelijkheid in het Schelde estuarium. De streefbeelden, ontwikkelingsschetsen en beleidsdoelen op deze drie gebieden zijn verwoord in de Lange-Termijn Visie Schelde-estuarium (LTV). Belangrijk uitgangspunt hierbij is de instandhouding van het open en natuurlijke mondingsgebied, een systeem van hoofd- en nevengeulen met tussenliggende platen en ondiepwatergebieden (een meergeulensysteem) in de Westerschelde en een riviersysteem met een meanderend karakter in de Zeeschelde. De belangrijkste vraag op het gebied van het stort- en zandwinbeleid vanuit beleid en beheer is:

Wat is de optimale strategie (op een tijdschaal van jaren) voor baggeren, storten en zandwinning in het Schelde-estuarium, waarbij het meergeulensysteem gehandhaafd blijft, en bevaarbaarheid en veiligheid tegen overstromen gewaarborgd blijven?

Deze vraag staat centraal binnen het project Veerkracht 2001 (deel B) en het nieuwe doelsubsidieproject Inzicht in Watersystemen, WL-thema Duurzame inrichting van water- en kustsystemen. De doelstelling van dit doelsubsidieproject luidt:

Het onderbouwen, operationaliseren en toepassen van 'het cellenconcept Westerschelde' als instrument voor het ontwikkelen en evalueren van nieuwe, geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor zandwinning en vaargeulonderhoud (zandbeheer) in de Westerschelde.

Het cellenconcept wordt onderbouwd en geoperationaliseerd als instrument om de beheer- en beleidsvraag te beantwoorden. Dit proces vindt plaats in nauwe samenspraak met de beleidsmakers en beheerders.

Praktisch gezien wordt het project onderverdeeld in een viertal resultaatgebieden:

1. onderbouwing van het cellenconcept,
2. operationalisering van het cellenconcept,
3. toepassing van het geoperationaliseerde instrument, en
4. eindevaluatie van het project.

Dit rapport beschrijft werkzaamheden die verricht zijn binnen het eerste resultaatgebied, namelijk

- het plaatsen van het cellenconcept in de bredere context van beheer en beleid (Hoofdstuk 2),
- het inventariseren van de meest cruciale aannamen in het cellenconcept en het opzetten en kalibreren van een model op basis van Sobek, bedoeld ter onderbouwing van de aannamen in het cellenconcept (Hoofdstuk 3), en
- het maken van een plan van aanpak over hoe de implicaties van natuurwetenschappelijke onzekerheden in het cellenconcept en natuurlijke variabiliteit

duidelijk kunnen worden gemaakt voor beleid en beheer tijdens de operationalisering en toepassing van het cellenconcept (Hoofdstuk 4).

Het cellenconcept in de bredere context van beheer en beleid

Het cellenconcept is een schematisatie en aggregatie van de morfologie en transportcapaciteit in het geulensysteem van de Westerschelde om de invloed van storten en baggeren op de stabiliteit van dat geulensysteem 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. Voor het huidige beheer van de Westerschelde kan het cellenconcept een belangrijke rol spelen, omdat het een hulpmiddel is bij de kwantificering van de stabiliteit van het meergeulensysteem onder invloed van menselijke ingrepen. Zo kan het effect van de huidige bagger-, stort- en zandwinstrategie op de morfologische ontwikkeling onderzocht en geoptimaliseerd worden door toepassing van het cellenconcept.

Toepassing van een veerkrachtstrategie voor het Westerschelde estuarium betekent dat het beleid erop gericht moet zijn dat de veerkracht van het systeem vergroot wordt. Dit houdt in dat het systeem snel in staat moet zijn na een verstoring zich weer in oude staat, met behoud van de belangrijkste essentiële kenmerken, te herstellen. Het cellenconcept kan worden beschouwd als een praktische hulpmiddel daar waar het gaat om het vinden van nieuwe geïntegreerde en duurzame beleid- en beheersstrategieën voor vaargeulonderhoud en zandwinning (zandbeheer) in de Westerschelde.

Een morfologisch model voor de kwantificering van aannamen en onzekerheden in het cellenconcept

Ten behoeve van het onderbouwen van de aannamen van het cellenconcept (zoals omschreven in §3.2) zijn twee modellen opgezet met behulp van de Sobek software: het zogenaamde *één-tak model* waarin geen afzonderlijke eb- en vloedgeulen worden onderscheiden en het daaruit afgeleide *cel-model*. In dit laatste model wordt het eb-vloedgeul systeem in de bochtgroep/macrocél bij Hansweert, met de ebgeul Middelgat en de vloedgeul Gat van Ossensisse/Overloop van Hansweert, expliciet gemodelleerd. Beide modellen zijn opgezet voor de morfologische situatie van 1994.

Het *één-tak model* is gevalideerd op basis van waterstanden, getijvolumina, maximale eb- en vloedsnelheden, restsnelheden en bruto sedimenttransporten in de Westerschelde, zoals bekend uit eerdere studies waarin veldmetingen en resultaten van modelonderzoek worden beschreven. Uit deze validatie kan samenvattend worden gesteld dat het één-tak model een goede basis vormt voor het opzetten van het celmodel.

Net als het één-tak model is vervolgens het *celmodel* gevalideerd op: consistentie met het één-tak model (aan de hand van het waterstandsverloop), en de verdeling van getijvolumina, maximale eb- en vloedsnelheden, restsnelheden en residuele sedimenttransporten in het eb-vloedgeulensysteem. Hierbij is wederom gebruik gemaakt van informatie uit eerdere studies waarin veldmetingen en resultaten van modelonderzoek worden beschreven. De belangrijkste verwachting op basis van deze eerdere studies is, dat het geulsysteem in de cel gekenmerkt wordt door een residuele (getijgemiddelde) circulatie van water en zand,

waarbij de ebgeul ebgedomineerd is en de vloedgeul vloedgedomineerd. Het Sobek model produceert echter precies het tegenovergestelde beeld: de ebgeul wordt overwegend gekenmerkt door een vloedgedomineerd (landwaarts gericht) restvolume, restsnelheid en resttransport. De vloedgeul kent een ebgedomineerd restvolume, restsnelheid en -transport. Een nadere beschouwing hiervan, in §3.6, geeft aan dat er voor de vervolgstudie nog een fine-tuning van het celmodel nodig is, waarbij gezocht wordt naar een optimale verdeling van de ruwheden tussen de ebgeul en de vloedgeul tijdens eb.

Een plan van aanpak voor het omgaan met onzekerheden

Beleidsmakers en beheerders hebben te maken met allerlei vormen van onzekerheid bij het maken van beleid en het nemen van beslissingen. Dit betreft niet alleen wetenschappelijke onzekerheden in modelresultaten. Ook opvattingen over, bijvoorbeeld, de waarde van natuur veranderen continu in een samenleving. In de beleidscyclus (probleem definitie; oplossing definitie; effecten van oplossingen; afweging en besluit; implementatie, monitoring en evaluatie) is iedere stap onderhevig aan onzekerheden. De vraagstelling die leidt tot het voorgestelde plan van aanpak luidt:

Welk criterium kan de beheerder gebruiken om te beslissen of hij een stort- of baggervergunning kan afgeven of moet weigeren op basis van het cellen concept. Hierbij moeten onzekerheden als gegeven worden beschouwd en dient er te worden gekeken naar de eventuele gevolgen van een 'foute' beslissing voor de gebruikersfuncties Natuurlijkheid en Toegankelijkheid.

Het plan van aanpak, de fasering en werkbegroting zijn weergegeven in § 4.3 en 4.4.

6 Referenties

- Bakker, W.T. en H.J. De Vriend, 1995, Resonance and morphological stability of tidal basins, *Marine Geology*, 126, 5-18.
- Claessens and Meyvis (1994), Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1981-1990. Antwerpen, Ministerie van de Vlaamse gemeenschap, Antwerpse Zeehavendienst.
- De Jong, J.A. 2001, Zandbalans Westerschelde en monding periode 1955-2000, Rijkswatertsat Directie Zeeland.
- Dillingh, D and P.F. Heinen (1994), Zeespiegelstijging, getijverandering en deltaveiligheid. Den Haag, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, report RIKZ-94.026 (in Dutch).
- Fokkink, R.J., B. Karssen, Z.B. Wang, J.D.M. Van Kerckhoven, and A. Langerak (1998), Morphological modelling of the Western Scheldt estuary. In: J. Dronkers & M. Scheffers, 1998, pp. 329-336.
- Fokkink R.J., Z.B. Wang en M.H.I. Schropp, 1995, On 1D morphodynamic network models, *Hydra 2000*, 3, 104-109.
- Jeuken, M.C.J.L., 2000, On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary. Phd-thesis, Utrecht University, 378pp.
- Jeuken, M.C.J.L., 2001, Verificatie van het cellenconcept op basis van historische gegevens. WL|Delft Hydraulics, report Z3078.
- Jeuken, M.C.J.L. en Z.B. Wang, 2001. Advies aangaande de maximaal verantwoorde stortingen in de Westerschelde. Memo WL|Delft Hydraulics d.d. 6 juli 2001.
- Jeuken, M.C.J.L. en Z.B. Wang, 2001 Memo inzake maximaal verantwoorde stortingen in de Westerschelde, in opdracht van RWS Directie Zeeland.
- Kerckhoven, J.D.M. van, 1995, Morphological modelling of ebb and flood channelsystems in estuaries, Master thesis, Delft University of Technology, Faculty of civil Engineering.
- Latteux, B. (1995), Techniques for long-term morphological simulation under tidal action. *Marine Geology*, pp. 129-141.
- Nichols, M.N. and R.B. Biggs (1985), Estuaries. In: R. A. Davis, ed., *Coastal Sedimentary Environments*. New York, Springer Verlag, pp. 77-186.
- Schoeman, P.K. (2000), Getij-asymmetrie in de Westerschelde. Master thesis, Delft University of Technology, Faculty of civil Engineering.
- Rijkswaterstaat (1998), Milieuaspectenstudie Baggerspeciëstort Westerschelde. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Middelburg.
- Rijkswaterstaat (2000), Zand in de Hand. Beleidsplan Zandwining Westerschelde 2001-2011, Nota NWL-00.50, Directie Zeeland.
- RWS&MVG, 2001, Langetermijnvisie Schelde estuarium, RWS directie Zeeland en het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- Torenga, E. (2001), Stabiliteit van tweegeulensystemen in estuaria. Master thesis, Delft University of Technology, Faculty of civil Engineering.
- Van Asselt, 1999, 'Uncertainty in decision-support; From problem to challenge', Working paper I99-E006, International Centre for Integrative Studies (ICIS), Maastricht.
- Van der Weck, en M.C.J.L. Jeuken (1999). Uitbreiding ESTMORF model Westerschelde. Afregeling van het waterbewegingsmodel IMPLIC. WL|Delft Hydraulics Z2701.
- Van Rijn, L.C. (1993), Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam, Aqua Publications.
- Van Veen, J. (1950), Eb- en Vloedschaar Systemen in de Nederlandse Getijwateren. *Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap*, pp. 303-325.

- Vroon, J., C. Storm and J. Coossen (1997), Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rijkswaterstaat, report RIKZ-97.023 (in Dutch).
- 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., 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. , 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. en J. C. Winterwerp, 2001, Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems, Proceedings of the 2nd IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine morphodynamics.
- Winterwerp, J.C., Z.B. Wang, M.J.F Stive, A. Arends, C. Jeuken, C. Kuijper en P.M.C. Thoolen, 2001, A new morphological schematisation of the Western Scheldt estuary, The Netherlands, Proceedings of the 2nd IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine morphodynamics.
- 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.