

De fysische effecten van verruiming in de Westerschelde

*Verbetering van het MOVE denkmodel met
behulp van het cellenconcept*

Afstudeerrapport

Februari 2003

Henny Schippers

Afstudeercommissie

Prof. Dr. S.J.M.H. Hulscher (UT)

Dr. R.M.J. van Damme (UT)

Ir. B.G.T.M. Peters (RIKZ)



Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit

Faculteit Construerende Technische Wetenschappen
Civiele Technologie & Management

Samenvatting

De Westerschelde is een estuarium in het zuidwesten van Nederland en is één van de laatste natuurlijke estuaria in noordwest Europa. Het is een dynamisch meergeulensysteem, gekenmerkt door hoofd- en nevengeulen, kortsluitgeulen, platen, slikken, schorren en drempels, waarin de interactie tussen waterbeweging, sedimenttransport en morfologie de aandrijvende kracht is. Een van de belangrijkste functies van de Westerschelde is het dienen als scheepvaartroute. Ten behoeve van de scheepvaart wordt veel gebaggerd in de Westerschelde om de vaargeul op diepte te houden (onderhoudsbaggerwerk). Door het steeds toenemende aantal schepen met grotere diepgang, wordt ook een steeds diepere vaarweg vereist, wat betekent dat de Westerschelde in toenemende mate verruimd dient te worden. De Nederlandse overheid vreest voor nadelige gevolgen voor het meergeulensysteem. Het behoud van het meergeulensysteem is een voorwaarde om de drie verschillende gebruiksfuncties van de Westerschelde (toegankelijkheid, natuurlijkheid en veiligheid) te kunnen garanderen.

In het kader van het project Monitoring Verruiming Westerschelde (MOVE) is een denkmodel opgezet. Dit denkmodel (tekst en schema) is een fysische beschrijving van mogelijke processen die na de verruiming geïnitieerd worden en het dient als basis voor het opstellen van hypothesen. Een belangrijk gemis van het huidige denkmodel is dat geen onderscheid wordt gemaakt tussen het behoud van het meergeulensysteem (stabiel systeem) of totale degeneratie naar een ééngeulensysteem (instabiel systeem).

Een ander model, het cellenconcept (onderdeel van de Lange Termijn Visie Schelde-estuarium), is een middel om te onderzoeken wat de invloed van baggeren en storten verruiming is op de stabiliteit van het meergeulensysteem. Het concept bestaat uit een schematisatie van geulen en platen in de Westerschelde en een stabiliteitsanalyse van het geschematiseerde geulensysteem (morfologische cel).

In dit onderzoek is het denkmodel, aan de hand van het cellenconcept, aangepast en verbeterd, zodat het een betere beschrijving kan geven van de fysische processen in het estuariumstelsel en de morfologische situatie na verruiming.

Dit is gedaan door het denkmodel en het cellenconcept te doorgronden en te evalueren, beide modellen te vergelijken en het cellenconcept met het denkmodel te integreren, zodat later de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept voor zover mogelijk kon worden toegepast.

Uit de evaluatie volgden een aantal belangrijke beperkingen van het model, die aangeven dat het denkmodel niet compleet is.

Uit de resultaten van het cellenconcept kon geconcludeerd worden dat baggeren alleen geen invloed heeft op stabiliteit; baggeren en storten of alleen storten in een cel wel. Daarnaast volgden uit de evaluatie van het cellenconcept interessante bevindingen. De resultaten van de stabiliteitsanalyse bleken namelijk erg gevoelig te zijn voor de gemaakte keuzes (keuzes voor de knooppuntrelatie die de verdeling van sediment over de geulen aangeeft, de waarde voor k uit de knooppuntrelatie en de sedimenttransportformule). Daarnaast is er ook weinig zekerheid over de juistheid van deze keuzes. Een andere bevinding is dat bij het toepassen van de stortcriteria (resultaat stabiliteitsanalyse) nog wel een aantal kanttekeningen geplaatst moeten worden.

De vergelijking tussen het denkmodel en het cellenconcept leverde bijna alleen verschillen op. Een groot verschil en daardoor ook probleem voor de integratie van het cellenconcept en het denkmodel, is het verschil in ruimteschaal. Dit wordt opgelost door aparte denkmodellen te maken op celniveau (deeldenkmodellen in de vorm van schema's). In een denkmodel op celniveau kan ook de verandering in bagger- en stortstrategie worden meegenomen door de gevolgen van verschillende scenario's (baggeren&storten, storten of baggeren) te onderzoeken. Het nieuwe denkmodel bestaat uit de uitwerking van de drie deeldenkmodellen voor de verschillende scenario's. Bij de uitwerking wordt de theorie van de stabiliteitsanalyse zoveel mogelijk gebruikt en wordt het stortcriterium (% bruto sedimenttransportcapaciteit) ingepast.

Het nieuwe denkmodel is duidelijk aangepast en theoretisch verbeterd ten opzichte van het huidige denkmodel. De parameters van het denkmodel tonen echter nog steeds dezelfde kwalitatieve verandering. De aanpassingen van het model zijn gebaseerd op de theorie van het cellenconcept. De combinatie van processen in de deeldenkmodellen is nu completer door het meenemen van de interactie tussen de hoofdgeul en nevengeul en door het invoegen van het zelfversterkend proces, wat ervoor kan zorgen dat het systeem zijn stabiliteit verliest en degenereert naar een ééngeulstelsel. Vooralsnog wordt het stortcriterium van het cellenconcept gebruikt om aan te kunnen geven wanneer dit zelfversterkend proces in gang gezet wordt.

Een van de belangrijkste aanbevelingen voor verdere verbetering van het nieuwe denkmodel is het toetsen van het denkmodel zelf (kwalitatieve verandering van parameters en de relatie ertussen), het toetsen van stabiliteit (met behulp van meetgegevens) of het kunnen aantonen van het zelfversterkend proces in de deeldenkmodellen. Stabiliteit zal echter moeilijk toetsbaar zijn, omdat de relevante morfologische tijdschaal groot kan zijn en het dus lang kan duren voordat relevante veranderingen in het systeem zichtbaar zijn.

Voorwoord

In het kader van mijn studie Civiele Technologie & Management aan de Universiteit Twente heb ik een afstudeeronderzoek verricht bij Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) te Middelburg. Vanaf deze plaats wil ik alle mensen die hebben bijgedragen aan het verwezenlijken van dit resultaat hartelijk bedanken. Een paar mensen wil ik in het bijzonder noemen.

Allereerst wil ik mijn commissieleden Suzanne, Ruud en Bianca bedanken voor hun inzichten, suggesties en heldere kijk op het rapport. Vooral het volledig begrijpen van het cellenconcept heeft me aardig wat tijd gekost, maar met onder andere hun hulp is het dan toch gelukt. Ik wil Bianca graag nog in het bijzonder bedanken voor het meedenken tijdens mijn onderzoek en het feit dat ik altijd bij haar terechtkon voor vragen. Daarnaast wil ik graag nog Dick, Gert-Jan, Birgit en Bart van het RIKZ noemen (en alle anderen die ik ben vergeten), die mij met hun kennis hebben geholpen met het inzicht krijgen in de fysica van de Westerschelde.

Ook wil ik Wang en Han Winterwerp van het WL nog bedanken voor hun hulp bij het onderdeel cellenconcept.

Ik zal na dit onderzoek de Westerschelde nooit meer als 'gewoon water' beschouwen... En als ik op het strand van Vlissingen lig en de enorme schepen voorbij zie varen, zal ik nog met veel plezier aan de tijd in Zeeland terugdenken!

Veel plezier met het lezen van dit rapport.

Henny

Middelburg, 8 februari 2002

Inhoudsopgave

SAMENVATTING	I
VOORWOORD	III
INHOUDSOPGAVE	IV
LIJST MET FIGUREN	VI
LIJST MET TABELLEN	VII
1 INLEIDING	1
1.1 ACHTERGRONDINFORMATIE	1
1.2 AANLEIDING	2
1.3 DOELSTELLING EN PLAN VAN AANPAK	2
1.4 AFBAKENING	2
1.5 LEESWIJZER	2
2 DE WESTERSCHELDE	4
2.1 SYSTEEMBESCHRIJVING	4
2.1.1 <i>Geulen</i>	5
2.1.2 <i>Drempels</i>	6
2.1.3 <i>Platen en ondiepwaterareaal</i>	6
2.1.4 <i>Slik en schor</i>	6
2.2 VERRUIMING WESTERSCHELDE	7
2.2.1 <i>Bagger-, stort en zandwinstrategie</i>	7
2.2.2 <i>Verruimingen in het verleden</i>	7
3 MORFOLOGISCH SYSTEEM	9
3.1 MORFOLOGISCHE DYNAMIEK	9
3.2 MORFOLOGISCHE ONTWIKKELING	10
3.2.1 <i>Relatie met getij-dominantie en getij-asymmetrie</i>	10
3.2.2 <i>Evenwicht en stabiliteit</i>	10
3.2.3 <i>Invloed van baggeren en storten op evenwicht en stabiliteit</i>	11
4 DENKMODEL	13
4.1 WAT IS HET DENKMODEL?	13
4.2 PROCESSEN IN HET DENKMODEL	13
4.2.1 <i>Ingreep</i>	14
4.2.2 <i>Combinatie van processen</i>	14
4.2.3 <i>Morfologische situatie</i>	15
4.3 SCHEMA DENKMODEL	16
4.4 EVALUATIE DENKMODEL	17
4.4.1 <i>Beperkingen denkmodel (tekst)</i>	17
4.4.2 <i>Tekortkomingen schematisatie denkmodel</i>	18
4.5 MOGELIJKHEDEN VOOR VERBETERING DENKMODEL	18
4.6 DEELCONCLUSIES	19
5 CELLENCONCEPT	20
5.1 WAT IS HET CELLENCONCEPT?	20
5.2 THEORIE CELLENCONCEPT	20
5.2.1 <i>Schematisatie van geulen en platen (Winterwerp e.a., 2000, 2001)</i>	20
5.2.2 <i>Stabiliteitsanalyse van een morfologische cel (Winterwerp e.a., 2000, Wang e.a., 2001)</i>	22
5.3 BETEKENIS CELLENCONCEPT VOOR BAGGER- EN STORTBELEID	28
5.4 DEELCONCLUSIES	29
6 VERBETERING DENKMODEL MET BEHULP VAN CELLENCONCEPT	30
6.1 VERGELIJKING	30
6.1.1 <i>Overeenkomsten</i>	30
6.1.2 <i>Verschillen</i>	30

6.2	INTEGRATIE CELLENCONCEPT EN DENKMODEL.....	31
6.3	TOEPASSING STABILITEITSANALYSE EN STORTCRITERIUM IN DENKMODEL.....	33
6.4	DEELCONCLUSIES	36
7	NIEUW DENKMODEL	37
7.1	DENKMODEL OP CELNIVEAU (DEELDENKMODELLEN)	37
7.1.1	<i>Deeldenkmodel voor cel – baggeren en storten.....</i>	<i>38</i>
7.1.2	<i>Denkmodel voor cel – storten.....</i>	<i>39</i>
7.1.3	<i>Denkmodel voor cel – baggeren.....</i>	<i>41</i>
7.1.4	<i>Vergelijking uitvoer deeldenkmodellen</i>	<i>41</i>
7.2	KOPPELING DEELDENKMODELLEN	42
7.3	TOEKOMSTBEELD MET BEHULP VAN NIEUW DENKMODEL.....	42
7.3.1	<i>Belang van situatie voorafgaand aan ingreep</i>	<i>42</i>
7.3.2	<i>Toekomstbeeld met behulp van stabiliteit</i>	<i>43</i>
8	CONCLUSIES	45
9	DISCUSSIE.....	47
10	AANBEVELINGEN	49
	REFERENTIELIJST	51

Lijst met figuren

Figuur 1.1: Leeswijzer	3
Figuur 2.1: Dieptes Westerschelde (ScheldeAtlas, 1999)	4
Figuur 2.2: Dwarsdoorsnede morfologische eenheden (Huijs, 1996)	5
Figuur 2.3: Schema ideaal systeem ebgeul en vloedscharen (Van Veen, 1950)	5
Figuur 2.4: Drempellocaties Westerschelde (ScheldeAtlas, 1999)	6
Figuur 3.1: Morfodynamische cyclus	9
Figuur 3.2: Zandneren (Van Veen, 1950)	10
Figuur 4.1: Denkmodel met greybox-redenatie	14
Figuur 4.2: Versteilling reliëf (Mol e.a., 1997)	15
Figuur 4.3: Afname komberging (Mol e.a., 1997)	16
Figuur 4.4: Schema denkmodel (Liek, (2001)	17
Figuur 5.1: Morfologische schematisatie van het geulsysteem in de Westerschelde (Jeuken, 2000)	21
Figuur 5.2: Morfologische cel	21
Figuur 5.3: Schematisatie Westerschelde in morfologische cellen (Winterwerp e.a., 2000)	22
Figuur 5.4: Splitsing riviersituatie en splitsing/samenvloeiing getijsituatie	23
Figuur 5.5: Sedimenttransporten in een morfologische cel	25
Figuur 6.1: Integratie denkmodel en cellenconcept	32
Figuur 7.1: schema denkmodel voor een cel – baggeren en storten	38
Figuur 7.2: Schema denkmodel voor een cel – storten	40
Figuur 7.3: Schema denkmodel voor een cel – baggeren	41

Lijst met tabellen

Tabel 6.1: Algemene verschillen denkmodel en cellenconcept.....	30
Tabel 6.2: Verschillen met betrekking tot de fysische processen.....	31
Tabel 6.3: Toelichting bij Figuur 6.1.....	33
Tabel 6.4: Toepassing stabiliteitsanalyse in het denkmodel.....	35

1 Inleiding

1.1 Achtergrondinformatie

De Westerschelde is een estuarium in het zuidwesten van Nederland en is het Nederlandse deel van het Schelde-estuarium. Een estuarium is een door land ingesloten, in vrije verbinding met de zee staand kustwater, dat onder getijdeninvloed staat. Het van het land afstromende zoete water mengt zich in het estuarium met het zoute zeewater. De Westerschelde kan ook gezien worden als een getijdebekken, omdat de waterbeweging in veel sterkere mate door het getij wordt beïnvloed dan door de rivierafvoer en de sedimentatie voornamelijk afhankelijk is van de aanvoer vanuit zee.

Een van de belangrijkste functies van de huidige Westerschelde is het dienen als scheepvaartroute naar de haven van Antwerpen (*toegankelijkheid*). De andere belangrijke functies zijn *veiligheid* (tegen overstromen) en *natuurlijkheid* (van het fysische en ecologische systeem).

Ten behoeve van de scheepvaart wordt veel gebaggerd in de Westerschelde. Door het steeds toenemende aantal schepen met grotere diepgang, wordt ook een steeds diepere vaarweg vereist, wat betekent dat de Westerschelde in toenemende mate verruimd dient te worden.

De Westerschelde is beschermd, omdat het een van de laatste natuurlijke estuaria is die Noordwest Europa kent. De Nederlandse overheid staat daarom ook sceptisch tegenover verdere verruiming en vreest voor nadelige gevolgen voor het meergeulenstelsel van de Westerschelde. Voor het verenigen van alle gebruiksfuncties (natuurlijkheid, toegankelijkheid en veiligheid) is het van groot belang dat het meergeulenstelsel behouden blijft. Directie Zeeland is verantwoordelijk voor het beheer van de Westerschelde en moet van nieuwe activiteiten, waaronder verdere verruiming, de effecten bepalen en deze toetsen aan de 'EU, Vogel en Habitat' richtlijnen, die in 1997 zijn opgesteld.

Om de gevolgen van verdere verruiming op de Westerschelde te onderzoeken is de Nederlandse overheid samen met de Belgische overheid na de laatste verruiming in 1999 gestart met een **Lange Termijn Visie** voor het Schelde-estuarium (LTV). Dit project is inmiddels afgerond. In LTV werden de gevolgen van mogelijke ontwikkelingsrichtingen geschetst. Bij het besluitvormingsproces over te volgen ontwikkelingsrichting spelen de reeds waargenomen effecten van de verruiming van de jaren 1970-1975 een grote rol. Om de effecten van de laatste verruiming (48'-43') te volgen is door Rijkswaterstaat Directie Zeeland in samenwerking met het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) een monitoringsproject opgezet: **Monitoring Verruiming Westerschelde (MOVE)**. In dit project worden fysische, biologische en chemische ontwikkelingen in de Westerschelde gemonitord. De effecten van de verruiming 48'-43' worden in kaart gebracht door de ontwikkeling na de verruiming te vergelijken met de ontwikkeling voor de periode van de ingreep.

In het kader van MOVE is een *denkmodel* opgezet. Dit denkmodel beschrijft kwalitatief de mogelijke fysische processen die na verruiming in gang gezet worden en de morfologische gevolgen van verruiming in samenhang met de ecologische ontwikkeling van het gebied. Het denkmodel is gebaseerd op de aanname dat morfologische ontwikkelingen na de verruiming 48'-43' op een soortgelijke wijze zullen verlopen als na de verruiming van '70-'75. Op basis van dit denkmodel zijn hypothesen opgesteld over de ontwikkelingen in de Westerschelde na de verruiming 48'-43'. Deze hypothesen worden getoetst in het MOVE evaluatierapport 2003.

In het kader van het project LTV is door WL|Delft Hydraulics een morfologisch *cellenconcept* ontwikkeld. Hiermee kan de invloed van baggeren en storten op de stabiliteit en dus op het voortbestaan van het huidige meergeulenstelsel bepaald worden

1.2 Aanleiding

Een manier om het begrip van de processen in het systeem te vergroten is de resultaten van de toetsing van de hypothesen, gebaseerd op het denkmodel, te gebruiken (evaluatierapport 2003). Een andere manier hiervoor is het denkmodel theoretisch te beschouwen door de fysische processen in de Westerschelde te bestuderen. Een belangrijk, reeds bekend, gemis in het denkmodel is de stabiliteit van het meergeulensysteem. Met andere woorden: in het denkmodel worden geen uitspraken gedaan over behoud over verlies van het meergeulensysteem. Stabiliteit wordt echter wel meegenomen in het cellenconcept. De theorie van het cellenconcept kan het begrip van het systeem vergroten en daarom gebruikt worden om de theorie van het denkmodel te verbeteren of aan te passen. Het verbeterde denkmodel zou een beter beeld van de effecten van verruiming in de Westerschelde kunnen schetsen.

1.3 Doelstelling en plan van aanpak

Het doel van het onderzoek is, aan de hand van het cellenconcept, het huidige denkmodel aan te passen of te verbeteren, zodat het een betere beschrijving kan geven van de fysische processen in het estuariumsysteem en de morfologische situatie na verruiming.

Dit doel wordt bereikt door allereerst het denkmodel en het cellenconcept te doorgronden en te evalueren en vervolgens een vergelijking te maken tussen de modellen. Het resultaat hiervan wordt gebruikt om een link te vinden tussen de modellen om vervolgens het denkmodel met het cellenconcept te integreren. De opzet voor een nieuw denkmodel wordt verder uitgewerkt.

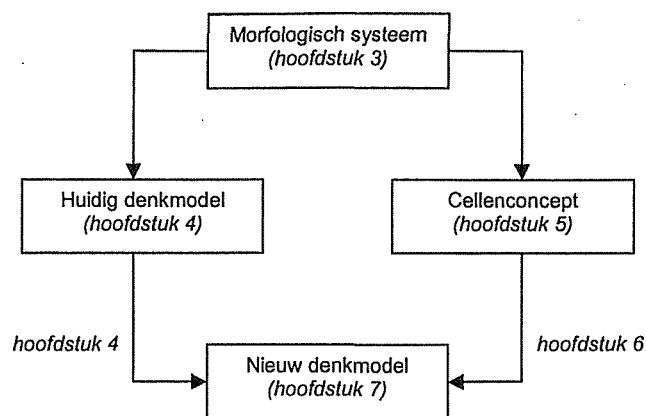
1.4 Afbakening

De Westerschelde is een dynamisch systeem en de achterliggende fysische (hydrodynamische en morfodynamische) processen zijn complex en moeilijk te doorgronden. Het denkmodel geeft een beschrijving van deze fysische processen na verruiming. Het cellenconcept wordt gebruikt om een indicatie van het bagger- en stortcriterium te vinden, wat de grens aan kan geven tussen stabiliteit en instabiliteit van het meergeulensysteem. De theorieën van deze twee modellen zullen als uitgangspunt worden gebruikt voor de beschrijving van de effecten van verruiming.

In dit onderzoek ligt de nadruk op vraag of het meergeulensysteem behouden blijft, omdat het behoud hiervan de drie gebruiksfuncties (toegankelijkheid, veiligheid en natuurlijkheid) kan waarborgen.

1.5 Leeswijzer

In dit rapport wordt in hoofdstuk 1 begonnen met het geven van achtergrondinformatie en het duidelijk maken van de doelstelling van het onderzoek. Ook wordt een plan van aanpak voor het bereiken van dit doel beschreven. Daarna wordt in hoofdstuk 2 beschreven hoe de Westerschelde er morfologisch gezien uitziet en worden definities gegeven van de verschillende eenheden van de Westerschelde. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de noodzakelijke kennis van het morfologische systeem behandeld en daarna wordt het resultaat van het bestuderen en evalueren van het denkmodel en het cellenconcept gegeven in respectievelijk de hoofdstukken 4 en 5. Hieruit volgen ook mogelijke verbeteringen voor het denkmodel. In hoofdstuk 6 wordt dan de vergelijking van de modellen behandeld en wordt beschreven hoe de theorie van het cellenconcept het denkmodel kan verbeteren. Dit plan van aanpak is in Figuur 1.1 geschematiseerd.



Figuur 1.1: Leeswijzer

In hoofdstuk 7 wordt dan de uitwerking van het nieuwe denkmodel gegeven. En tot slot worden de conclusies van het onderzoek, de discussie en de aanbevelingen voor vervolgonderzoek in hoofdstuk 8, 9 en 10 beschreven.

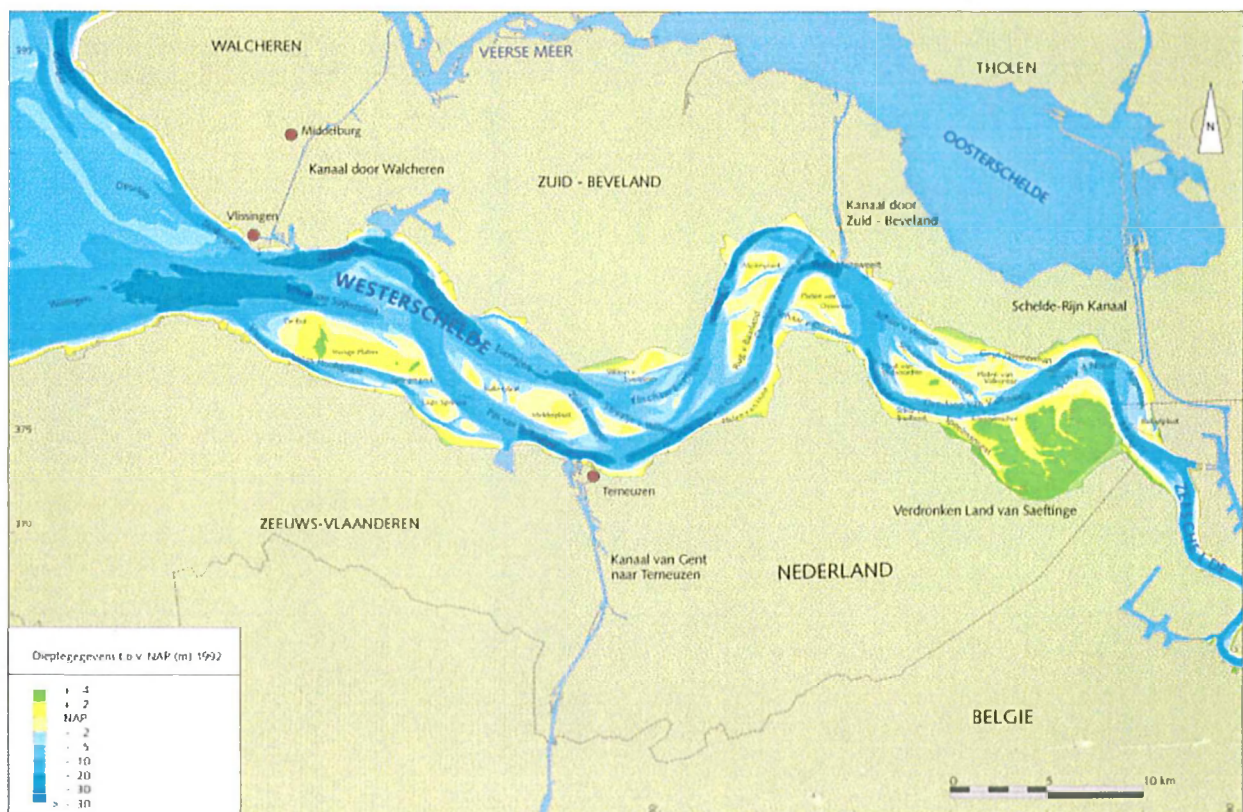
2 De Westerschelde

In dit hoofdstuk wordt de Westerschelde in het kort beschreven. Paragraaf 2.1 geeft beschrijvingen en definities van de verschillende eenheden in de Westerschelde. Paragraaf 2.2 gaat daarna in op de verruiming van de Westerschelde.

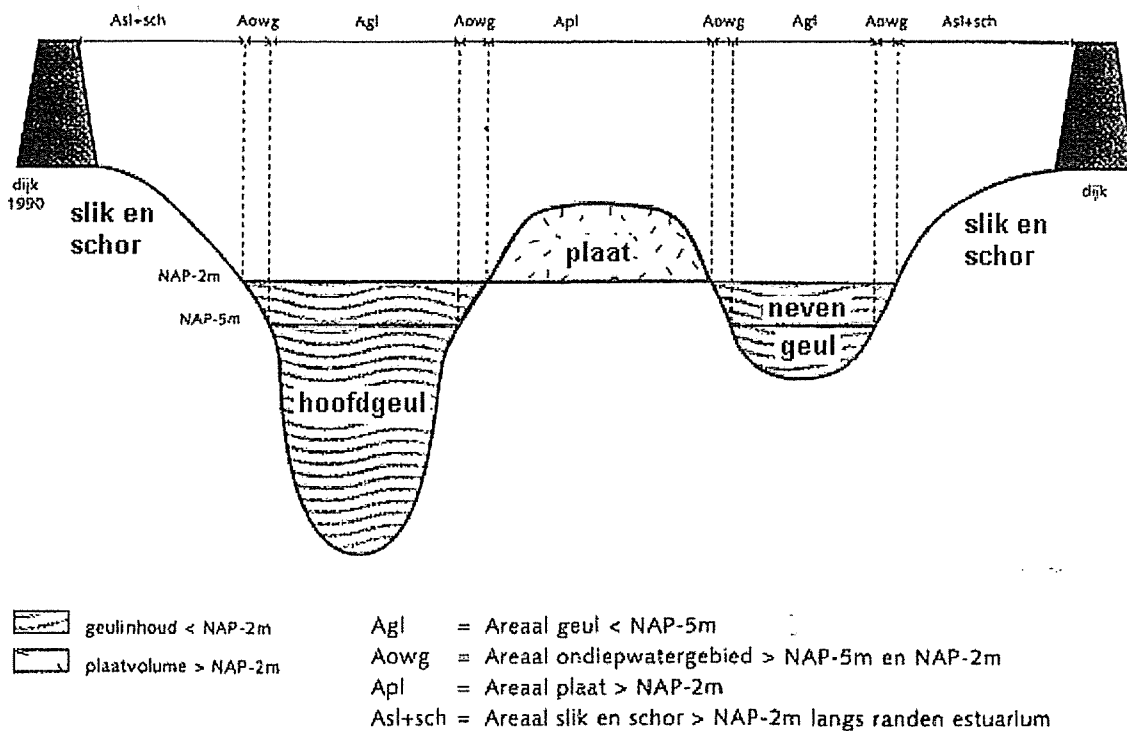
2.1 Systeembeschrijving

Menselijk ingrepen in het verleden en de autonome morfologische ontwikkeling hebben er samen toe geleid dat de Westerschelde zijn huidige vorm heeft gekregen (Witteveen+Bos, 1999). Deze vorm wordt gekarakteriseerd door een meergeulensstelsel (ook wel meergeulensysteem genoemd), wat op een tijdschaal van decennia waarschijnlijk in een dynamisch evenwicht verkeert (Winterwerp e.a., 2000).

Het meergeulensysteem is te herkennen in Figuur 2.1. De verschillende eenheden die in deze dieptekaart te onderscheiden zijn, zijn ook geschematiseerd in een dwarsdoorsnede (Figuur 2.2).



Figuur 2.1: Dieptes Westerschelde (ScheldeAtlas, 1999)

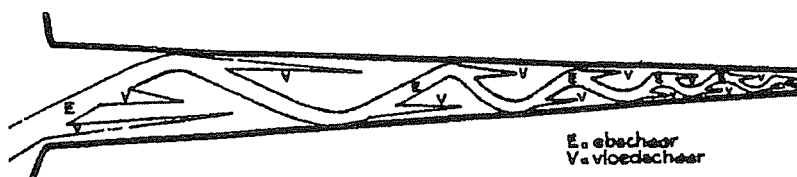


Figuur 2.2: Dwarsdoorsnede morfologische eenheden (Huijs, 1996)

De eenheden worden hieronder beschreven en gedefinieerd.

2.1.1 Geulen

Van Veen (1950) schematiseert de Westerschelde als een ideaal systeem met een ebgeul (ebschaar) meanderend van de ene oever naar de andere oever en daarin takken die zich in elke bocht in stroomopwaartse richting langs de oevers uitstrekken. Zo'n tak wordt een vloedschaar genoemd. Deze schematisatie is in Figuur 2.3 weergegeven.



Figuur 2.3: Schema ideaal systeem ebgeul en vloedscharen (Van Veen, 1950)

De ebgeulen, vloedscharen (voortaan vloedgeulen genoemd) worden hieronder nogmaals apart beschreven. De kortsluitgeul, een andere kleinere geul, komt ook aan bod.

Ebgeulen (hoofdgeulen) (de Jong e.a., 1996)

De ebgeulen liggen voornamelijk open voor eb. Deze diepe geulen schuren in de buitenbochten uit en worden daardoor van nature steeds bochtiger, totdat ze de dijken van de Westerschelde bereikt hebben. Ze zijn over het algemeen de **hoofdgeulen** en worden als hoofdvaarwater gebruikt.

Vloedgeulen (nevengeulen) (de Jong e.a., 1996)

De vloedgeulen liggen voornamelijk open voor vloed. De geulen zijn in het algemeen wat minder diep dan de ebgeulen en zijn meestal vrij recht. Ze vormen de **nevengeulen** in de Westerschelde.

Kortsluitgeulen (de Jong e.a., 1996)

De kleinere kortsluitgeulen vormen de verbinding tussen de eb- en de vloedgeul. Dit type geulen migreert op korte tijdschalen en is veruit het meest beweeglijke type in de Westerschelde. Soms verplaatsen de kortsluitgeulen zo'n 100 meter per jaar.

Definitie (Huijs, 1996): In de morfologische schematisatie worden eb- en vloedgeulen van elkaar gescheiden door drempels. De grens tussen de twee geulen is gedefinieerd op het hoogste punt van de drempel (beschrijving drempel: zie paragraaf 2.1.2). De geulinhoud is de inhoud onder -2 m NAP. Het areaal van de geul is de oppervlakte van de geul bij deze inhoud. De inhoud en het areaal van de kortsluitgeulen worden afhankelijk van hun eb- of vloeddominantie bij respectievelijk de ebgeul of de vloedgeul ingedeeld. Deze relatief kleine kortsluitgeulen hebben overigens een kleine invloed op de volumeverandering van de geul waarbij ze zijn ingedeeld.

2.1.2 Drempels

Onderstaande figuur toont de locaties van de belangrijkste drempels in de Westerschelde.



Figuur 2.4: Drempellocaties Westerschelde (ScheldeAtlas, 1999)

Drempels zijn natuurlijke, door de stroming zelf veroorzaakte, lokale ondiepten van los sediment. In Verbeek e.a. (1998) is uitgebreid onderzoek gedaan naar deze drempels. Drempels komen voor in rechte stukken geulen tussen twee bochten of op de overgang tussen twee geulen, zoals tussen een hoofd- en een nevengeul. De naam wordt ontleend aan de scheepvaart, omdat deze ondieptes een belemmering voor de doorvaart vormen. Daarom worden deze obstakels in de vaargeul door baggeren weggenomen.

2.1.3 Platen en ondiepwaterareaal

Tussen de vloedgeulen en de ebgeulen, los van de oever, liggen grote zandplaten. Deze gebieden vallen elk getij droog en worden daarom ook wel intergetijdengebieden genoemd. Platen worden soms afgebroken door het verplaatsen van geulen, maar op andere plaatsen kunnen ook weer nieuwe, jonge platen ontstaan. Het gebied tussen de plaat en de geul of tussen het slik en de geul wordt het ondiepwaterareaal genoemd. (de Jong e.a., 1996)

Definitie (Huijs, 1996): De inhoud van de plaat wordt gedefinieerd als het zandvolume boven -2m NAP, tussen de eb- en vloedgeul. Het areaal van de plaat is de oppervlakte bij deze inhoud. De gemiddelde hoogte van de plaat kan bepaald worden door de inhoud van de plaat te delen door het plaatoppervlak. Het ondiepwaterareaal is het gebied, waarbij de bodemligging tussen -2m NAP en -5m NAP ligt.

2.1.4 Slik en schor

Het gebied tussen geul en dijk kan uit slik en schor bestaan. Slik is aangeslibde onbegroeide grond, dat bij eb bovenkomt en is dus een intergetijdengebied. Schor is het gebied met zoutminnende vegetatie, dat alleen bij springtij door zout en brak water wordt overspoeld. (ScheldeAtlas, 1999)

Definitie (Huijs, 1996): Het areaal slik en schor is het gebied boven -2m NAP, wat langs de randen van het estuarium ligt.

2.2 Verruiming Westerschelde

Ten behoeve van de scheepvaart worden op verschillende plaatsen in de Westerschelde drempels verlaagd om de vaargeul op diepte (en breedte) te brengen (aanlegbaggerwerk). Om de vaargeul daarna op deze diepte en breedte te houden, zal onderhoudsbaggerwerk uitgevoerd moeten worden. Het zand dat vrijkomt bij zowel de verlaging van de drempel als bij het daarop volgende onderhoudsbaggerwerk wordt op anderen plaatsen in de Westerschelde teruggestort.

Naast deze verruiming wordt er in de Westerschelde ook zand gewonnen voor commerciële doeleinden. Zandwinning ten behoeve van de overheid is na 1995 gestopt. Zandwinning in de Westerschelde is geoorloofd, omdat het systeem zandimporterend leek en zandwinning op die manier voor behoud van de zandbalans kon zorgen. Verlanding (netto import van sediment in het estuarium) kan op die manier voorkomen worden.

Tegenwoordig kan niet meer gegarandeerd worden dat de Westerschelde zandimporterend is. Er is steeds meer informatie beschikbaar dat dit tegenspreekt; de Westerschelde schijnt zelfs nu zandexporterend te zijn (Liek e.a., 2002). Het huidige zandwinbeleid zal hier dus op moeten worden aangepast.

Dit onderzoek gaat over de fysische effecten van verruiming in de Westerschelde. Omdat de gevolgen van verruiming niet makkelijk te onderscheiden zijn van zandwinning, kunnen deze verschillende vormen van baggeren dus ook niet geheel los van elkaar gezien worden. Echter, de hoeveelheid zand die gebaggerd moet worden om de vaarweg op diepte te houden is veel malen groter dan de hoeveelheid zand die gewonnen wordt in een gebied. De fysische effecten van onderhoudsbaggerwerk zullen dus relatief veel groter dan van zandwinning.

De bagger- en stortlocaties worden in bijlage A.1 laten zien.

De totale bagger- en storthoeveelheden staan in bijlage A.2.

Gedurende (bijna) het hele jaar wordt zand gebaggerd en gestort (onderhoudsbaggerwerk).

2.2.1 Bagger-, stort en zandwinstrategie

Om het huidige morfologische evenwicht (meergeulensysteem) zo weinig mogelijk aan te tasten zal een uitgebalanceerd bagger-, stort en zandwinstrategie moeten worden toegepast. Deze strategie is in de loop der jaren dan ook veranderd; er heeft een verschuiving plaatsgevonden van storten en zandwinnen: vroeger werd het gebaggerde zand in het oosten in de parallelle geul terug gestort en werd er zand gewonnen in het westelijk deel (oude bagger-, stort en zandwinstrategie). Tegenwoordig wordt het oostelijk deel ontzien, door het gebaggerde zand niet terug te storten in de parallelle geul, maar in het westelijk deel van de Westerschelde. Daarnaast wordt er nu zand gewonnen in het oostelijk deel van de Westerschelde en minder in het westelijk deel (nieuwe bagger-, stort en zandwinstrategie). De nieuwe bagger-, stort- en zandwinstrategie zorgt er dus voor dat in het oostelijk deel vooral meer verruimd wordt en in het westelijk deel meer gestort.

2.2.2 Verruimingen in het verleden

In het verleden hebben twee grote verruimingen plaatsgevonden:

- In de periode 1970 tot 1975 vond de *eerste grote verruiming* plaats. De drempels werden in zoverre verlaagd dat een minimale diepte van 14,5 meter beneden NAP voor de vaargeul gegarandeerd kon worden. Tijdens en na deze verruiming werd de oude bagger-, stort en zandwinstrategie toegepast.
- De *tweede grote verruiming* vond plaats van juli 1997 tot juli 1998. De drempels werden nu nog verder verlaagd (1 – 1,5 meter) zodat een minimale diepte van ongeveer 16 meter beneden NAP voor de vaargeul gegarandeerd kon worden. Tijdens deze verruiming

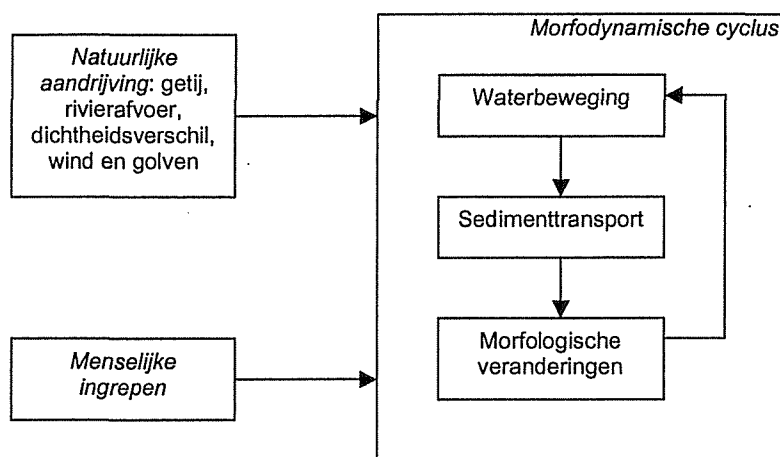
werd de nieuwe bagger-, stort en zandwinstrategie toegepast en die strategie wordt nu nog steeds toegepast.

3 Morfologisch systeem

De Westerschelde is een morfodynamisch systeem. In de paragraaf 3.1 wordt uitgelegd wat morfologische dynamiek is en wordt dynamiek ingedeeld in een aantal ruimte- en tijdschalen. In de paragraaf 3.2 wordt de morfologische ontwikkeling in het bijzonder besproken en wordt beschreven wat de invloed is van baggeren en storten op de morfologie.

3.1 Morfologische dynamiek

Op iedere schaal in de Westerschelde vindt er niet-lineaire interactie plaats tussen waterbeweging, sedimenttransport en morfologie. (Jeuken, 2000) Het getij, de rivierafvoer, het dichtheidsverschil veroorzaakt door de menging van zeewater en rivierwater, wind en golven hebben invloed op deze interactie, maar menselijke ingrepen ook. De morfodynamische cyclus kan als volgt worden weergegeven.



Figuur 3.1: Morfodynamische cyclus

In Stive e.a. (1998) wordt onder morfologische dynamiek de intensiteit en frequentie van morfologische veranderingen en het daaraan gerelateerde sedimenttransport verstaan. Voor de Westerschelde geldt dat de getijbeweging de belangrijkste aandrijving is en dat de morfologische veranderingen in de Westerschelde voornamelijk worden bepaald voor zand (Stive e.a., 1998).

In Stive e.a. (1998) wordt een indeling van morfologische dynamiek in ruimteschalen gegeven. De tijdschalen zijn responstijden van het systeem op bijbehorende ruimtelijke schaal

- *Megaschaal dynamiek*: veranderingen op de schaal van de hele Westerschelde. Bijbehorende tijdschaal is eeuwen.
- *Macroschaal dynamiek*: veranderingen op het niveau van hoofd- en nevengeulen. Bijbehorende tijdschalen zijn decennia.
- *Mesoschaal dynamiek*: veranderingen zoals het ontstaan, migreren en verdwijnen van kortsluitgeulen, sedimenttransport over de platen, plaat-geul uitwisseling van sediment, enzovoort. Bijbehorende tijdschalen zijn jaren.
- *Microschaal dynamiek*: veranderingen op het niveau van beddingvormen. Bijbehorende tijdschalen zijn dagen.

Niet voor alle ruimte- en tijdschalen zullen relevante natuurlijke processen en menselijke ingrepen dezelfde invloed hebben. Verruiming, onderhoudsbaggerwerk en stortingen hebben vooral direct uitwerking in macro- en mesoschaal op een tijdschaal van decennia. Op grotere schaal (Westerschelde) en langere termijn gaan de natuurlijke processen zeespiegelstijging (met toenemende sedimentvraag als gevolg) en sedimentaanbod (met name vanuit de voordelta) een belangrijke rol spelen. Echter, via interne wisselwerkingen, de interacties tussen de verschillende schaalniveaus, kan er ook respons van het systeem op andere schaalniveaus ontstaan (vrij gedrag).

De interacties tussen de verschillende schaalniveaus kunnen voor een deel als onderlinge beperkingen worden beschouwd. (Stive e.a., 1998) Zo zullen de kortsluitgeulen bijvoorbeeld verdwijnen als er geen dynamiek meer plaatsvindt op macroschaal; de macroschaal dynamiek is een belangrijke voorwaarde voor mesoschaal dynamiek.

In dit onderzoek wordt de invloed van verruiming, onderhoudsbaggerwerk en stortingen bekeken en zullen dus vooral de morfologische veranderingen in de macro- en mesoschaal op een tijdschaal van decennia de aandacht krijgen. De natuurlijke processen zeespiegelstijging en sedimentaanbod worden niet meegenomen in het onderzoek.

3.2 Morfologische ontwikkeling

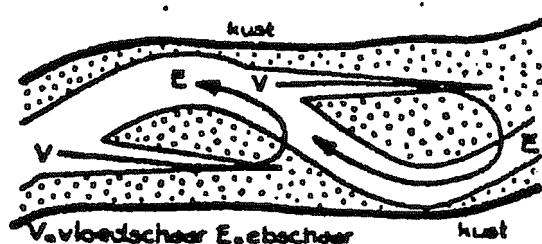
3.2.1 Relatie met getij-dominantie en getij-asymmetrie

Getijdominantie is specifiek voor de Westerschelde. Getij-dominantie kan worden onderverdeeld in vloeddominantie en ebdominantie en kan betrekking hebben op het maatgevend getijvolume, de maatgevende snelheden en de maatgevende zandtransporten (Steijn e.a., 2000).

Het maatgevende getijvolume in een geul zal uiteindelijk het doorstroomoppervlak van de geul bepalen. Getij-dominantie heeft dus direct gevolgen voor de **evenwichtsdoorsnede** van de geulen (Steijn e.a., 2000).

Wanneer naar de maatgevende zandtransporten wordt gekeken, overheerst in een normale vloodschaar een netto vloedzandstroom en in een normale ebschaar een netto ebzandstroom (van Veen, 1950). De oorzaak van dit **netto sedimenttransport** ligt in de asymmetrie van het verticale getij (waterstanden) en het horizontale getij (snelheden). (Steijn e.a., 2000) Deze asymmetrie wordt veroorzaakt door de wijze waarop de verschillende getijcomponenten met elkaar interfereren. Traagheid van de getijgolfvoortplanting, bodemwrijving en langsgradiënten in het getijdebiet in relatie tot het kombergingsoppervlak, spelen hierbij een grote rol.

Er ontstaan door deze netto sedimenttransporten zogenaamde zandneren (van Veen, 1950), waarbij het zand stroomopwaarts gaat in een vloodschaar (vloedgeul) en stroomafwaarts in een ebschaar (ebgeul). Een zandneer is dan een **rondgaande zandbeweging** (circulatiestroming). In Figuur 3.2 is dit geschematiseerd. Naast het transport via de eb- en vloedgeulen zal er natuurlijk ook sedimenttransport plaatsvinden op de platen en in de kortsluitgeulen.



Figuur 3.2: Zandneren (Van Veen, 1950)

3.2.2 Evenwicht en stabiliteit

De bodem in Westerschelde verandert voortdurend als gevolg van veranderingen in waterbeweging en sedimenttransport. Toch wordt verondersteld dat het meergeulensysteem op een tijdschaal van enkele decennia in een dynamisch evenwicht verkeert (Winterwerp e.a., 2000). Vaargeulverruiming zou ervoor kunnen zorgen dat dit evenwicht instabiel wordt, met als gevolg dat het systeem een ander stabiel evenwicht gaat zoeken. Dit nieuwe evenwicht kan een evenwicht zijn waarbij het meergeulensysteem behouden blijft (stabiel systeem), maar kan ook een evenwicht zijn waarbij het huidige meergeulensysteem degenereert naar een ééngelensysteem (totale degeneratie). Dit wordt een instabiel systeem genoemd.

3.2.3 Invloed van baggeren en storten op evenwicht en stabiliteit

Wanneer er gebaggerd en gestort wordt in geulen, zal het systeem zich aanpassen. Hierbij moet onderscheid gemaakt worden tussen eenmalig baggeren en storten (aanlegbaggerwerk) en frequent baggeren en storten (onderhoudsbaggerwerk).

3.2.3.1 Aanlegbaggerwerk (eenmalig)

Bij aanlegbaggerwerk wordt de geul eenmalig ter plaatse van de drempel verruimd (op diepte gebracht) en wordt het vrijgekomen sediment ergens anders gestort. Eenmalig baggeren is waarschijnlijk niet voldoende om voor een permanente verandering van de weerstand in de geul te zorgen en daarmee voor een verandering in het debiet.

Wanneer lokaal eenmalig op een drempel gebaggerd wordt, zal het doorstroomoppervlak op die locatie toenemen. Bij een gelijkblijvend debiet zal een toename van doorstroomoppervlak leiden tot een lokale afname van de stroomsnelheid ($v = \frac{Q}{A}$) en daarmee ook tot een afname van het sedimenttransport en dus lokale sedimentatie. Uiteindelijk zal de dwarsdoorsnede weer naar zijn oude evenwicht teruggaan (stabiel evenwicht).

Wanneer het zand lokaal eenmalig gestort wordt, zal het doorstroomoppervlak op die locatie afnemen. Bij een gelijkblijvend debiet zal een afname van doorstroomoppervlak leiden tot een lokale toename van de stroomsnelheid en daarmee ook tot een toename van het sedimenttransport en dus lokale erosie. Uiteindelijk zal de dwarsdoorsnede weer naar zijn oude evenwicht teruggaan (stabiel evenwicht).

3.2.3.2 Onderhoudsbaggerwerk (frequent)

Bij onderhoudsbaggerwerk wordt de vaargeul kunstmatig op diepte gehouden en wordt het vrijgekomen zand ergens anders gestort in het systeem (kunstmatig transport). Deze ingreep vindt zo frequent plaats, dat het wel voor een verandering in weerstand kan zorgen. Weerstand is afhankelijk van twee aspecten:

- De oneffenheden van de bodem (drempels of stortgebieden);
- Hydraulische straal ($R = \frac{A}{O} = \frac{B \cdot h}{2h + B}$) of waterdiepte. Wanneer de geul bijvoorbeeld wordt verruimd, zal het water namelijk relatief minder weerstand ondervinden van de wanden. Dit wordt vertaald naar een waarde voor Chézy ($C = 18^{10} \log(12R/k_s)$), k_s is ruwheidhoogte (afhankelijk van materiaal)).

De verandering in weerstand heeft gevolgen voor een verandering in debiet. Het systeem zal zich op deze verandering in debiet aanpassen door erosie of sedimentatie in de geul. Het evenwicht wordt in dit geval instabiel en kan geforceerd worden naar een nieuw stabiel evenwicht (systeem met meerdere geulen of één geul).

Wanneer lokaal een drempel op diepte gehouden wordt, zal de weerstand lokaal afnemen door een verlaging van de drempel en een toename in waterdiepte. Deze afname van weerstand zorgt voor een toename van het debiet in de geul. Bij een gelijkblijvend doorstroomoppervlak in de rest van de geul, zal een toename van het debiet leiden tot een toename van de stroomsnelheid ($v = \frac{Q}{A}$) in de geul en daarmee ook tot een toename van het sedimenttransport ($s \sim v^3$) en dus erosie in de geul.

Wanneer zand continu lokaal ergens gestort wordt, zal de weerstand daar toenemen door het stortgebied zelf (oneffenheid) en een afname van de waterdiepte. Deze afname van weerstand zorgt voor een afname van het debiet in de geul. Bij een gelijkblijvend doorstroomoppervlak in de rest van de geul, zal een afname van het debiet leiden tot een afname van de stroomsnelheid

$(v = \frac{Q}{A})$ in de geul en daarmee ook tot een afname van het sedimenttransport en dus sedimentatie in de geul.

Wanneer de geulen zich gaan aanpassen aan de nieuwe debietverdeling, wordt gesproken van een stabiel systeem. Het kan ook mogelijk zijn dat, bij een bepaalde hoeveelheid sediment in de nevengeul een bepaalde kritische waarde overschreden wordt en dat het sediment niet meer weggespoeld kan worden. De nevengeul zal daardoor dichtslibben en het meergeulensysteem degenereert naar een ééngelensysteem (instabiel systeem). Deze situatie wordt onderzocht in het cellenconcept (hoofdstuk 5).

Uitgaande van bovenstaande theorie wordt aangenomen dat onderhoudsbaggerwerk bepalend is voor het bereiken van het evenwicht en dat onderhoudsbaggerwerk het systeem ook naar een nieuw evenwicht forceert. Om die reden wordt dit onderzoek beperkt tot het bestuderen van de fysische gevolgen van *onderhoudsbaggerwerk*.

4 Denkmodel

Om het huidige denkmodel te verbeteren is het van belang om het model eerst te doorgronden en te evalueren. Dit hoofdstuk presenteert het resultaat hiervan.

Paragraaf 4.1 beschrijft wat het denkmodel is en geeft het doel van het model aan. Paragraaf 4.2 gaat in op het huidige denkmodel en geeft een kwalitatieve beschrijving van de gemaakte stappen. In paragraaf 4.3 staat de schematisatie van het denkmodel. Paragraaf 4.4 geeft de beperkingen van het denkmodel weer en de tekortkomingen van de schematisatie. Paragraaf 4.5 geeft mogelijke verbeteringen van het denkmodel. De deelconclusies van de doorgronding en evaluatie van het denkmodel worden in de laatste paragraaf genoemd.

4.1 Wat is het denkmodel?

Het denkmodel van de Westerschelde (Arends e.a., 1999) dat opgesteld is in het kader van het project MOVE (Monitoring Verruiming Westerschelde), is niets anders dan een pragmatisch model; een kwalitatieve gedachtengang over hoe de Westerschelde kan veranderen na een verruiming. Het denkmodel beschrijft alleen de gevolgen voor de fysica en is gebaseerd op de waarnemingen na de eerste verruiming (1970-1975) in vooral het oostelijk deel van de Westerschelde. Er wordt aangenomen dat de morfologische ontwikkelingen na de laatste verruiming op een soortgelijke wijze zullen verlopen als na de verruiming van 1970-1975 en dat het denkmodel dus ook gebruikt kan worden voor het voorspellen van de effecten van de laatste verruiming.

Het doel van het denkmodel is een verwachting te maken van de fysische gevolgen van verruiming. Op basis van dit denkmodel van MOVE zijn kwantitatieve hypothesen opgesteld over de gevolgen van de laatste verruiming. Deze hypothesen worden getoetst in het evaluatierapport 2003.

4.2 Processen in het denkmodel

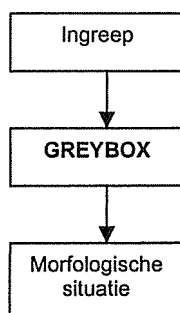
Het denkmodel ziet er als volgt uit (Arends e.a., 1999):

Als gevolg van de baggerinspanning worden de drempels verlaagd, waardoor de getijgolf minder weerstand ondervindt en er meer water door de geul kan stromen. Als reactie hierop verdiepen en verbreden de geuldelen aan weerszijden van de drempel. Het sediment dat hierbij vrijkomt en het sediment dat wordt gebaggerd om de drempels op diepte te houden, wordt voornamelijk opgeslagen in de nevengeulen, kortsluitgeulen en plaatcomplexen. De platen nemen hierdoor zowel in oppervlakte als gemiddelde hoogte toe. Dit draagt bij aan een sterke achteruitgang van het areaal ondiep water en leidt tot een kleinere komberging in de Westerschelde. Ook versmallen en verlagen de slikken in de buitenbochten. De diepere geulen versterken het binnendringen van het getij zodat de getijslag met name in het oostelijk deel zal toenemen, hetgeen de afname in komberging compenseert.

In het denkmodel kan onderscheid worden gemaakt tussen ingreep, morfologische situatie (waarnemingen) en de processen die tot deze morfologische situatie leiden. De *ingreep* is 'drempels verlagen' en de *morfologische situatie* (waarnemingen) na het verlagen van de drempels bestaat uit 'de toename in oppervlakte en hoogte van de platen', 'de afname van het ondiep water areaal', 'de afname in komberging' (+ eventuele compensatie in het oostelijk deel van de Westerschelde) en 'het versmallen en verlagen van slikken'. De *combinatie van processen* tussen de ingreep en de morfologische situatie (waarnemingen) wordt in dit denkmodel weergegeven door 'minder weerstand getijgolf in hoofdgeul', 'toename debiet hoofdgeul', 'toename getijslag oostelijk deel Westerschelde', 'geuldelen verdiepen en verbreden' en 'vrijgekomen sediment naar nevengeulen, kortsluitgeulen en platen'.

De morfologische situatie wordt gescheiden van de processen, omdat de aspecten van deze situatie geen gevolgen hebben voor de fysische processen en omdat de aspecten van deze situatie een duidelijke link hebben met de ecologie. Ondiepwatergebieden, platen, slikken en schorren zijn de gebieden die het rijkst aan organismen zijn.

Opgemerkt moet worden dat de beschreven combinatie van processen niet de enige mogelijke combinatie is. Er zijn veel meer mogelijke relaties denkbaar, maar dit denkmodel geeft de meest waarschijnlijke ontwikkelingen weer. De exacte relatie tussen ingreep en morfologische situatie is namelijk nog steeds niet geheel duidelijk. Daarom zouden de processen ertussen als een soort greybox gezien kunnen worden, een combinatie van processen die gedeeltelijk begrepen is. Dit wordt in Figuur 4.1 weergegeven.



Figuur 4.1: Denkmodel met greybox-redenatie

De verschillende aspecten in het denkmodel en de relaties ertussen worden hieronder nader toegelicht. De opdeling in ingreep, combinatie van processen en morfologische situatie wordt aangehouden.

4.2.1 Ingrep

Drempels verlagen

Zowel in de vloedgeul als in de ebgeul liggen drempels. De hoofdgeul is de ebgeul en is ook de gebruikelijke vaargeul. De nevengeul is de vloedgeul. De drempels, genoemd in het denkmodel, zijn de drempels in de hoofdgeul en worden dus verlaagd ten behoeve van de scheepvaart. In het denkmodel staat niet expliciet vermeld of het verlagen van de drempel vooral onderhoudsbaggerwerk bepalend is voor het bereiken van een nieuw evenwicht. Het denkmodel laat een verandering van het morfologisch systeem zien (nieuw evenwicht) en dus is het, gebaseerd op de veronderstelling, aannemelijk dat het denkmodel de gevolgen van onderhoudsbaggerwerk beschrijft.

4.2.2 Combinatie van processen

Getijgolf minder weerstand in hoofdgeul

Het water dat in een golfbeweging tijdens vloed het estuarium binnen stroomt en weer naar buiten stroomt tijdens eb wordt de getijgolf genoemd. De getijgolf ondervindt minder weerstand in de hoofdgeul wanneer de drempel verlaagd wordt (afname oneffenheid en toename waterdiepte). Het water kan dardoor makkelijker naar binnen stromen. De weerstandsverandering zal in het westelijk deel relatief kleiner zijn, omdat de weerstand daar van ondergeschikt belang is. Het westelijk deel is namelijk traagheidsgedomineerd, omdat de verticale waterstandsfluctuaties klein zijn ten opzichte van de waterdiepte. Het oostelijk deel is daarentegen weerstandsgedomineerd, omdat de verticale waterstandsfluctuaties daar juist relatief groot zijn ten opzichte van de waterdiepte. Weerstandsveranderingen zullen in het oostelijk deel daarom meer invloed hebben op de waterbeweging. (Witteveen+Bos, 1999)

Toename debiet hoofdgeul

Doordat de getijgolf minder weerstand ondervindt in de hoofdgeul zal er meer water door de hoofdgeul stromen, wat een toename van het debiet in de hoofdgeul inhoudt.

Toename getijslag (oostelijk deel Westerschelde)

De getijslag is het verschil in meters tussen de gemiddelde hoogwaterstand (GHW) en de gemiddelde laagwaterstand (GLW). De afname van de weerstand door verlaging van de drempels zal in het oostelijk deel de grootste uitwerking hebben op de getijslag, omdat dat gebied

weerstandsgedomineerd is: er vindt minder energie-dissipatie plaats, waardoor het verticale getij minder wordt gedempt dan voor de ingreep. Per saldo neemt de getijslag dus toe.

Geuldelen verdiepen en verbreden

Doordat er meer water door de hoofdgeulen kan stromen (groter debiet), zal het water meer doorstroomoppervlak nodig hebben. De geul zal daarom in zowel breedte als diepte toenemen, totdat de geulinhoud zich aangepast heeft aan het debiet en stabiliseert. Het verbreden van geuldelen is begrenst door dijken of door veenlagen onder slikken, omdat dijken en veenlagen door hun zeer stabiele ligging fixatiepunten zijn.

Vrijgekomen sediment naar nevengeulen, kortsluitgeulen en platen

Met vrijgekomen sediment wordt bedoeld:

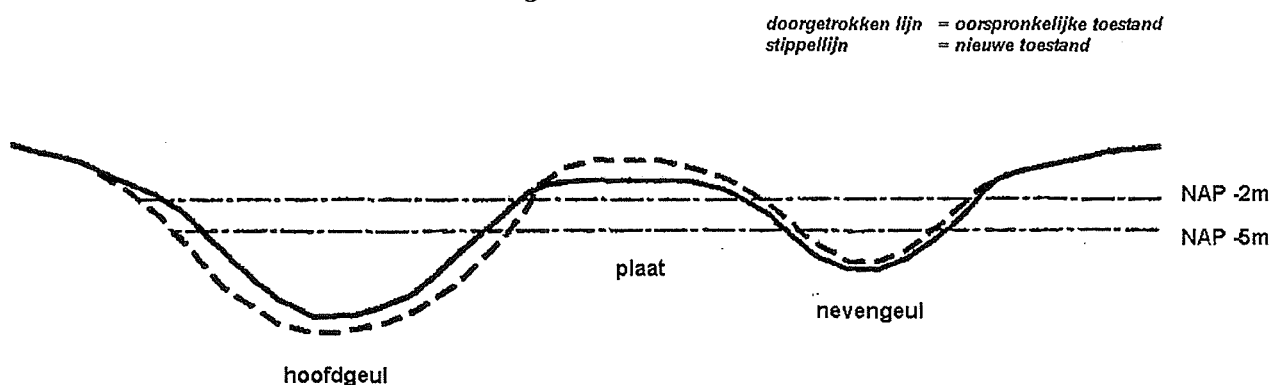
- Menselijk ingreep; storten van het gebaggerde zand uit de hoofdgeul (kunstmatig sedimenttransport);
- Natuurlijke reactie: de reactie op het verkleinde debiet in de nevengeul, wat verlaging van de snelheid als gevolg heeft en daardoor sedimentatie (natuurlijk sedimenttransport);
- Natuurlijke reactie: het weggeërodeerde sediment in de hoofdgeul, dat via de getijbeweging en de circulatie van zandstromen getransporteerd wordt naar nevengeulen kortsluitgeulen en platen (natuurlijk sedimenttransport).

Het storten vindt plaats in de nevengeulen en de kortsluitgeulen. Het sediment dat vrijkomt door de natuurlijke reactie komt terecht in de nevengeulen, kortsluitgeulen en op de platen.

4.2.3 Morfologische situatie

Toename oppervlakte en hoogte platen

Het vrijgekomen sediment dat gestort wordt of sedimenteert, wordt opgeslagen op de platen en zal zorgen voor een verhoging van de platen en een toename van het plaatoppervlak. Samen met het verbreden en verdiepen van de geuldelen, kan dit worden weergegeven in onderstaande schets. Het resultaat hiervan is een versteilling van het reliëf.



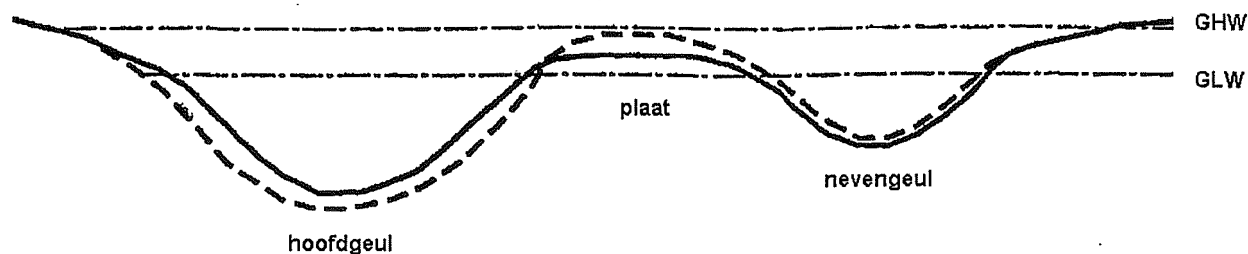
Figuur 4.2: Versteilling reliëf (Mol e.a., 1997)

Afname ondiepwaterareaal

Ondiepwaterareaal is het wateroppervlak waar de waterdiepte tussen -2 meter NAP en -5 meter NAP ligt. Van Figuur 4.2 is af te lezen dat de versteilling van het reliëf zorgt voor een afname van het ondiepwaterareaal.

Afname komberging

De komberging (ook wel getijprisma) is het volume water (m^3) tussen de meetkundige posities van de hoogwaterstanden en de laagwaterstanden (droogvallende platen meegerekend). Door de verhoging en de toenemende oppervlakte van de platen zal de komberging in volume afnemen, omdat op de plaats van zand geen water meer geborgen kan worden. De afname in komberging kan afgelezen worden van Figuur 4.3.



Figuur 4.3: Afname komberging (Mol e.a., 1997)

Compensatie voor de afname in komberging (oostelijk deel Westerschelde)

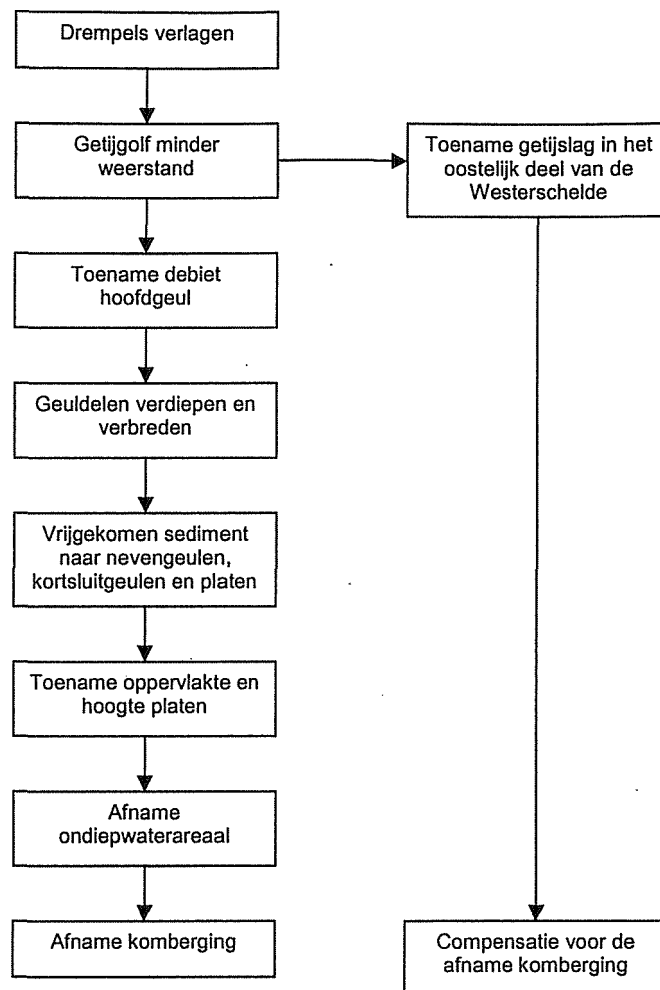
Wanneer het verschil tussen de gemiddelde hoogwaterstand en laagwaterstand (getijslag) groter wordt in het oostelijk deel van de Westerschelde, zal de komberging daardoor ook toenemen. De hoeveelheid zand tussen GHW en GLW verandert namelijk niet ten gevolg van de toename in getijslag en er kan dus relatief meer water geborgen worden dan bij een kleinere getijslag. De toename in getijslag zorgt daarmee dus voor een compensatie van de afname in komberging in het oostelijk deel van de Westerschelde.

Versmallen en verlagen slikken

Onder het slik zit een veenlaag, dat een stabiele ligging heeft en moeilijk erodeerbaar is. Het uiteinde van het veen (daar waar het veen grenst aan de geul) kan dus gezien worden als een fixatiepunt. Wanneer de hoofdgeulen nog verder willen verbreden, maar worden tegengehouden door dit fixatiepunt, zal er in plaats van erosie in de hoofdgeulen erosie op de slikken plaatsvinden. Hierdoor worden de slikken in de buitenbochten versmald en verlaagd.

4.3 Schema denkmodel

Het denkmodel is door Liek (2001) schematisch weergegeven:



Figuur 4.4: Schema denkmodel (Lieke, (2001))

Met deze schematisatie zal verder worden gewerkt in dit onderzoek.

4.4 Evaluatie denkmodel

Wanneer het huidige denkmodel wordt bekeken, zonder het te vergelijken met een ander model, kunnen al een aantal beperkingen van het model worden gevonden. Daarnaast heeft het schema ook een aantal tekortkomingen. Deze beperkingen en tekortkomingen worden hieronder genoemd.

4.4.1 Beperkingen denkmodel (tekst)

- Het huidige denkmodel is gebaseerd op de effecten van de eerste verruiming (1970-1975). Er wordt aangenomen dat de gevolgen van de tweede verruiming gelijkwaardig zijn aan de gevolgen van de eerste verruiming en daarmee zou het huidige denkmodel ook voor de tweede verruiming van toepassing kunnen zijn. Echter, de tweede verruiming verschilt met de eerste verruiming op de volgende punten.
 - De eerste verruiming besloeg ongeveer 5 jaar en de tweede verruiming was binnen een jaar uitgevoerd. Dit verschil heeft waarschijnlijk gevolgen voor de aanpassingstijd van het estuarium (of een deel van het estuarium) op de nieuwe situatie, omdat de verruiming verspreid over de periode hebben plaatsvonden.
 - Tijdens de tweede verruiming werd een andere bagger- en stortstrategie gebruikt dan tijdens de eerste verruiming (baggeren in het oosten en storten in het westen in plaats van storten in de parallelle geul). Dit tweede verschil heeft invloed op de morfologische ontwikkelingen van het systeem.
- De autonome ontwikkeling van het estuarium wordt niet meegenomen.

- De processen in de nevengeul en de interactie tussen de nevengeul en de hoofdgeul worden niet beschreven.
- Op de platen zelf wordt tegenwoordig niet meer gestort. Storten gebeurt alleen nog in de nevengeulen en kortsluitgeulen.
- Bij de sedimenttoevoer naar de nevengeul, kortsluitgeulen en platen zijn de menselijke ingreep en de natuurlijke reacties niet gescheiden.
- Het eb-vloedschaar karakter en de geometrie van de geulen in langsrichting wordt niet meegenomen.
- De gehele getijbeweging wordt niet meegenomen; er wordt alleen een vertaling naar getijslag gemaakt.
 - Geuldominantie, dat invloed heeft op het doorstroomoppervlak van de geulen, is niet meegenomen in het denkmodel
 - Getij-asymmetrie, de oorzaak van netto sedimenttransport in of uit het systeem, is niet meegenomen in het denkmodel.
- De dynamiek van kortsluitgeulen wordt niet meegenomen, wel het storten van zand in de kortsluitgeulen.
- In het denkmodel wordt geen rekening gehouden met stabiliteit van het huidige systeem. Voor de combinatie van processen die beschreven wordt, wordt niet aangegeven hoe lang de processen door zouden kunnen gaan en of het systeem een ééngenueelsysteem zou kunnen worden (totale degeneratie). Het wel of niet stabiel zijn van het huidige systeem heeft wel degelijk invloed op de uiteindelijk oppervlakte en hoogte van de platen, het ondiepwaterareaal, de komberging en de oppervlakte en hoogte van slikken.

4.4.2 Tekortkomingen schematisatie denkmodel

Het schema van Liek (2001) kent echter een aantal tekortkomingen, die volgen uit een verkeerde vertaling van de tekst van het denkmodel naar een schema.

- In het schema staat niet direct dat het verlagen van de drempel in dit geval ook onderhoudsbaggerwerk inhoudt.
- De afname in komberging wordt in het schema als een direct gevolg gezien van de afname in ondiep water areaal. Dit is echter geen gevolg van de afname in ondiep water areaal, maar van de toename in oppervlakte & hoogte van de platen.
- Het versmallen en verlagen van slikken in de buitenbochten is niet in het schema meegenomen.

4.5 Mogelijkheden voor verbetering denkmodel

Een goede methode voor het verbeteren van het huidige denkmodel is het wegnemen van de beperkingen. Dit is echter onhaalbaar, omdat dan veel meer fysische processen in het model verwerkt zouden moeten worden en deze fysische processen vooralsnog nog niet allemaal begrepen zijn. Wel kan er met een aantal beperkingen rekening worden gehouden ter verbetering van het denkmodel.

- Naast het beschrijven van de processen in de hoofdgeul, kunnen de processen in de nevengeul en de interactie tussen de nevengeul en de hoofdgeul ook beschreven worden.
- In het denkmodel kan eenvoudig veranderd worden dat op de platen niet meer gestort wordt.
- De menselijke ingreep en de natuurlijke reacties kunnen bij de sedimenttoevoer naar de nevengeul, kortsluitgeulen en platen gescheiden worden, door het storten zelf en de invloed van storten op de morfologie apart te beschouwen.
- Stabiliteit kan worden meegenomen in het denkmodel. Het cellenconcept bepaalt bij welke ingreep het systeem zijn meergeulen karakter dreigt te verliezen.

Het oplossen van de tekortkomingen is eenvoudig uit te voeren door het schema aan te passen. Dit wordt (gedeeltelijk) gedaan in hoofdstuk 7.

4.6 Deelconclusies

De deelconclusies van de doorgronding en evaluatie van het denkmodel zijn:

- De gedachtegang van het denkmodel is fysisch gezien niet compleet (beperkingen). Daarnaast is de vertaling van deze gedachtegang naar een blokschema niet geheel juist (tekortkomingen).
- Er zijn een aantal mogelijkheden gevonden over hoe er met beperkingen omgegaan kan worden ter verbetering van het denkmodel.

5 Cellenconcept

Het cellenconcept speelt een belangrijke rol bij het verbeteren van het denkmodel. Daarom is het van belang om dit model, net als het denkmodel, ook eerst te doorgronden en te evalueren. In paragraaf 5.1 wordt kort uitgelegd wat het cellenconcept is en wordt het doel van het model genoemd. Paragraaf 5.2 beschrijft de theorie van het cellenconcept. Paragraaf 5.3 gaat in op de betekenis van het cellenconcept voor het bagger- en stortbeleid. Tenslotte worden in de laatste paragraaf de deelconclusies van de doorgronding en evaluatie van het cellenconcept genoemd.

5.1 Wat is het cellenconcept?

Het cellenconcept is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium (WL) tijdens de studie voor de Lange Termijn Visie Schelde-estuarium (LTV). Het concept is een schematisatie en aggregatie van de morfologie en transportcapaciteit in het geulsysteem van de Westerschelde. Het is ontwikkeld als een instrument voor beleid en beheer.

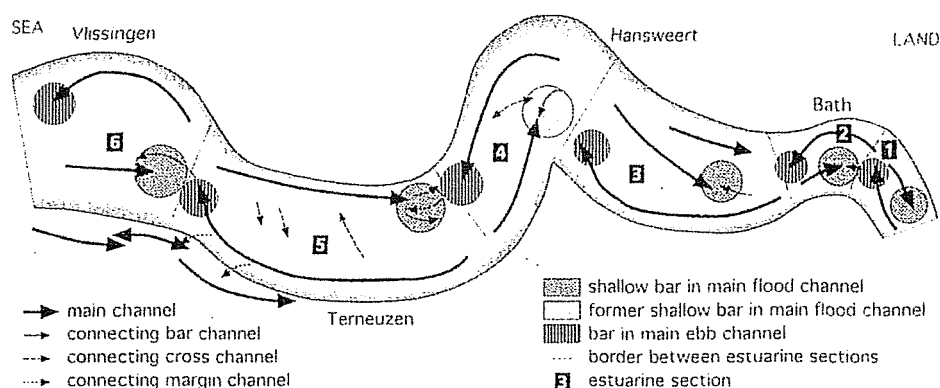
Het doel van het concept is de invloed van storten en baggeren op de **stabiliteit** van het meergeulensysteem te bestuderen. Het concept bestaat in feite uit twee onderdelen, welke worden behandeld in paragraaf 5.2. Het eerste onderdeel is de schematisatie van geulen en platen in de Westerschelde en het tweede onderdeel is een stabiliteitsanalyse van het geschematiseerde geulsysteem.

5.2 Theorie cellenconcept

Het wel of niet kunnen behouden van het meergeulensysteem is een stabiliteitsprobleem, soortgelijk als het probleem bij riviersplitsingen. Bij het ontwerpen van een methode om de invloed van baggeren en storten op de stabiliteit in de Westerschelde te bepalen, leek het daarom voor de hand liggend om de al eerder bedachte en uitgewerkte stabiliteitsanalyse voor riviersplitsingen (Wang, 1995) te gebruiken. Uit deze gedachte ontstond de theorie van het cellenconcept (schematisatie en stabiliteitsanalyse), die hieronder wordt beschreven.

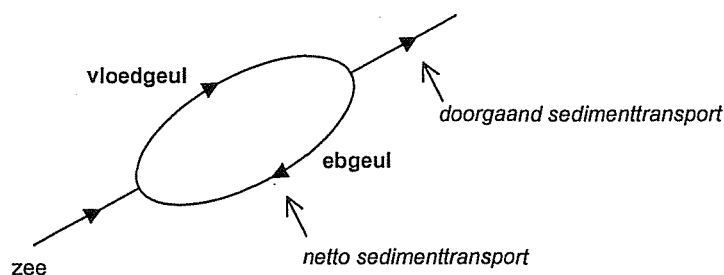
5.2.1 Schematisatie van geulen en platen (Winterwerp e.a., 2000, 2001)

De Westerschelde wordt gekenmerkt door een regelmatig patroon van geulen en platen. Van Veen (1950) beschrijft de onderverdeling in vloedgeulen en ebgeulen (zie ook paragraaf 2.1.1). Daarnaast kunnen de geulen, in deelgebieden van de Westerschelde, worden onderverdeeld in grote geulen (eb- en vloedgeulen) en kleinere kortsluitgeulen. Jeuken (2000) noemt deze grote geulen beide hoofdgeulen (anders dan de definities van paragraaf 2.1.1). Deze hoofdgeulen en kortsluitgeulen vormen samen een regelmatig repeterend patroon dat wordt aangeduid als estuariene sectie of bochtgroep. De estuariene sectie bestaat uit een grote gekromde ebgeul met daarnaast een rechte vloedgeul. De ebgeul en vloedgeul worden meestal gescheiden door langgerekte plaatgebieden en met elkaar verbonden door de kleinere kortsluitgeulen. Iedere sectie wordt gekenmerkt door een eigen gedrag, wat betekent dat de bochtgroep als een aparte morfologische eenheid kan worden beschouwd. Deze verdeling in eenheden is door Jeuken (2000) beschreven.



Figuur 5.1: Morfologische schematisatie van het geulsysteem in de Westerschelde (Jeuken, 2000)

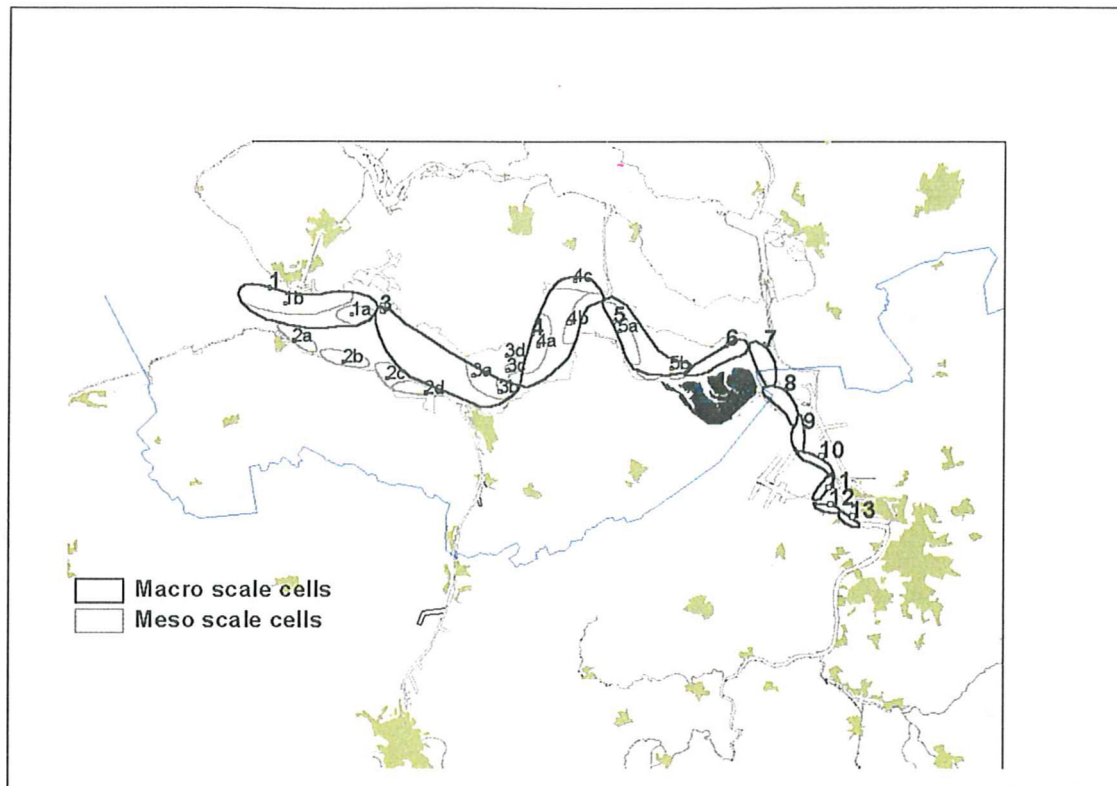
De morfologische eenheid kan als een morfologische cel gezien worden. Een schets van een morfologische cel, bestaande uit een ebgedomineerde geul, een vloedgedomineerde geul en daartussen een plaat, staat in onderstaande figuur. De drempels liggen op de plaatsen van knooppunten, daar waar eb- en vloedgeulen samenkomen (zie ook Figuur 5.1).



Figuur 5.2: Morfologische cel

In de cel zelf is sprake van circulerend netto transport. Daarnaast is er ook doorgaand (netto) sedimenttransport, wat morfologische veranderingen op een grotere schaal (Westerschelde) veroorzaakt.

Met deze manier van schematiseren is verder gewerkt in het cellenconcept. Op basis van berekeningen met DELFT2D-MOR van het netto sedimenttransport over één morfologisch getij (12,5 jaar is karakteristiek voor de lange termijn sedimenttransporten) voor de referentiesituatie van LTV (1996) en gedetailleerde bathymetrische kaarten is het Schelde-estuarium geschematiseerd in een ketting van morfologische cellen. In deze cellen is een onderscheid gemaakt tussen cellen op macro- en op mesoschaal. Deze schalen en de eigenschappen ervan zijn behandeld in paragraaf 3.1. De schematisatie van cellen is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 5.3: Schematisatie Westerschelde in morfologische cellen (Winterwerp e.a., 2000)

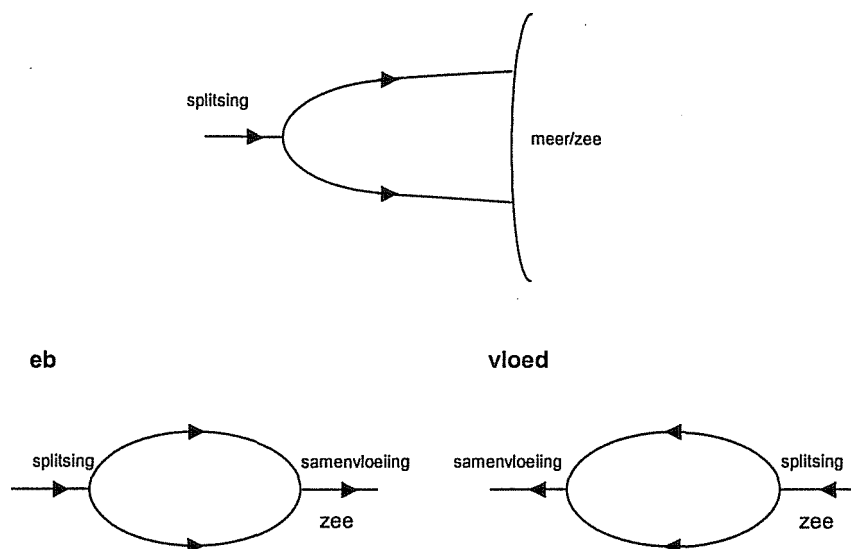
Met behulp van deze schematisatie kan een stabiliteitsanalyse voor de Westerschelde worden opgezet. Deze stabiliteitsanalyse wordt behandeld in de volgende paragraaf.

5.2.2 Stabiliteitsanalyse van een morfologische cel (Winterwerp e.a., 2000, Wang e.a., 2001)

Eén van de aannames van het cellenconcept is dat het meergeulensysteem gehandhaafd blijft, zolang de macrocellen in stand blijven. Deze aanname is gebaseerd op het feit dat het sedimenttransport tussen de cellen veel kleiner is dan het netto transport dat circuleert door de cel. Een resultaat van deze aanname is dat het zinvol is om de morfologische cellen van de schematisatie van de Westerschelde afzonderlijk te bekijken. Voor iedere cel kan een stabiliteitsanalyse uitgevoerd worden, om daarmee te kunnen bepalen of het meergeulensysteem behouden zal blijven bij een bepaalde bagger- en/of storthoeveelheid.

5.2.2.1 Toepassing stabiliteitsanalyse riviersplitsing

Het uiterlijk van een cel vertoont veel overeenkomsten met het uiterlijk van een riviersplitsing. In een getijsituatie kan namelijk tijdens vloed het zeewaartse deel als splitsing gezien worden en het landwaartse deel als samenvloeiing. Tijdens eb treedt de omgekeerde situatie op. De riviersituatie en de getijsituatie zijn geschetst in Figuur 5.4.



Figuur 5.4: Splitsing riviersituatie en splitsing/samenvloeiing getijsituatie

De stabiliteit van een morfologische cel kan worden gekwantificeerd met behulp van een stabiliteitsanalyse voor een riviersplitsing (Winterwerp e.a., 2000). De stabiliteitsanalyse van riviersplitsingen is al eerder ontwikkeld door Wang (1995). De samenvloeiing heeft geen invloed op de stabiliteit van de morfologische cel en hoeft dus ook niet te worden meegenomen in de stabiliteitsanalyse. Bij de samenvloeiing gebeurt namelijk niets anders dan het samenvoegen van de debieten en de sedimenttransporten. Bij het splitsingspunt, daarentegen, wordt bepaald hoe het water en sediment over de verschillende geulen wordt verdeeld en dus of beide geulen open blijven of eventueel dichtslibben.

Het modelleren van een splitsingspunt is echter niet eenvoudig. Fysisch gezien wordt de verdeling van sediment op de splitsing bepaald door de geometrie en de lokale 3D stroomverschijnselen. De stabiliteitsanalyse voor riviersplitsingen (Wang, 1995) maakt echter gebruik van een 1D netwerk model, waarin alleen de waterdiepte gevarieerd wordt en waarin de eigenschappen van het sediment constant worden verondersteld. In dit 1D model kunnen de geometrie en de 3D stroomverschijnselen niet meegenomen worden. Daarom worden de fysische processen in de splitsing (het knooppunt) vereenvoudigd tot een knooppuntrelatie. Deze relatie beschrijft de verdeling van het sedimenttransport over de geulen.

Voordat de stabiliteitsanalyse voor riviersplitsingen op een getijsituatie in een morfologische cel kan worden toegepast, is het noodzakelijk om een aantal aannames en vertalingen te maken (Winterwerp e.a., 2000).

- De heen-en-weergaande getijstroming zal geschematiseerd worden tot een quasi-stationaire stroming. Deze aanname mag gemaakt worden, omdat het voor de stabiliteit van een morfologische cel nodig is te weten wat er op de lange termijn gebeurt en niet gedurende één getijcyclus. Tijdens een getij-cyclus is de verandering van de waterbeweging en de bodembeweging namelijk heel groot en zal de stroming niet stationair beschouwd mogen worden. Echter, wanneer de bodem aan het begin van een getij en aan het einde van een getij vergeleken wordt, dan zal deze bijna niet veranderd zijn. Voor de lange termijn kan de heen-en-weergaande stroming wel quasi-stationair beschouwd worden. De aanname 'quasi-stationair' is nodig om het stabiliteitsprobleem analytisch op te kunnen lossen.
- Daarnaast wordt ook aangenomen dat de totale (bruto) sedimenttransportcapaciteit in de getijsituatie vergelijkbaar is met de sedimenttransportcapaciteit in het riviersysteem. De berekende transportcapaciteit in de getijsituatie kan dan gelijk gesteld worden aan het

bovenstrooms transport in een riviersituatie ($S_{cap} = S_0$). Dit wordt aangenomen, omdat het totale instantane (bruto) sedimenttransport bepalend is voor de stabiliteit van het eb-vloedgeulstelsel en niet zozeer het netto sedimenttransport. Een klein netto transport hoeft namelijk niet te betekenen dat er weinig sediment getransporteerd wordt, een groot brutotransport tijdens vloed en eb levert ook een klein nettotransport. De grootte van het brutotransport geeft een beter beeld van de mate waarin sediment getransporteerd wordt in een eb-vloed geulstelsel dan de grootte van het nettotransport.

De formule die de sedimenttransportcapaciteit van een morfologische cel in evenwichtssituatie weergeeft is:

$$S_{cap} = \frac{1}{T} \int_0^T |S_0| dt = \frac{1}{T} \int_0^T (|S_1| + |S_2|) dt \quad (5.1)$$

S_{cap} is hierin de sedimenttransportcapaciteit, T is de getijperiode, S_0 is het bovenstrooms transport en S_1 en S_2 zijn de sedimenttransporten in beide geulen.

De sedimenttransportcapaciteit is gelijk aan de optelling van absolute sediment transporten in beide geulen, gedeeld door de getijperiode en is dus een gemiddelde over de twee geulen over een getijperiode.

5.2.2.2 Stabiliteitsanalyse morfologische cel (met ingreep)

Bij het toepassen van de stabiliteitsanalyse voor splitsingen op een morfologische cel wordt de ingreep (baggeren en/of storten) meegenomen. Met behulp van de analyse kan dan bepaald worden bij welke ingreep het systeem instabiel wordt en dus wat het bagger- en stortcriterium voor een morfologische cel is.

Evenwicht

Een systeem is in evenwicht als er geen bodemveranderingen meer optreden (over een getijcyclus). Het is belangrijk te realiseren dat een morfologische cel, bestaande uit twee geulen en een plaat, drie verschillende fysische evenwichtssituaties kan hebben. De drie situaties zijn:

- Beide geulen zijn open en het water en sediment gaat door beide geulen;
- Geul 1 is dicht en al het water en sediment gaat door geul 2;
- Geul 2 is dicht en al het water en sediment gaat door geul 1.

Alle evenwichtssituaties zijn fysisch gezien mogelijk. Een systeem is in evenwicht als voor beide geulen geldt dat het ingaande sedimenttransport even groot is als het uitgaande sedimenttransport. Welke staat bereikt zal worden is afhankelijk van de stabiliteit van de evenwichtssituaties en van de begincondities (waterdieptes in geul 1 en 2).

Stabiliteit evenwicht

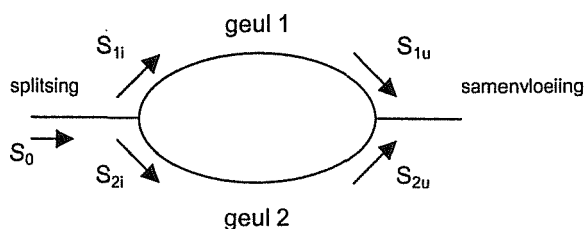
Om de stabiliteit van een evenwichtstoestand te bekijken wordt de morfologische ontwikkeling van een systeem uit evenwicht bekeken. Hiervoor wordt eerst een massabalans van het sediment opgesteld, met daarin de ingreep in het systeem.

Wanneer een tweegeulensysteem beschouwd wordt en de gemiddelde diepten van de geulen (h_1 en h_2) als morfologische toestandsvariabelen genomen worden, dan gelden de volgende vergelijkingen voor de massabalans van sediment.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{S_{1u} - S_{1i} - I_1}{B_1 L_1} \quad (5.3)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{S_{2u} - S_{2i} - I_2}{B_2 L_2} \quad (5.4)$$

In Figuur 5.5 is een overzicht gegeven van de morfologische cel met daarin de sedimenttransporten.



Figuur 5.5: Sedimenttransporten in een morfologische cel

Hierin is S het sediment transport (m^3/s), I is de ingreep (m^3/s) (storten is positief, baggeren is negatief), B is de breedte (m) van de geul en L is de lengte (m) van de geul.

Voor de ingreep zijn verschillende scenario's mogelijk. Zo kan er in één geul gebaggerd worden, in één geul gestort worden of in één geul gebaggerd worden en in de andere parallelle geul gestort worden.

De ingreep wordt als een percentage van de sedimenttransportcapaciteit weergegeven, omdat dit aangeeft of een bepaalde ingreep invloed kan hebben op het systeem. Indien het systeem bijvoorbeeld veel sediment transporteert, kan er ook veel sediment gestort worden. En andersom, als er weinig wordt getransporteerd kan er ook weinig gestort worden. De sedimenttransportcapaciteit is gedefinieerd als de integraal over de getijperiode van de absolute waarde van de bruto sedimenttransporten (formule 5.1). De ingreep is dus een hoeveelheid baggeren en/of storten per tijdseenheid en kan dus continu beschouwd worden. De ingreep wordt globaal over de hele geul gezien.

De andere parameters in de sedimentbalansen worden als volgt bepaald.

S_{1i} en S_{2i} , de ingaande sedimenttransporten worden bepaald met behulp van de knooppuntrelatie,

$$\frac{S_{1i}}{S_{2i}} = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-k} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^k \quad (5.5)$$

en de continuïteitsvergelijking,

$$S_0 = S_{1i} + S_{2i} \quad (5.6)$$

waarbij $S_0 = S_{cap}$ (m^3/s); het 'bovenstrooms' transport wordt gelijk gesteld aan de sedimenttransportcapaciteit van het getij.

In de knooppuntrelatie, formule 5.5, is k een dimensieloze positieve coëfficiënt, S_{1i} en S_{2i} is het ingaande sedimenttransport (m^3/s) in respectievelijk geul 1 en geul 2, B_1 en B_2 is de breedte (m) van geul 1 en geul 2 en Q_1 en Q_2 is de waterafvoer (m^3/s) door de twee geulen.

De knooppuntrelatie, die de verdeling van het sediment over de takken bepaalt, speelt een cruciale rol voor de stabiliteit van riviersplitsingspunten en in dit geval dus ook voor de stabiliteit van een morfologische cel.

Keuze knooppuntrelatie

Veld- en laboratoriumonderzoek en analyses van 1D-netwerk modellen geven aan dat de

knooppuntrelatie $\frac{S_{1i}}{S_{2i}} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1-k} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^k$ het meest geschikt is voor het modelleren van

riviersplitsingen (Wang e.a., 1995; Fokkink e.a., 1995). Deze knooppuntrelatie wordt ook gebruikt voor getijsituaties.

Keuze voor waarde van k

De keuze voor de waarde van k (uit de knooppuntrelatie) hangt samen met de keuze voor de knooppuntrelatie, omdat k een onderdeel is van die relatie. De waarde van k is heel belangrijk, omdat deze waarde cruciaal is voor de stabiliteit van de splitsing. De werkelijke waarde van k (bij de gekozen knooppuntrelatie), die op een bepaald moment hoort bij het systeem, is altijd onbekend. Het is wel bekend dat, als de waarde van k heel groot is, beide takken open zullen blijven en de splitsing stabiel is. Voor kleine waarden van k zal een van de takken verzanden en de ander open blijven. De splitsing is in dit geval instabiel. (Wang e.a., 1995)

Wanneer er geen ingrepen hebben plaatsgevonden, dan bepaalt (bij een bepaalde knooppuntrelatie) alleen de waarde van k de stabiliteit van het systeem. De kritieke grens ligt dan op $k = n/3$. Wanneer gekozen is om de Englund-Hansen transportformulering te gebruiken, betekent dit dat de kritische k -waarde gelijk is aan $5/3$ (Wang e.a., 1995).

Wanneer er wél ingegrepen wordt in het systeem zal zowel de waarde van k als de ingreep zelf de stabiliteit gaan bepalen. Het is niet duidelijk wat in dat geval een grotere invloed heeft op de stabiliteit, de waarde van k of de (grootte) van de ingreep. Daarnaast is ook niet duidelijk of de ingreep ook nog invloed kan hebben op de waarde van k en dus indirect weer op de stabiliteit van de splitsing.

Geconcludeerd kan worden dat de waarde van k in grote mate bepalend is voor de stabiliteit van het systeem. In de huidige stabiliteitsanalyse wordt de waarde van k constant verondersteld. Dit kan dus niet met zekerheid worden aangenomen, omdat de werkelijke waarde van k niet zeker is en het ook niet duidelijk is of de waarde van k verandert door de ingreep.

De conclusie dat de waarde van k bepalend is voor de stabiliteit van het systeem wordt in studies van Fokkink en Wang (1993) en Den Dekker en Van Voorthuizen (1994) numeriek nagegaan. Beide studies bevestigen deze conclusie. Van Kerckhoven (1995) heeft bewezen dat de conclusies over de waarde van k ook voor getijsituaties gelden.

De uitgaande sedimenttransporten (aan het einde van de geul), S_{1n} en S_{2n} , zijn niet gelijk aan de ingaande sediment transporten. Ze worden bepaald door de transportcapaciteit die afhankelijk is van de stroomsnelheid (Q/Bh). De exacte vorm van deze vergelijkingen is afhankelijk van de gekozen transportformule.

Keuze voor transportformule

Voor de transportformule kunnen verschillende formules gekozen worden, bijvoorbeeld Engelund-Hansen (EH), Meyer-Peter-Muller (MPM) of een algemene transportformule. De verschillende transportformules worden beschreven in bijlage B.

Een belangrijk verschil tussen de twee formules van EH en MPM is dat er in MPM een kritische waarde van snelheid wordt meegenomen waaronder geen transport optreedt en in EH die drempel niet aanwezig is. In Wang (1997) is onderzoek gedaan naar de invloed van de transportformule op de resultaten voor het bagger- en stortcriterium. Bij gebruik van MPM neemt de kritische waarde toe en zijn er, door het gebruik van de drempel voor sedimenttransport, nieuwe instabiele evenwichtspunten bijgekomen. De formule van EH heeft als voordeel dat het beter toepasbaar is voor de Westerschelde. (Wang, 1997).

De verdeling van het water in de twee geulen, is afhankelijk van geometrische parameters (h , B en L) en de weerstandsparameter C (ook wel Chézy coëfficiënt).

$$Q_1 = \frac{\beta_1 h_1^{\frac{3}{2}}}{\beta_1 h_1^{\frac{3}{2}} + \beta_2 h_2^{\frac{3}{2}}} Q_0 \quad (5.7)$$

$$Q_2 = \frac{\beta_2 h_2^{\frac{3}{2}}}{\beta_1 h_1^{\frac{3}{2}} + \beta_2 h_2^{\frac{3}{2}}} Q_0 \quad (5.8)$$

Hierin is $\beta_j = B_j C_j L_j^{-1/2}$, $j = 1, 2$

Door de vergelijkingen (5.5) tot en met (5.8) te substitueren in (5.3) en (5.4) ontstaat een stelsel van twee vergelijkingen voor twee variabelen.

$$\frac{dh_1}{dt} = f_1(h_1, h_2) \quad (5.9)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = f_2(h_1, h_2) \quad (5.10)$$

Het systeem is in evenwicht als in beide geulen de waterdieptes (bodempligging) niet meer veranderen, doordat het ingaande sedimenttransport in een geul gelijk is aan het uitgaande sedimenttransport, gecorrigeerd met de ingreep.

De evenwichtsstaten worden in deze stabiliteitsanalyse bereikt bij combinaties van h_1 en h_2 , waarbij $f_1 = f_2 = 0$. Bij verschillende groottes voor de ingreep (% sedimenttransportcapaciteit) zullen de combinaties van h_1 en h_2 , veranderen of is er zelfs geen combinatie meer mogelijk. In het laatste geval is het enige stabiele evenwicht, een evenwicht met 1 geul open (degeneratie van het meergeulensysteem naar een ééngeulensysteem).

Om te onderzoeken of de gevonden evenwichtspunten stabiel zijn, kunnen twee methoden toegepast worden.

Een van de methoden is een analytische methode. Deze methode kan alleen gebruikt worden als er niet wordt ingegrepen en is dus niet toepasbaar voor het bepalen van het bagger- en stortcriterium.

Wanneer er wel ingegrepen wordt, kan de methode van de fasesdiagrammen worden gebruikt. In deze fasesdiagrammen kan bekeken worden of de evenwichtspunten stabiel zijn.

Tijdschaal

De tijdschaal behorend bij het de macroschaal (celniveau) is enkele decennia. Echter, volgens Wang e.a. (2002) is de morfologische tijdschaal groot en kan het dus lang duren voordat relevante veranderingen in het systeem zichtbaar worden.

5.2.2.3 Verdere ontwikkeling stabiliteitsanalyse cellenconcept

Een belangrijke beperking van de besproken stabiliteitsanalyse is dat de invloed op en van de platen niet is meegenomen. De morfologische ontwikkeling hangt echter nauw samen met de ontwikkeling van deze platen. In Winterwerp e.a. (2000) wordt de plaat-geul interactie wel meegenomen door de analyse uit te breiden met een term voor de beschrijving van de plaathoopte. In dit rapport wordt deze interactie buiten beschouwing gelaten.

5.3 Betekenis cellenconcept voor bagger- en stortbeleid

In bijlage C worden de fasediagrammen gegeven van een stabiliteitsanalyse. Op basis van resultaten van verschillende analyses en interpretaties, kunnen de volgende conclusies getrokken worden voor een morfologische cel in een estuarium waarin wordt gebaggerd en/of gestort. (Winterwerp e.a., 2000). Hiervoor zijn drie verschillende scenario's toegepast: in een cel wordt gebaggerd in een geul, in een cel wordt gestort in een geul en in een cel wordt gebaggerd in een geul en gestort in een andere geul.

1. Een tweegeulensysteem kan zich ontwikkelen tot een beperkt aantal (meestal drie) stabiele evenwichtssituaties, namelijk één van de geulen is dicht en de andere is open en beide geulen zijn open.
2. Het verdiepen van de geulen (binnen realistische grenzen) heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem.
3. De stortcapaciteit van een geul mag tijdelijk overschreden worden; een overschrijding over een te lange periode leidt waarschijnlijk tot een onomkeerbare degeneratie.
4. De maximaal te storten hoeveelheid betreft de netto hoeveelheid:
 - Storten van een gelijke hoeveelheid in beide geulen heeft geen invloed op de morfologische stabiliteit van het systeem;
 - Het relevante stortvolume betreft het verschil van storten en verdiepen (netto hoeveelheid).
5. De gevonden **stortcriteria** kunnen als volgt worden onderverdeeld:
 - Wanneer baggerspecie, afkomstig uit een ander gebied, gestort wordt in één van de geulen, dan is het stortcriterium 10% van de sedimenttransportcapaciteit van de cel. Storten boven deze waarde leidt tot degeneratie van het systeem.
 - Wanneer baggerspecie, gebaggerd in een geul van zo'n cel wordt gestort in de parallelle geul, dan ligt het omslagpunt op 5% van de sedimenttransportcapaciteit.

In Jeuken (2001) is het 5-10% stortcriterium geverifieerd op basis van gemeten erosie en sedimentatietendenzen in de grote geulen van de macrocellen over de periode 1955-1999. Uit de analyses is gebleken dat het theoretisch stortcriterium redelijkerwijs kan worden toegepast op de macrocellen.

Voordat het stortcriterium (% sedimenttransportcapaciteit) gebruikt kan worden voor het verbeteren van het bagger- en stortbeleid voor de Westerschelde, moet het percentage eerst omgerekend worden naar een werkelijke hoeveelheid per seconde met behulp van de berekende sedimenttransportcapaciteit. De sedimenttransportcapaciteit van een cel is gedefinieerd als de integraal over de getijperiode van de absolute waarden van de berekende bruto transporten. De bruto sedimenttransporten worden bepaald met behulp van Delft2D-MOR simulaties. Winterwerp e.a. (2000) hebben voor verschillende scenario's deze transportcapaciteiten berekend, waaronder de referentie situatie (1996, vóór de laatste verruiming) en de huidige situatie (1999, na de laatste verruiming). Het benodigde onderhoudsbaggerwerk voor deze simulaties wordt berekend met ESTMORF, een dynamisch empirisch model.

Bij het gebruiken van het stortcriterium voor het verbeteren van het bagger- en stortbeleid moet wel onthouden worden dat het cellenconcept een aantal beperkingen kent en dat er ook aannames gemaakt zijn. Deze beperkingen en aannames zijn opgesomd in bijlage D. Ze kunnen invloed hebben op de grootte van het stortcriterium. In Wang e.a. (2002) wordt de invloed van de aannames op het stortcriterium en de sedimenttransportcapaciteit besproken. Daarnaast moet ook nog een extra kanttekening geplaatst worden.

Het stortcriterium is een continue baggeringreep en/of stortingreep. De werkelijke bagger- en stortmethode zou echter beschreven moeten worden door een blokfunctie: gedurende een periode wordt er gebaggerd en/of gestort, daarop volgend een periode niets en daarna weer een periode baggeren en/of storten. De totale hoeveelheid baggeren en/of storten kan gelijk zijn aan de totale hoeveelheid wanneer er continu wordt ingegrepen, echter de maximale waarde per tijdseenheid is wel verschillend (groter in geval van de blokfunctie). Deze grotere waarde zou kunnen leiden tot instabiliteit, als de periode van overschrijden te lang heeft geduurd. De gevolgen hiervan kunnen met de gebruikte stabiliteitsanalyse echter niet onderzocht worden.

5.4 Deelconclusies

De deelconclusies van de doorgronding en evaluatie van het cellenconcept zijn:

- Voor de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept moeten een aantal keuzes maken, waarvan de keuze voor de waarde van k uit de knooppuntrelatie cruciaal is voor de stabiliteit. De werkelijke waarde van k is onzeker en daarnaast wordt de verandering van deze waarde van k door ingrijpen niet meegenomen.
- Baggeren alleen heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem; storten of storten in combinatie met baggeren in dezelfde cel wel. Hierbij horen stortcriteria van respectievelijk 10% en 5% van de bruto sedimenttransportcapaciteit.
- Bij de toepassing van het stortcriterium op de werkelijke situatie moet nog een extra kanttekening geplaatst worden (naast de kanttekeningen die volgden uit de toetsing van aannames van het cellenconcept (Wang e.a., 2002)): de werkelijke bagger- en stortmethode (storten en baggeren in (blok)periodes) wordt niet bekeken in het cellenconcept.

6 Verbetering denkmodel met behulp van cellenconcept

In dit hoofdstuk wordt een opzet gegeven voor een verbetering van het denkmodel met behulp van het cellenconcept. Hiervoor wordt allereerst in paragraaf 6.1 een vergelijking gemaakt tussen de twee modellen. In paragraaf 6.2 wordt door middel van een link het cellenconcept met het denkmodel geïntegreerd. In paragraaf 6.3 worden de aspecten van de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept zover mogelijk toegepast. In de laatste paragraaf worden deelconclusies gegeven van de vergelijking tussen de modellen en de verbetering met behulp van het cellenconcept.

6.1 Vergelijking

Tijdens het bestuderen van het denkmodel en het cellenconcept zijn een aantal overeenkomsten, maar vooral verschillen opgemerkt. De gevonden overeenkomsten en verschillen zijn hieronder beschreven.

6.1.1 Overeenkomsten

In grote lijnen kunnen een aantal overeenkomsten op een rijtje gezet worden:

- Beide modellen beschrijven de fysische gevolgen van de verruiming.
- Het denkmodel en het cellenconcept hebben respectievelijk conclusies en resultaten die een indirecte link met de ecologie hebben.

6.1.2 Verschillen

Tussen het denkmodel en het cellenconcept zijn vooral veel verschillen. Deze verschillen zijn samengevat in Tabel 6.1. In de tabel wordt onderscheid gemaakt tussen algemene verschillen en verschillen met betrekking tot de fysische processen uit het denkmodel.

Tabel 6.1: Algemene verschillen denkmodel en cellenconcept

	DENKMODEL	CELLENCONCEPT
Algemeen		
Kwalitatief of kwantitatief?	Kwalitatieve beschrijving van processen in een specifiek systeem (Westerschelde), waarin is ingegrepen	Instrument dat een kwantitatieve indicatie geeft voor de kritische grens voor baggeren en storten
Ruimteschaal	Gehele (of deel van) estuarium	Cellen worden apart beschouwd
1D of 2D?	2D analyse (breedte en diepte)	1D analyse (diepte)
Uitgangssituatie	Niet expliciet genoemd; denkmodel geldt voor uitgangssituatie: • Geen ingreep • Zelfde, kleinere ingreep	Evenwicht
Invoer (= ingreep)	Invoer is verlaging drempel (verondersteld: onderhoudsbaggerwerk)	Invoer is hoeveelheid sediment per tijdseenheid baggeren/storten (= % sedimenttransportcapaciteit cel)
	Locatie baggeren: op de drempel	Baggeren en storten globaal over de geul
Interactie hoofd- en nevengeul	Geen interactie hoofd- en nevengeul (alleen directe gevolgen voor hoofdgeul worden beschreven)	Wel interactie hoofd- en nevengeul
Storten op plaat en in kortsluitgeulen (kunstmatig sedimenttransport)	Storten op plaat en in kortsluitgeulen wordt wel meegenomen	Storten op plaat en in kortsluitgeulen wordt niet meegenomen
Sedimenttransport (natuurlijk sedimenttransport)	Sedimenttransport als gevolg van: • Erosie en sedimentatie door respectievelijk toe of afname debiet en daarmee stroomsnelheid • Netto circulatietransport	Sedimenttransport als gevolg van erosie en sedimentatie door verschil in ingaand sedimenttransport (knooppuntrelatie) en uitgaand sedimenttransport (sedimenttransportformule)
Getij	Getij wordt vertaald naar komberging en getijslag	Getij wordt niet meegenomen (stabiliteitsanalyse = riviersituatie)
Stabiliteit	Stabiliteit wordt niet meegenomen	Stabiliteit wordt wel meegenomen
Uitvoer (= effect)	Uitvoer is:	Uitvoer is wel of geen stabiliteit van het

	• Toename oppervlakte en hoogte van platen • Afname in oppervlakte en hoogte slik • Afname in ondiepwaterareaal • Afname in komberging	meergeulensysteem Het systeem is in evenwicht als $dh_1/dt = dh_2/dt = 0$
--	---	---

Bij de verschillen met betrekking tot de fysische processen wordt aangegeven hoe het cellenconcept de fysische processen uit het denkmodel beschrijft met formules.

Tabel 6.2: Verschillen met betrekking tot de fysische processen

	DENKMODEL	CELLENCONCEPT
Fysische processen denkmodel		Stel: hoofdgeul is geul 1
Afname weerstand	Lokale weerstand op drempel vermindert als de drempel verlaagd wordt als gevolg van vermindering van oneffenheden en toename waterdiepte.	Globale weerstand wordt vertaald in gemiddelde waterdiepte in de geul. Een afname van waterdiepte zorgt voor minder weerstand, een toename zorgt voor meer weerstand.
Toename debiet hoofdgeul	Door lokale vermindering van de weerstand (verlaging drempel) kan het water makkelijker naar binnenstromen: groter debiet in de hoofdgeul	$Q_1 = \frac{B_1 C_1 L_1^{-\frac{1}{2}} h_1^{\frac{3}{2}}}{B_1 C_1 L_1^{-\frac{1}{2}} h_1^{\frac{3}{2}} + B_2 C_2 L_2^{-\frac{1}{2}} h_2^{\frac{3}{2}}} Q_0$ Het debiet in de hoofdgeul verandert door veranderingen in h_1 en/of h_2 (gemiddelde waterdiepte (globaal)). De andere parameters worden constant verondersteld.
Geuldelen verdiepen en verbreden	Afhankelijk van de verandering in sedimenttransport; sedimenttransport $\sim$ stroomsnelheid ($v = \frac{Q}{A}$). Een groter debiet met hetzelfde doorstroomoppervlak levert een grotere stroomsnelheid en dus een groter sedimenttransport en een verruiming/verbreding van de geuldelen.	Afhankelijk van de verandering in ingaand transport (S_{1i}) en uitgaand transport (S_{1u}). Dit levert een verandering in dh_1/dt op. $\frac{dh_1}{dt} = \frac{S_{1u} - S_{1i} - I_1}{B_1 L_1}$ Het ingaande transport wordt bepaald met behulp van de knooppuntrelatie: $\frac{S_{1i}}{S_{2i}} = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-k} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^k$ (met daarin het debiet) en $S_0 = S_{1i} + S_{2i}$ Het uitgaande transport wordt bepaald met behulp van een transportformule (met daarin de stroomsnelheid)
Vrijgekomen sediment naar nevengeulen, kortsluitgeulen en platen	Kunstmatig transport (storten) en natuurlijk transport (door verlaging stroomsnelheid in nevengeul en netto circulatie van sediment).	Afhankelijk van de verandering in ingaand transport (S_{2i}) en uitgaand transport (S_{2u}). Dit levert een verandering in dh_2/dt op. $\frac{dh_2}{dt} = \frac{S_{2u} - S_{2i} - I_2}{B_2 L_2}$
Toename getijslag	Afhankelijk van energie-dissipatie. Minder weerstand heeft minder energie-dissipatie tot gevolg en daarmee een toename in getijslag.	Getijslag wordt niet meegenomen.

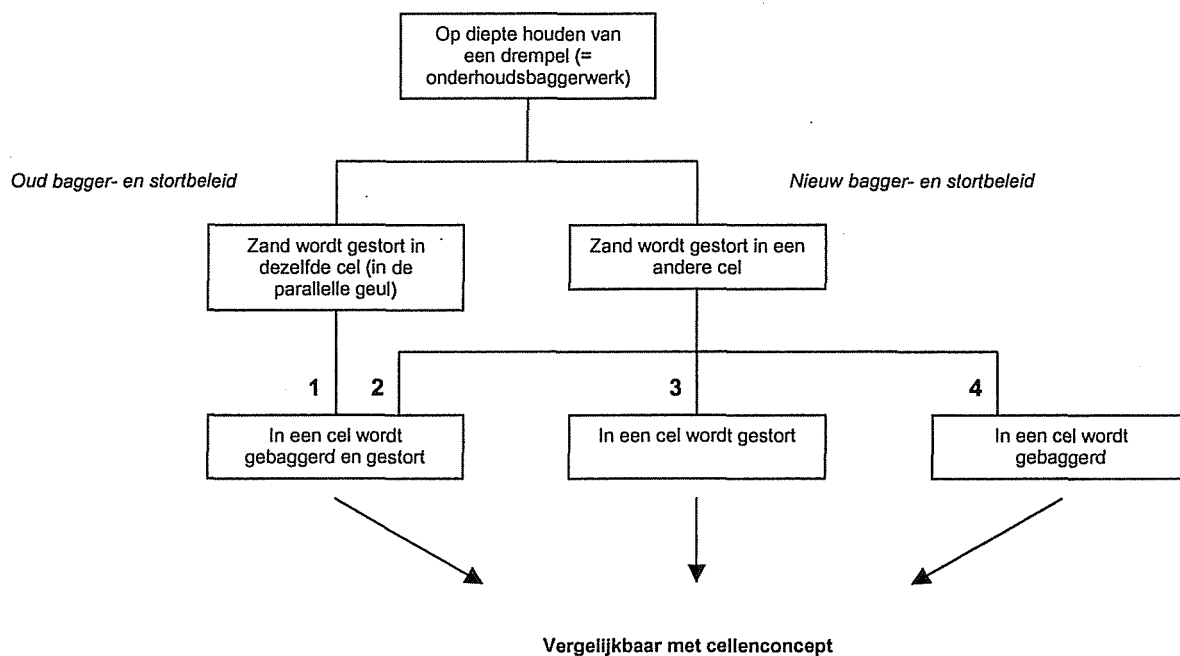
6.2 Integratie cellenconcept en denkmodel

Het grootste probleem voor de integratie van de stabiliteitsanalyse en het denkmodel is dat de modellen ieder voor een andere ruimteschaal geldig zijn. In het denkmodel wordt een deel van het estuarium of het gehele estuarium beschouwd. De grenzen zijn in dit model niet duidelijk gedefinieerd. In het cellenconcept worden alle cellen afzonderlijk beschouwd en zijn de grenzen wel duidelijk gedefinieerd.

Door denkmodellen op morfologisch celniveau te ontwerpen, wordt het probleem van het verschil in ruimteschaal opgelost.

Een denkmodel op morfologisch celniveau heeft als voordeel dat de nieuwe bagger- en stortstrategie ook kan worden meegenomen. Wanneer in een cel ergens zand gebaggerd wordt, dan zal dat zand ook weer ergens gestort moeten worden (tenzij het zandwinning betreft). Dit kan in de parallelle geul van de cel, maar ook in een andere cel. Er zijn drie verschillende scenario's mogelijk voor een morfologische cel: in een cel wordt gebaggerd en gestort (bagger- en storthoeveelheden hoeven niet gelijk te zijn), in een cel wordt gestort en in een cel wordt gebaggerd. Het eerste scenario is alleen van toepassing bij de oude bagger- en stortstrategie. Voor het beschrijven van de nieuwe bagger- en stortstrategie kunnen alle drie scenario's gebruikt worden. Hiermee wordt een beperking van het huidige denkmodel, dat het niet gebruikt kan worden voor het beschrijven van de nieuwe bagger- en stortstrategie, tenietgedaan.

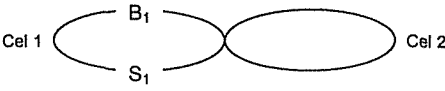
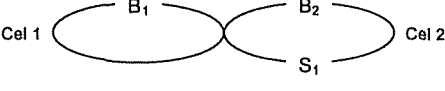
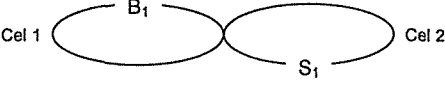
Onderstaand schema laat de hierboven beschreven integratie zien.



Figuur 6.1: Integratie denkmodel en cellenconcept

De nummers in Figuur 6.1 verwijzen naar de uitleg van Tabel 6.1. In deze tabel wordt een toelichting gegeven bij de integratie van het denkmodel en het cellenconcept. Opgemerkt moet worden dat er meerdere combinaties mogelijk zijn om zand te storten en te baggeren. Deze tabel laat alleen zien dat zowel met de oude als de nieuwe bagger- en stortstrategie 3 verschillende situaties mogelijk zijn voor een morfologische cel.

Tabel 6.3: Toelichting bij Figuur 6.1

Bagger- en stortstrategie	Figuren	Toelichting	Scenario	Nr.
Oude bagger- en stortstrategie		Het gebaggerde zand in een geul van cel 1 (B ₁) wordt gestort in de parallelle geul van cel 1 (S ₁).	In cel 1 wordt gebaggerd en gestort.	1
Nieuwe bagger- en stortstrategie		Het gebaggerde zand in een geul van cel 1 (B ₁) wordt gestort in een geul van een andere cel (S ₁). In cel 2 wordt ook gebaggerd (B ₂).	In cel 2 wordt gebaggerd en gestort	2
		Het gebaggerde zand in een geul van cel 1 (B ₁) wordt gestort in een geul van een andere cel (S ₁).	In cel 2 wordt gestort	3
			In cel 1 wordt gebaggerd	4

In Figuur 6.1 is de term onderhoudsbaggerwerk ook meegenomen. In dit onderzoek wordt ervan uitgegaan dat onderhoudsbaggerwerk bepalend is voor de veranderingen in het systeem. Dit is tevens gelijk aan de theorie van het cellenconcept.

Naast het kunnen doorlopen van de verschillende bagger- en stortscenario's zijn er nog andere voordelen van een denkmodel op celniveau:

- De effecten van baggeren, storten en zandwinning zijn vooral op deze schaal direct merkbaar (Stive e.a., 1998);
- De gevolgen van baggeren en/of storten op de stabiliteit van het systeem kunnen eenvoudiger op deze schaal bekeken worden (theorie cellenconcept);
- De sedimenttransportcapaciteit is niet overal in de Westerschelde even groot (in het oosten kleiner dan in het westen) (Winterwerp e.a., 2000). Op kleine schaal kan rekening worden gehouden met deze variatie.

Kwalitatief gezien zou het denkmodel voor een morfologische cel (een deelgebied) wel juist kunnen zijn, omdat de processen uit het denkmodel op zowel grote schaal als kleine schaal plaatsvinden.

Voor de drie verschillende scenario's kan een denkmodel worden opgesteld (vanaf dit punt deeldenkmodel genoemd). Het uiteindelijke *nieuwe* denkmodel bestaat uit de uitwerking van de drie deeldenkmodellen voor de verschillende scenario's. Deze uitwerking staat in hoofdstuk 7.

Voor de uitwerking van de deeldenkmodellen kan de theorie van de stabiliteitsanalyse van toepassing zijn. Daarnaast zouden de uitkomsten van de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept (stortcriteria) ook gebruikt kunnen worden in de deeldenkmodellen, omdat de scenario's van deze deeldenkmodellen hetzelfde zijn als de scenario's die behandeld zijn in de stabiliteitsanalyse.

6.3 Toepassing stabiliteitsanalyse en stortcriterium in denkmodel

Het is moeilijk om de theorie van de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept en het stortcriterium direct toe te passen in het denkmodel. Tussen de stabiliteitsanalyse en het denkmodel zijn namelijk belangrijke verschillen gevonden (Tabel 6.1 en Tabel 6.2). Daarnaast moet afgevraagd worden of de stabiliteitsanalyse een betere weergave geeft van de werkelijke fysische processen. De stabiliteitsanalyse van het cellenconcept is namelijk vooral gebruikt om een stortcriterium te vinden en niet om een zo goed mogelijke beschrijving te geven van de werkelijkheid.

De gedachtegang van het denkmodel, de combinatie van processen, wordt als uitgangspunt genomen in het ontwerpen van de deeldenkmodellen voor een morfologische cel. Daarnaast worden deze denkmodellen aangepast door een aantal aspecten van de stabiliteitsanalyse op een

juiste wijze toe te passen. Het gevonden stortcriterium in de stabiliteitsanalyse is geverifieerd en kan redelijkerwijs worden toegepast op de macrocellen in de Westerschelde. Daarom wordt dit theoretisch criterium gebruikt als indicatie in het denkmodel voor wel of geen stabiliteit.

Voor de toepassing van de theorie van de stabiliteitsanalyse moeten de verschillen tussen de modellen worden weggewerkt of moet er een bepaalde vertaalslag worden gedaan.

Hoe dit gedaan kan worden, is in de onderstaande tabel weergegeven. De grijze vlakken geven aan wat in het nieuwe model gebruikt wordt.

De fysische effecten van verruiming in de Westerschelde
Verbetering denkmodel met behulp van cellenconcept

Tabel 6.4: Toepassing stabiliteitsanalyse in het denkmodel

	DENKMODEL	CELLENCONCEPT/ STABILITEITSANALYSE	TOEPASSING STABILITEITSANALYSE IN DENKMODEL
Kwalitatief of kwantitatief?	Kwalitatieve beschrijving van processen in een systeem, waarin is ingegrepen	Instrument dat een kwantitatieve indicatie geeft voor de kritische grens voor baggeren en storten	Het gevonden stortcriterium in de stabiliteitsanalyse wordt gebruikt in het nieuwe denkmodel. Verder blijft het denkmodel kwalitatief van aard.
Ruimteschaal	Gehele (of deel van) estuarium	Cellen worden apart beschouwd	Het nieuwe denkmodel beschrijft de te verwachten ontwikkelingen voor een aparte morfologische cel voor de drie verschillende scenario's (baggeren&storten, baggeren of storten).
1D of 2D?	2D analyse (breedte en diepte)	1D analyse (diepte)	De stabiliteitsanalyse van het cellenconcept beschrijft alleen de verandering in de waterdiepte (= bodemligging), de breedte wordt niet meegenomen. In het denkmodel wordt de verandering in breedte wel beschreven en dit is ook een betere weergave van de werkelijkheid. Omdat niet duidelijk is hoeveel de breedte en de diepte veranderen als de geul erodeert of sedimenteert wordt het doorstroomoppervlak gekozen als beschrijvende parameter. Het doorstroomoppervlak kan zowel de verandering in diepte als in breedte meenemen.
Uitgangssituatie	Niet expliciet genoemd; denkmodel geldt voor uitgangssituatie: • Geen ingreep • Zelfde, kleinere ingreep	Evenwicht	De deeldenkmodellen gelden voor dezelfde uitgangssituatie als het huidige denkmodel. Het stortcriterium van het cellenconcept is echter bepaald met een uitgangssituatie in evenwicht. Dit stortcriterium wordt ook gebruikt in de deeldenkmodellen.
Invoer (= ingreep)	Invoer is verlaging drempel (verondersteld: onderhoudsbaggerwerk)	Invoer is hoeveelheid sediment per tijdseenheid baggeren/storten (= % sedimenttransportcapaciteit cel)	Het verlagen van de drempel wordt in het nieuwe denkmodel vertaald in het plegen van onderhoudsbaggerwerk. Onderhoudsbaggerwerk wordt dan als een continue bezigheid gezien en wordt in de stabiliteitsanalyse meegenomen als een % van de sedimenttransportcapaciteit en dus een hoeveelheid per seconde.
	Locatie baggeren: op de drempel	Baggeren en storten globaal over de geul	Baggeren en storten worden in het nieuwe denkmodel nog steeds als een plaatselijke ingreep gezien. Baggeren vindt plaats op de drempel; storten in de nevengeul of kortsluitgeul.
Interactie hoofd- en nevengeul	Geen interactie hoofd- en nevengeul (alleen directe gevolgen voor hoofdgeul worden beschreven)	Wel interactie hoofd- en nevengeul	De processen in de hoofdgeul en in de nevengeul worden gescheiden in het nieuwe denkmodel. Doordat de hoofdgeul meer water verwerkt door de ingreep dan de nevengeul, zal dit voor beide geulen gevolgen hebben.
Storten op plaat en in kortsluitgeulen (kunstmatig sedimenttransport)	Storten op plaat en in kortsluitgeulen wordt wel meegenomen	Storten op plaat en in kortsluitgeulen wordt niet meegenomen	Storten op de platen gebeurt tegenwoordig niet meer, maar storten in de kortsluitgeulen nog wel. Storten in de kortsluitgeul wordt in het nieuwe denkmodel gescheiden van storten in de nevengeul, omdat dit een andere invloed heeft op de veranderingen in het systeem. Storten in de nevengeul heeft invloed op de stabiliteit van het meergeulensysteem.

De fysische effecten van verruiming in de Westerschelde
Verbetering denkmodel met behulp van cellenconcept

Sedimenttransport (natuurlijk sedimenttransport)	Sedimenttransport als gevolg van: - Erosie en sedimentatie door respectievelijk toe- of afname debiet en daarmee stroomsnelheid (bruto sedimenttransport) - Netto circulatietransport	Sedimenttransport als gevolg van erosie en sedimentatie door verschil in ingaand sedimenttransport (knooppuntrelatie) en uitgaand sedimenttransport (sedimenttransportformule)	In het nieuwe denkmodel wordt alleen de verandering van de dwarsdoorsneden van de geulen ten gevolge van de verandering in debietverdeling bekeken. Dit heeft erosie en sedimentatie in de geuldelen tot gevolg. Het netto circulatietransport wordt niet meegenomen, omdat volgens het cellenconcept het bruto sedimenttransport bepalend is voor de stabiliteit.
Getij	Getij wordt vertaald naar komberging en getijslag	Getij wordt niet meegenomen (stabiliteitsanalyse = riviersituatie)	In nieuwe denkmodel wordt de getijbeweging niet direct meegenomen.
Stabiliteit	Stabiliteit wordt niet meegenomen	Stabiliteit wordt wel meegenomen	De stabiliteit wordt in het nieuwe denkmodel meegenomen door middel van het wel of niet overschrijden van de weerstand door storten en/of door sedimentatie in de nevengeul. Dit is een zelfversterkend proces, wat kan worden weergegeven door een terugkoppeling tussen doorstroomoppervlak en weerstand, wat ervoor zorgt dat het debiet in de nevengeul steeds kleiner wordt en het doorstroomoppervlaktes ook.
Uitvoer (= effect)	Uitvoer is: - Toename oppervlakte en hoogte van platen - Afname in oppervlakte en hoogte slik - Afname ondiepwaterareaal - Afname in komberging	Uitvoer is wel of geen stabiliteit van het meergeulensysteem. Het systeem is in evenwicht als $dh_1/dt = dh_2/dt = 0$	Wel of geen stabiliteit van het meergeulensysteem betekent voor de uitvoer een nieuw evenwicht met twee geulen open of een nieuw evenwicht met één geul open (door verandering in doorstroomoppervlaktes). De relatie van een meergeulensysteem of een ééngelensysteem met de parameters oppervlakte en hoogte van platen en slikken, ondiepwaterareaal en komberging is niet onderzocht en het cellenconcept zegt hier ook niets over. Daarnaast wordt het netto circulatietransport, wat invloed heeft op deze parameters, ook buiten beschouwing gelaten.

Met behulp van deze integratie en toepassing van stabiliteitsanalyse kunnen de deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel ontworpen worden.

6.4 Deelconclusies

De deelconclusies van de vergelijking tussen de modellen en de verbetering van het denkmodel met behulp van het cellenconcept zijn:

- Tussen het denkmodel en het cellenconcept zijn bijna alleen verschillen gevonden (Tabel 6.1 en Tabel 6.2).
- De integratie van het cellenconcept met het denkmodel is mogelijk gemaakt door de ruimteschaal gelijk te stellen en te kijken op macroschaal. Op dat niveau zijn drie deeldenkmodellen ontwikkeld, waarin de effecten van een bepaald bagger- en stortscenario kunnen worden meegenomen.
- Door de verschillen tussen de fysische processen in het denkmodel en de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept (zoals 2D-analyse/1D-analyse, weerstand drempel/drempel wordt niet meegenomen), is een directe toepassing van de wiskundige stabiliteitsanalyse in het denkmodel niet mogelijk. Daarnaast hebben beide modellen ook een heel ander doel en geeft de stabiliteitsanalyse niet per definitie een betere weergave van de werkelijkheid. Er kunnen daarentegen wel een aantal algemene aspecten van de stabiliteitsanalyse in het denkmodel worden gebruikt (Tabel 6.4).

7 Nieuw denkmodel

In dit hoofdstuk wordt het nieuwe denkmodel beschreven. Het **nieuwe denkmodel** bestaat uit de uitwerking van de deeldenkmodellen op celniveau (scenario's baggeren & storten, storten en baggeren). Het gehele nieuwe denkmodel is weergegeven in bijlage E. De uitwerking van de deeldenkmodellen op celniveau is gegeven in paragraaf 7.1. In paragraaf 7.2 wordt ingegaan op de koppeling van de deeldenkmodellen. De laatste paragraaf gaat over het toekomstbeeld van het estuarium met behulp van het nieuwe denkmodel.

7.1 Denkmodel op celniveau (deeldenkmodellen)

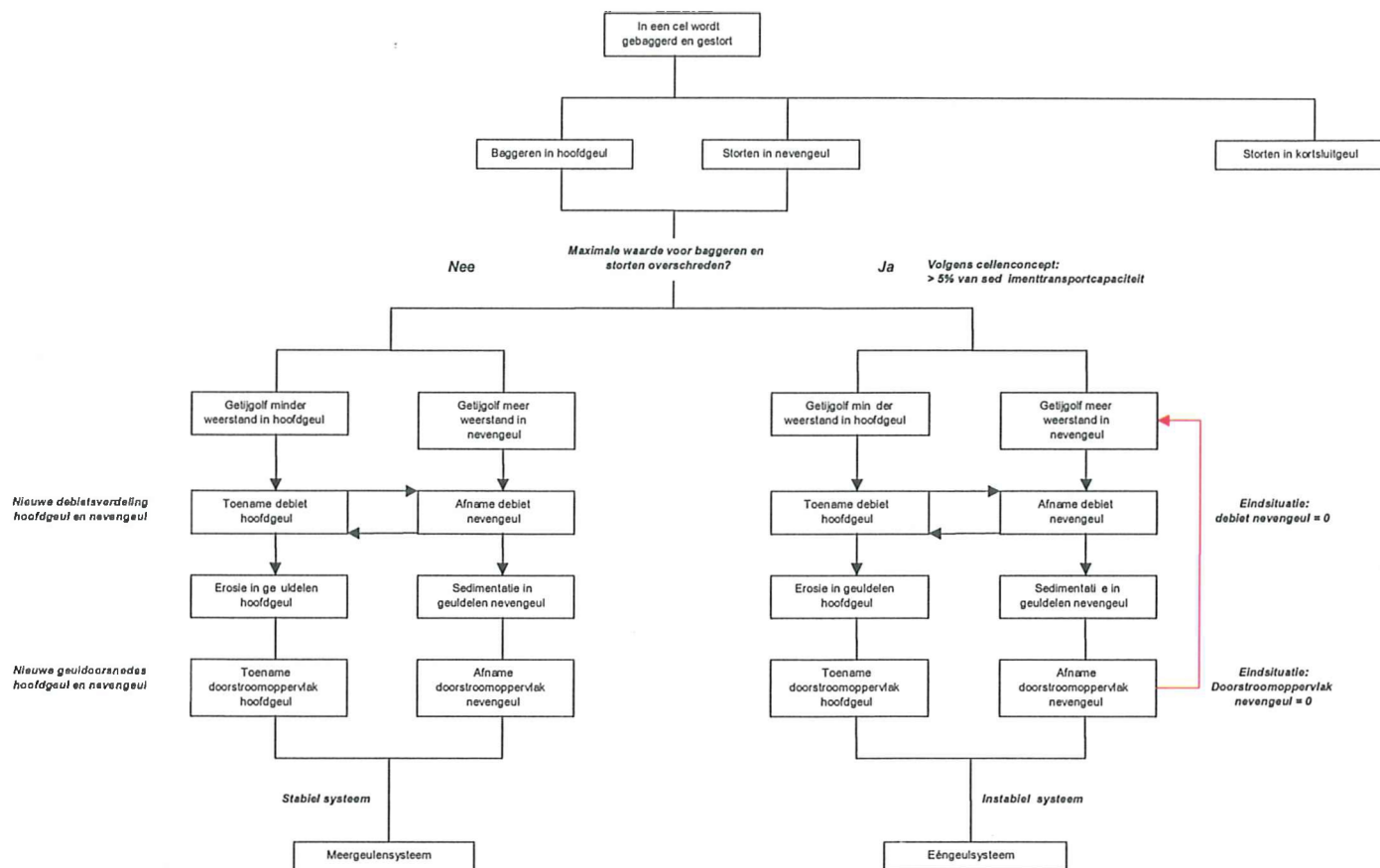
In deze paragraaf worden de drie deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel gegeven: een denkmodel voor een cel waarin zowel gebaggerd als gestort wordt, een denkmodel voor een cel waarin alleen gestort wordt en tenslotte een denkmodel voor een cel waarin alleen gebaggerd wordt.

Voorafgaand nog een aantal opmerkingen:

- In het nieuwe denkmodel wordt, evenals in het cellenconcept, uitgegaan van continu baggeren (onderhoudsbaggerwerk) en storten, dus een hoeveelheid per tijdseenheid. Dit betekent voor het denkmodel dat de drempel kunstmatig laag wordt gehouden en het stortgebied kunstmatig hoog.
- Het deeldenkmodel geldt voor een situatie, waarin niet ingegrepen wordt of een situatie met dezelfde, alleen kleinere, ingreep.
- De weerstand in een deeldenkmodel is afhankelijk van de bodemvorm (oneffenheden – drempel) en de waterdiepte/hydraulische straal in de geul.
- In het onderzoek wordt aangenomen dat onderhoudsbaggerwerk (en storten) het systeem naar een nieuw evenwicht forceert. Dit betekent dat er altijd verandering in het systeem zal gaan optreden.
- Volgens het cellenconcept heeft alleen baggeren in een geul van een morfologische cel geen invloed op de stabiliteit van het meergeulensysteem. Alleen storten of storten in een geul gecombineerd met baggeren in de andere geul heeft dat wel. Deze conclusie wordt ook gebruikt in het nieuwe denkmodel.
- In de deeldenkmodellen wordt alleen de verandering in geulen (erosie en sedimentatie) als gevolg van de verandering in debieten beschreven. Het circulatietransport (natuurlijk sedimenttransport) wordt niet expliciet meegenomen in het denkmodel, terwijl dit netto sedimenttransport, naast de verandering in geulinhouden, ook invloed uitoefent op de parameters hoogte en oppervlakte platen, ondiepwaterareaal en komberging. De relatie behoud meergeulensysteem of degeneratie naar ééngeulensysteem met bovengenoemde parameters is niet geheel duidelijk door het weglaten van dit circulatietransport en door de onduidelijkheid over de gevolgen van totale degeneratie op deze parameters.
- Het tijdelijk overschrijden van het stortcriterium heeft geen totale degeneratie te betekenen.

7.1.1 Deeldenkmodel voor cel – baggeren en storten

Schema



Figuur 7.1: schema denkmodel voor een cel – baggeren en storten

Toelichting op Figuur 7.1

Wanneer er gebaggerd wordt op de drempel in de hoofdgeul en gestort wordt in de nevengeul, dan zal de getijgolf minder weerstand in de hoofdgeul ondervinden en meer weerstand in de nevengeul. De gebaggerde hoeveelheden hoeven overigens niet gelijk te zijn aan de gestorte hoeveelheden. Er kunnen twee oorzaak-gevolg relaties worden onderscheiden. Bij een gelijkblijvend totaal debiet in de beide geulen, zal een verhoogde weerstand (door storten) in de nevengeul leiden tot een afname van het debiet en daarmee tot een toename van het debiet in de hoofdgeul. Daarnaast kan een verlaagde weerstand (door baggeren) ook voor een toename van het debiet in de hoofdgeul zorgen en daarmee voor een afname van het debiet in de nevengeul. Ongeacht welke oorzaak-gevolg relatie sterker is, het uiteindelijke gevolg is een afname van het debiet in de nevengeul en een toename van het debiet in de hoofdgeul.

De stroomsnelheid in de hoofdgeul neemt daardoor toe en de stroomsnelheid in de nevengeul neemt af. Immers, de stroomsnelheid verandert door een verandering in debiet bij een gelijkblijvend doorstroomoppervlak ($v = \frac{Q}{A}$). Het gevolg van de toenemende stroomsnelheid in

de hoofdgeul en de afnemende stroomsnelheid in de nevengeul is erosie (doorstroomoppervlak groter) en sedimentatie (doorstroomoppervlak kleiner) in respectievelijk de hoofdgeul en de nevengeul.

Wanneer het systeem door deze ingreep in een nieuw morfologisch evenwicht geforceerd wordt, dan zullen deze geulen zich in dwarsdoorsneden zich net zolang aanpassen, totdat het doorstroomoppervlak in de geulen in evenwicht is met het nieuwe debiet in de geulen. In het

begin zal het systeem daardoor sterk veranderen (veel erosie en sedimentatie), naarmate het systeem dichterbij een evenwicht komt, zal de verandering in de tijd kleiner zijn.

Wanneer de hoeveelheid sedimentatie en de hoeveelheid sediment gestort sediment in de nevengeul een bepaalde waarde overschrijdt, zal de weerstand voor de getijgolf zo groot kunnen worden dat het water niet meer makkelijk door de nevengeul kan stromen; het sediment kan niet meer opgeruimd worden. De hoofdgeul zal steeds meer water gaan verwerken, met als gevolg dat het debiet en de stroomsnelheid in de nevengeul steeds kleiner worden (zelfversterkend proces). Er zal daarom geen sediment meer getransporteerd worden en de geul zal uiteindelijk dichtslibben. Het meergeulensysteem is in dit geval instabiel en zal dus degenereren naar een éengeulstelsel.

Er zijn dus twee nieuwe evenwichtssituaties mogelijk:

- Het huidige meergeulensysteem blijft stabiel en in het systeem geldt een nieuwe debietverdeling waarbij beide geulen nog open zijn. Het bijbehorende nieuwe evenwicht bestaat uit een hoofdgeul met een groter doorstroomoppervlak en een nevengeul met een kleiner doorstroomoppervlak.
- Het huidige meergeulensysteem is instabiel en in het systeem stroomt alleen nog water in de hoofdgeul. Het bijbehorende nieuwe evenwicht bestaat alleen uit een hoofdgeul, de nevengeul is dichtgeslibd.

Relatie met cellenconcept

Volgens het cellenconcept wordt het systeem instabiel en zal het meergeulensysteem degenereren als de hoeveelheid baggeren en storten groter is dan 5 % van de sedimenttransportcapaciteit. Het 5 %-criterium is berekend voor een situatie waarbij er evenveel gebaggerd wordt in de ene geul als gestort wordt in de andere geul. Wanneer er meer wordt gestort dan gebaggerd, dan zou dat door middel van zandwinning in de geul waarin gestort wordt, gecompenseerd kunnen worden. De stabiliteit van het systeem zou op die manier gewaarborgd kunnen blijven.

Meer baggeren dan storten maakt voor de stabiliteit van het systeem niet uit. De gebaggerde geul zal alleen waarschijnlijk sneller dicht willen slibben, omdat er netto zand uit de cel verdwenen is. (en dus zal er meer onderhoudsbaggerwerk gepleegd moeten worden)

Volgens het cellenconcept kan degeneratie naar een éengeulstelsel gestopt worden als het onderhoudsbaggerwerk en het bijbehorend continu storten van sediment gestopt wordt en het stortcriterium niet te lang is overschreden.

De werkelijke hoeveelheid van het stortcriterium kan bepaald worden door de sedimenttransportcapaciteit van een cel bij een bepaalde verruiming te berekenen met Delft2D-MOR en daar 5 % van te nemen.

7.1.2 Denkmodel voor cel – storten

Schema



Figuur 7.2: Schema denkmodel voor een cel – storten

Toelichting op Figuur 7.2

De beschrijving van de processen van het deeldenkmodel voor een cel waarin gestort is, is gelijkwaardig aan de beschrijving van de processen voor een cel waarin gebaggerd én gestort is (zie paragraaf 7.1.1). Het enige verschil tussen de twee combinaties van processen is dat de getijgolf alleen meer weerstand in de nevengeul door de storting ondervindt. De weerstand in de hoofdgeul blijft gelijk. Als gevolg hiervan zal de debietverdeling hierdoor minder veranderen dan in een cel waarin zowel gebaggerd wordt als gestort. Met uiteindelijk als gevolg dat de hoofdgeul minder zal verruimen en de nevengeul minder zal sedimenteren.

De maximale waarde voor de hoeveelheid sedimentatie en de hoeveelheid gestort sediment, om stabiliteit te garanderen, zal dus ook groter zijn dan in een cel waarin zowel gebaggerd als gestort is.

Relatie met cellenconcept

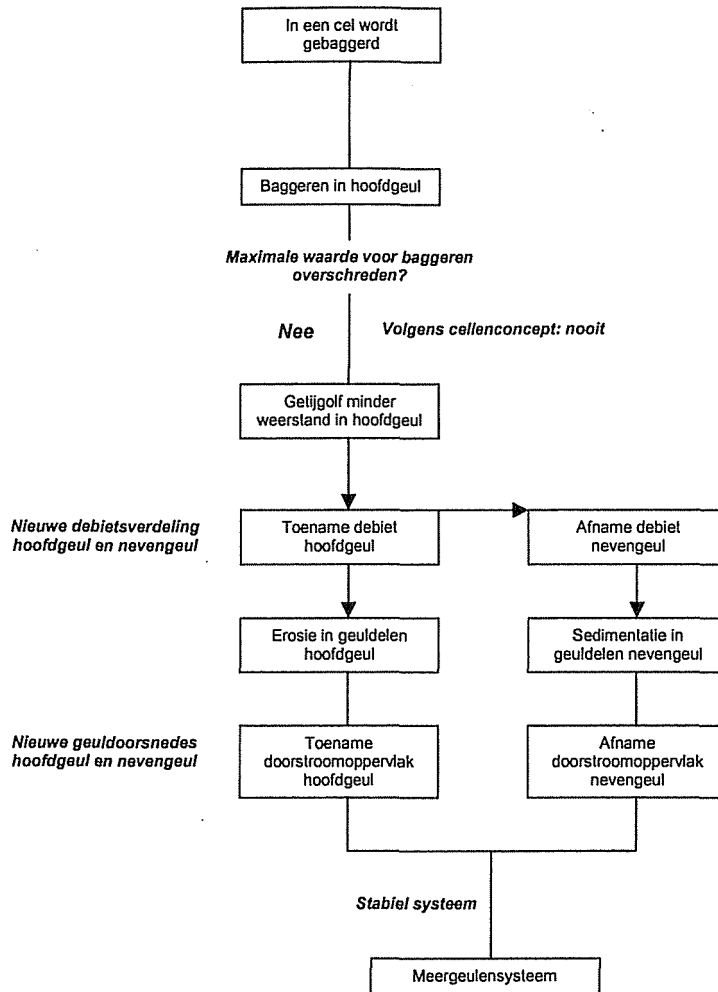
Volgens het cellenconcept wordt het systeem instabiel en zal het meergeulensysteem degenereren als de hoeveelheid storten groter is dan 10 % van de sedimenttransportcapaciteit.

Volgens het cellenconcept kan degeneratie naar een ééngelensysteem gestopt worden als het continu storten van sediment gestopt wordt en het stortcriterium niet te lang is overschreden.

De werkelijke hoeveelheid kan bepaald worden door de sedimenttransportcapaciteit van een cel bij een bepaalde verruiming te berekenen met Delft2D-MOR en daar 10 % van te nemen.

7.1.3 Denkmodel voor cel – baggeren

Schema



Figuur 7.3: Schema denkmodel voor een cel – baggeren

Toelichting op Figuur 7.3

De beschrijving van de processen van het deeldenkmodel voor een cel waarin gebaggerd is, is gelijkwaardig aan de beschrijving van de processen voor een cel waarin gebaggerd én gestort is (zie paragraaf 7.1.1). Het enige verschil tussen de twee combinaties van processen is dat de getijgolf alleen minder weerstand in de nevengeul door het baggeren op de drempel ondervindt. De weerstand in de nevengeul blijft gelijk. Als gevolg hiervan zal de debietverdeling hierdoor minder veranderen dan in een cel waarin zowel gebaggerd wordt als gestort. Met uiteindelijk als gevolg dat de hoofdgeul minder zal verruimen en de nevengeul minder zal sedimenteren. De maximale waarde om stabiliteit te garanderen wordt nu alleen bepaald door de hoeveelheid sedimentatie in de nevengeul. Er zal heel veel moeten worden gebaggerd in de hoofdgeul om de stroomsnelheid in de nevengeul zoveel te verlagen dat de daaropvolgende sedimentatie zo groot wordt dat het systeem zijn stabiliteit verliest.

Relatie met cellenconcept

Volgens het cellenconcept wordt het systeem nooit instabiel als er alleen gebaggerd wordt.

7.1.4 Vergelijking uitvoer deeldenkmodellen

De drie denkmodellen geven als uitvoer alle drie dezelfde kwalitatieve verandering van doorstroomoppervlaktes (toename doorstroomoppervlakte hoofdgeul, afname doorstroomoppervlakte nevengeul). Deze veranderingen gelden voor een morfologische cel,

waarvan de uitgangssituatie een situatie is waarin niet wordt ingegrepen of een situatie is met dezelfde, alleen kleinere, ingreep. In het cellenconcept wordt voor de drie verschillende scenario's zelfs uitgegaan van een situatie in evenwicht. Dit evenwicht (of het een evenwicht is en welk evenwicht) is echter nog niet aangetoond met behulp van meetgegevens.

Het is niet waarschijnlijk dat de uiteindelijke doorstroomoppervlaktes (in evenwicht) van de hoofdgeul en de nevengeul bij een bepaalde ingreep (grootte) hetzelfde zijn voor de drie scenario's om de volgende redenen:

- Uit de fasediagrammen van een stabiliteitsanalyse (bijlage C) blijkt dat de gevolgen voor de evenwichtswaterdieptes groter zijn wanneer er zowel gebaggerd als gestort wordt dan wanneer er alleen gestort wordt: bij dezelfde ingreep (5%) is de verandering in waterdieptes groter in geval van baggeren én storten.
- Het cellenconcept heeft als resultaat dat het meergeulensysteem bij een kleinere ingreep degenerereert naar een ééngeulensysteem als er in één geul gebaggerd wordt en in de andere geul gestort wordt (5%) dan wanneer er alleen in één geul gestort wordt (10%). Voor een situatie waarin alleen gebaggerd wordt, zal het systeem niet totaal degenereren.
- Daarnaast laten de deeldenkmodellen ook zien dat de debietverdeling in geval van scenario baggeren&storten door twee factoren wordt beïnvloed (weerstand nevengeul groter en weerstand hoofdgeul kleiner). In geval van alleen storten of alleen baggeren wordt de debietverdeling door één factor beïnvloed (respectievelijk weerstand nevengeul groter of weerstand hoofdgeul kleiner).

Hierop gebaseerd zouden de doorstroomoppervlaktes voor het scenario baggeren en storten de grootste verandering ondergaan bij een bepaalde ingreep. Hoe groot het verschil is van de doorstroomoppervlaktes tussen de verschillende scenario's is onduidelijk.

7.2 Koppeling deeldenkmodellen

Om een compleet kwalitatief beeld voor het hele estuarium te krijgen wat betreft het behoud van het meergeulensysteem of totale degeneratie, zouden de resultaten van de deeldenkmodellen aan elkaar moeten worden gekoppeld. Het probleem hierbij is dat de deeldenkmodellen niet geïsoleerd mogen worden bekeken, omdat de cellen niet op zichzelf staan, maar door elkaar worden beïnvloed. Dit volgt uit de toetsing van de aannames in het cellenconcept (Wang e.a., 2002). De resultaten kunnen dus ook niet simpelweg worden opgeteld. Daarom is het totale beeld van ingrepen op megaschaal van belang voor de stabiliteit. Op megaschaal (en op de lange termijn) spelen ook andere natuurlijke processen een rol, zoals sedimentaanbod vanuit de voordelta, relatieve zeespiegelstijging en grootschalig sedimenttransport van oost naar west en andersom. De verhouding tussen het sedimentaanbod en de zeespiegelstijging bepaalt op het estuarium gaat verlanden of gaat verdrinken: wanneer het sedimentaanbod groter is dan de vraag, zal het meergeulensysteem de neiging krijgen te gaan verlanden (sterke afname kombergend volume en geuldoorsnede); andersom zal het systeem de neiging krijgen te gaan verdrinken (platen vallen niet meer droog). (Winterwerp e.a., 2000) Baggeren en storten kan de getijvolumia ook beïnvloeden en daarmee een toename of afname van het sedimentaanbod vereisen. Het sedimenttransport van oost naar west of omgekeerd kan ervoor zorgen dat zandtekorten in bijvoorbeeld het oosten worden aangevuld door zandoverschotten in het westen.

In de deeldenkmodellen zal dus ook rekening moeten worden gehouden met wat er in de aangrenzende cellen gebeurd is. Echter, omdat niet precies duidelijk is hoe de cellen, fysisch gezien, invloed op elkaar uitoefenen kan de wisselwerking niet worden meegenomen in de kwalitatieve beschrijving van de processen in het denkmodel.

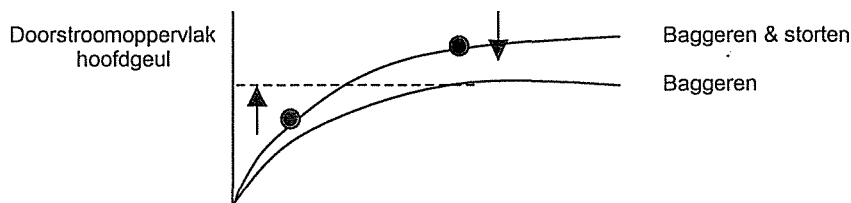
7.3 Toekomstbeeld met behulp van nieuw denkmodel

7.3.1 Belang van situatie voorafgaand aan ingreep

De beschreven kwalitatieve veranderingen in de parameters debiet en doorstroomoppervlakte gelden voor een morfologische cel, waarvan de uitgangssituatie een situatie is waarin niet wordt ingegrepen of een situatie is met dezelfde, alleen kleinere, ingreep. Door de bagger- en stortstrategie te veranderen, vindt er een wijziging plaats van scenario (Tabel 6.3). Als gevolg van

deze wijziging samen met (of zonder) een verandering van de grootte van de ingreep zal de ontwikkeling van de doorstroomoppervlaktes van de betreffende morfologische cel reageren. Uit de theorie van het cellenconcept zou geconcludeerd kunnen worden dat het systeem naar een ander evenwicht zou willen gaan, wanneer het stortcriterium in de situatie voorafgaand aan de verandering niet (of niet lang genoeg) overschreden is. Dit evenwicht zal doorstroomoppervlaktes willen aannemen die passen bij het nieuwe scenario en de ingreep. De maximale hoeveelheid storten (en baggeren) verandert ook als gevolg van de verandering in scenario. Vooralsnog is het niet precies duidelijk hoe het systeem in geval van scenario verandering zal reageren. Dit is afhankelijk van de situatie voor de verandering en de nieuwe evenwichtssituatie na het invoeren van de verandering. Dit kan toegelicht worden met behulp van een voorbeeld.

In een morfologische cel in het oosten werd tijdens de eerste verruiming gebaggerd en gestort. Tijdens de tweede verruiming werd er nog steeds gebaggerd (en meer dan tijdens de eerste verruiming), maar het sediment werd voornamelijk in het westen (buiten de morfologische cel) gestort. Het scenario in de betreffende cel is dus gewijzigd van baggeren&storten naar baggeren en de grootte van de ingreep is daarnaast ook veranderd. Dit betekent dat het systeem andere doorstroomoppervlaktes wil gaan aannemen (passend bij de nieuwe situatie). Afhankelijk van hoe groot deze evenwichtsdoorstroomoppervlaktes zijn en wat de situatie was vóór de ingreep zullen de doorstroomoppervlaktes toe- of afnemen. In onderstaande figuur: het doorstroomoppervlak, kleiner dan de nieuwe evenwichtsdoorsnede (blauwe situatie) zal willen toenemen, en het doorstroomoppervlak, groter dan de nieuwe evenwichtsdoorsnede, zal willen afnemen.



Van degeneratie is in geval van baggeren geen sprake (volgens de theorie van het cellenconcept). Het systeem blijft een meergeulensysteem.

Uit bovenstaande theorie kan geconcludeerd worden dat bij het toepassen van de theorie van een denkmodel op een specifieke morfologische cel de situatie voor de verandering van de ingreep (scenario en grootte) belangrijk is voor de ontwikkeling van de parameters uit het model.

Om de theorie te kunnen toetsen, kan de ontwikkeling van de parameters (waaronder het doorstroomoppervlak) op celniveau bekeken worden met behulp van meetgegevens. In bijlage F staat een plan van aanpak voor het toetsen van een denkmodel op celniveau.

7.3.2 Toekomstbeeld met behulp van stabiliteit

In het nieuwe denkmodel is het zelfversterkend proces ingepast, wat kan zorgen voor degeneratie van het meergeulensysteem naar een ééngeulensysteem (instabiel systeem). Het huidige denkmodel geeft alleen aan dat het systeem verandert, maar niet hoeveel het verandert. Wanneer dit zelfversterkend proces getoetst kan worden kan daarmee aangetoond worden of het systeem stabiel blijft of instabiel is geworden door de bagger- en stortactiviteiten. Een andere methode voor het aantonen van stabiliteit is het zoeken naar een toekomstig evenwicht met behulp van meetgegevens (debiet of doorstroomoppervlaktes). De periode na de ingreep is waarschijnlijk te kort om hier zekerheid over te kunnen geven. Volgens Wang e.a. (2002) is het heel lastig om inzicht te krijgen in stabiliteit, omdat de relevante morfologische tijdschaal groot kan zijn en het dus lang kan duren voordat relevante veranderingen in het systeem zichtbaar worden. Deze morfologische tijdschaal wordt groter geschat dan de tijdschaal behorend bij macroschaal (decennia).

Geconcludeerd kan worden dat toetsing van stabiliteit op dit moment nog niet mogelijk wordt geacht.

Naast de processen van de deeldenkmodel zal er voor het bepalen van een toekomstbeeld ook rekening moeten worden gehouden met lange termijn processen als zeespiegelstijging, sedimentaanbod en netto sedimenttransport van west naar oost of omgekeerd.

8 Conclusies

Het doel van het onderzoek is, aan de hand van het cellenconcept, het huidige denkmodel aan te passen of te verbeteren, zodat het een betere beschrijving kan geven van de fysische processen in het estuariumstelsel en de morfologische situatie na verruiming.

Het nieuwe denkmodel is *aangepast* ten opzichte van het huidige denkmodel op de volgende punten:

- De opzet van nieuwe denkmodel bestaat uit de uitwerking van de **drie** deeldenkmodellen op morfologisch celniveau voor de scenario's baggeren&storten, baggeren en storten. (bijlage E) Deze drie scenario's worden onderzocht in verschillende denkmodellen, omdat de relaties tussen de parameters van het denkmodel niet voor alle scenario's gelijk zijn.
- In de deeldenkmodellen wordt voor de ingreep een constante hoeveelheid baggeren en/of storten per tijdseenheid genomen.
- De interactie tussen hoofd- en nevengeul wordt in de deeldenkmodellen meegenomen; de interactie wordt uitgedrukt in de verandering in debieten: als het debiet in de ene geul groter wordt, wordt het debiet in de andere geul kleiner en omgekeerd.
- Het netto circulatie sedimenttransport en het storten van sediment in de kortsluitgeulen wordt niet meegenomen.
- In de deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel is onderscheid gemaakt tussen de processen die leiden tot een nieuw evenwicht van het meergeulensysteem (stabiel systeem) en de processen die leiden tot degeneratie naar een ééngeulsysteem (instabiel systeem). Voor degeneratie naar een ééngeulsysteem is het zelfversterkend proces kenmerkend, wat in het denkmodel wordt beschreven door een terugkoppeling tussen afname doorstroomoppervlak en toename weerstand. Deze terugkoppeling zorgt ervoor dat het debiet in de nevengeul steeds verder afneemt met als gevolg dat het doorstroomoppervlak van de nevengeul steeds verder afneemt (dichtslibben). Voor de kritische waarde van storten wordt het stortcriterium van het cellenconcept als indicatie genomen.
- De uitvoer van de deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel is een veranderd meergeulensysteem (met andere doorstroomoppervlaktes van geulen) of een ééngeulsysteem.

Het nieuwe denkmodel is theoretisch *verbeterd* ten opzichte van het huidige denkmodel op de volgende punten:

- De aanpassingen van het denkmodel zijn gefundeerd op de theorie van het cellenconcept.
- Het ontwerpen van de drie deeldenkmodellen op celniveau heeft voordelen:
 - De effecten van baggeren, storten en zandwinning zijn vooral op deze schaal direct merkbaar (Stive e.a., 1998);
 - De gevolgen van baggeren en/of storten op de stabiliteit van het meergeulensysteem kunnen eenvoudiger op deze schaal bekeken worden (theorie cellenconcept);
 - Verschillende scenario's (baggeren&storten, baggeren of storten) kunnen worden doorlopen, zodat de resultaten daarvan gebruikt kunnen worden om de effecten van een bepaalde bagger- en stortstrategie te berekenen.
 - De sedimenttransportcapaciteit is niet overal in de Westerschelde even groot (in het oosten kleiner dan in het westen) (Winterwerp e.a., 2000). Op kleine schaal kan rekening worden gehouden met deze variatie.
- De interactie tussen hoofd- en nevengeul is een verbetering. Deze interactie is belangrijk voor de verandering van geulinhouden en de daarop volgende processen.
- De invoer van het zelfversterkend proces (de terugkoppeling tussen afname doorstroomoppervlak en toename weerstand in geval van instabiliteit) is een verbetering, omdat onderscheid wordt gemaakt tussen processen in een stabiel systeem en processen in een instabiel systeem, welke respectievelijk resulteren in een meergeulensysteem en een ééngeulsysteem. Deze toevoeging maakt de beschrijving van de processen completer.

- Door het stortcriterium van het cellenconcept te gebruiken als kritische waarde van storten, wordt in het denkmodel gekwantificeerd bij welke ingreep het zelfversterkend proces een rol gaat spelen.

Wanneer met behulp van meetgegevens bepaald zou kunnen worden of het meergeulensysteem behouden blijft ofwel dat het systeem degenereert naar een ééngeulensysteem, zou daarmee aangetoond kunnen worden dat het nieuwe denkmodel een belangrijke meerwaarde heeft ten opzichte van het huidige denkmodel (en dus is *verbeterd*). Juist in de deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel wordt dit onderscheid gemaakt tussen behoud meergeulensysteem en degeneratie naar ééngeulensysteem.

Parameters die hiervoor onderzocht kunnen worden zijn het debiet in de nevengeulen (of getijvolume) en het doorstroomoppervlakte van de nevengeul (of inhoud), omdat theoretisch gezien de verandering van deze parameters aan zou kunnen geven of het systeem stabiel is of niet. In een ééngeulensysteem stroomt er namelijk geen water meer door de nevengeul (debiet = 0) en is het doorstroomoppervlak van de nevengeul gelijk aan 0.

Vooralsnog lijkt het niet mogelijk te toetsen of het meergeulensysteem behouden blijft, omdat het systeem nog steeds verandert en het daardoor (nog) onduidelijk is naar welk evenwicht het systeem zou willen gaan. Het stortcriterium van het cellenconcept is de enige waarde die een indicatie kan geven van stabiliteit en het toekomstbeeld van een morfologische cel.

Wanneer stabiliteit wel aangetoond kan worden, kan daardoor de grootte van het stortcriterium van het cellenconcept getoetst worden en kan het criterium verder worden aangescherpt.

Voor MOVE kan geconcludeerd worden dat het nieuwe denkmodel niet een ander beeld oplevert voor de fysische ontwikkelingen in het estuarium, zolang stabiliteit niet getoetst en bewezen kan worden en het stortcriterium niet goed genoeg wordt geacht voor het kunnen aangeven van de grens tussen stabiliteit (behoud meergeulensysteem) en instabiliteit (totale degeneratie). Wel ligt er een beter gefundeerde theorie achter deze ontwikkelingen en kunnen de ontwikkelingen dus ook beter onderbouwd worden.

9 Discussie

Bij het ontwerpen van een nieuw denkmodel over de fysische effecten van verruiming in de Westerschelde is een aantal aannames gemaakt. Deze aannames en de eventuele onzekerheid in deze aannames zetten het resultaat in een bepaald perspectief.

- In het nieuwe denkmodel wordt de theorie van het denkmodel toegepast op celniveau (macroschaal), terwijl het denkmodel oorspronkelijk voor de Westerschelde (megaschaal) ontwikkeld was.
Een nadeel is dat de morfologische cellen niet afzonderlijk van elkaar kunnen worden beschouwd bij het evalueren van effecten van baggeren en storten en dat het hele estuarium integraal bestudeerd dient te worden (Wang e.a., 2002).
- In de drie deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel is de opeenvolging van processen van het huidige denkmodel gevolgd. Deze processen worden als meest waarschijnlijk geacht voor de ontwikkelingen in het meergeulensysteem te zorgen. Er zijn echter meer mogelijke relaties denkbaar, zoals bijvoorbeeld de relatie tussen vorm en bodemvormen van het estuarium enerzijds en de getijd dominantie anderzijds, of de relatie tussen getijd dominantie en circulatiestroming/doorstroomoppervlak, of de relatie tussen getijd dominantie en de netto (circulatie) sedimenttransport (paragraaf 3.2.1).
- In dit onderzoek worden twee aannames gedaan met betrekking tot het baggerwerk, onderbouwd door de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept:
 - a) De gevolgen van onderhoudsbaggerwerk worden bekeken, omdat aangenomen wordt dat de gevolgen van onderhoudsbaggerwerk op de ontwikkelingen in het systeem dominant zijn ten opzichte van aanlegbaggerwerk en dus bepalend.
 - b) Door het onderhoudsbaggerwerk wordt het systeem naar een nieuw evenwicht geforceerd.

De eerste aanname kan in twijfel worden getrokken door het bewijs (Hulscher e.a., 2001) dat een eenmalige ingreep in de Noordzee door vrij gedrag veranderingen in bodemvormen kan veroorzaken. Echter, de fysische processen in de Noordzee verschillen van die in de Westerschelde, bijvoorbeeld door de bochtstroming welke wel aanwezig is in de Westerschelde en niet in de Noordzee. Daarnaast treedt in de Westerschelde vrij gedrag minder snel op door de grote beperkingen die door het estuarium worden opgelegd (de vastgelegde grenzen).

De periode na de verruiming is nog te kort om uitsluitend de kunnen geven over het evenwicht van het systeem en dus over de juistheid van de aanname dat onderhoudsbaggerwerk het systeem naar een nieuw evenwicht forceert. De resultaten van het cellenconcept laten zien dat het systeem naar een ander evenwicht gaat bij een continue ingreep.

- De aanpassingen in de deeldenkmodellen zijn gebaseerd op de theorie van het cellenconcept. Daarnaast wordt het stortcriterium, bepaald met behulp van het cellenconcept, ook gebruikt in de deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel. Voor het bepalen van dit criterium zijn in de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept een aantal aannames gemaakt en daarnaast zijn er ook een aantal beperkingen van het cellenconcept (bijlage D). Daarnaast zijn er een aantal grote verschillen tussen de stabiliteitsanalyse en de processen in het denkmodel (Tabel 6.2). Afgevraagd moet worden of door deze aannames, beperkingen en verschillen tussen de modellen, het stortcriterium wel gebruikt mag worden in de deeldenkmodellen. Een argument vóór het kunnen gebruiken van het stortcriterium is dat het stortcriterium in door Jeuken (2001) geverifieerd. Uit deze verificatie is gebleken dat het theoretisch stortcriterium redelijkerwijs kan worden toegepast op de macrocellen (celniveau deeldenkmodel).

- In de deeldenkmodellen kunnen verschillende scenario's (baggeren&storten, baggeren of storten) doorlopen worden. Bij het doorlopen van deze scenario's moet echter wel rekening worden gehouden met de uitgangssituatie (ingreep en grootte van ingreep) voorafgaand aan het scenario. De fysische processen en de uitvoer van het denkmodel (toename doorstroomoppervlak hoofdgeul en afname doorstroomoppervlakte nevengeul, met een verandering meergeulensysteem of ééngeulensysteem tot gevolg) kunnen niet los van deze situatie gezien worden. Afgevraagd moet worden hoe groot de invloed van de uitgangssituatie is op de fysische processen en de ontwikkeling van de parameters uit de deeldenkmodellen.

10 Aanbevelingen

Volgend uit het onderzoek en de hierboven beschreven aannames kan een aantal aanbevelingen gedaan worden voor verdere verbetering van het denkmodel en daarmee voor beter begrip van het systeem.

- De opeenvolging van fysische processen van het huidige denkmodel wordt in de deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel weer gebruikt, omdat ervan uitgegaan wordt dat die combinatie de meest waarschijnlijke is. Om dit te onderbouwen, kunnen de kwalitatieve veranderingen in parameters en de relaties tussen de parameters van het denkmodel getoetst worden in een vervolgonderzoek met behulp van meetgegevens. Een opzet voor deze toetsing is te vinden in bijlage F. Daarnaast kan ook nog onderzoek worden gedaan naar andere mogelijk belangrijke processen of een uitbreiding van processen en de invloed daarvan op de uiteindelijke situatie. Bijvoorbeeld processen die invloed zouden kunnen hebben op de stabiliteit of op de morfologische situatie (getijd dominantie, getij-asymmetrie).
- Voor het bagger- en stortbeleid in de Westerschelde is het belangrijk te weten wanneer een systeem zijn stabiliteit verliest bij een bepaalde ingreep en degenereert naar een ééngeusysteem. Daarom zou de stabiliteit in de deeldenkmodellen getoetst moeten kunnen worden met behulp van meetgegevens of zou duidelijk gemaakt moeten worden wanneer het zelfversterkend proces in gang gezet wordt. In bijlage F wordt een globale opzet van toetsing van stabiliteit beschreven. Volgens Wang (2002) is het alleen heel lastig om inzicht te krijgen in stabiliteit, omdat de relevante morfologische tijdschaal groot kan zijn en het dus lang kan duren voordat relevante veranderingen in het systeem zichtbaar worden.
- De deeldenkmodellen geven nu een beeld van de veranderingen op celniveau. Er dient nu nog onderzocht te worden hoe die veranderingen kunnen worden doorvertaald naar het niveau van het estuarium. Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat morfologische cellen niet geïsoleerd van elkaar kunnen worden beschouwd (Wang e.a., 2002) en dat op het niveau van het estuarium (megaschaal) ook andere processen als zeespiegelstijging, sedimentaanbod en groot sedimenttransport tussen oost en west onderling een belangrijke rol spelen op de lange termijn.
- Er moet nader onderzoek gedaan worden naar de toepassing van het stortcriterium in het denkmodel. Wanneer rekening gehouden wordt met de kanttekeningen van het stortcriterium, moeten de deeldenkmodellen daarvoor uitgebreid worden. Voorbeeld: in een van nature eroderende geul kan meer gestort worden dan in een van nature sedimenterende geul (groter stortcriterium). In het denkmodel zou in dat geval de autonome ontwikkeling van de geulen moeten worden meegenomen.
- Voor aanscherping van de grootte van het stortcriterium kan er verder onderzoek gedaan worden naar de knooppuntrelatie en de cruciale rol die waarde van k uit deze relatie speelt op de stabiliteit en het stortcriterium. Wanneer de werkelijke waarde van k in een bepaalde situatie duidelijk zou zijn én de invloed van baggeren en storten op deze waarde, kan het stortcriterium beter worden onderbouwd en verder worden aangescherpt. Daarnaast dient de invloed van de werkelijke bagger- en stortmethode op het stortcriterium ook verder te worden onderzocht.
- Voor de toepassing van de deeldenkmodellen op een specifieke morfologische cel moet rekening worden gehouden met de uitgangssituatie. Het systeem zal naar het evenwicht willen met doorstroomoppervlaktes die passen bij het nieuwe scenario en ingreep (theorie cellenconcept). Hoe de doorstroomoppervlaktes hierop reageren is afhankelijk van de staat van voorafgaand aan de verandering en de nieuwe evenwichtssituatie

(doorstroomoppervlaktes) na het invoeren van de verandering. Er zou dus onderzoek gedaan kunnen worden naar de evenwichtsdoorstroomoppervlaktes bij een bepaald scenario en ingreep. De fasediagrammen van het cellenconcept geven al een indicatie van de grootte van het doorstroomoppervlak door middel van de waterdieptes.

- De uitvoer van de deeldenkmodellen van het nieuwe denkmodel is een meergeulensysteem (maar met andere doorstroomoppervlaktes dan voor de ingreep), of een ééngelensysteem. De parameters hoogte en oppervlakte platen en slikken, ondiepwaterareaal en komberging zijn niet behandeld in dit onderzoek en ook niet meegenomen in de deeldenkmodellen. Deze parameters zouden in een vervolgonderzoek wel onderzocht kunnen worden.

Referentielijst

- Alkyon, 2000
Stroomvoerend vermogen, getijdominantie en resttransporten; een verkennend onderzoek toegespitst op de Westerschelde
Project A569, Alkyon
- Arends, Aline, Pauline Kamermans, Ed Stikvoort, Ben de Winder, 1999
Monitoring van de effecten van de verruiming 48'-43'; een eerste evaluatie van de bagger- en stortstrategie, rapport 4
Rapport RIKZ-99.019, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee
- Dekker, P., J.M. van Voorthuizen, 1994
Research on the morphological behaviour of bifurcations in rivers
Afstudeerrapport, Faculteit van Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft
- Fokkink, R.J., Z.B. Wang, 1993
Study on fundamental aspects of 1D-network morphodynamic models
Rapport Z654, Delft hydraulics
- Huijs, S.W.E., 1996
De ontwikkeling van de geometrie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen, 1995-1994
Rapport R96-17, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht
- Hulscher, S.J.M.H., 1996
Formation and migration of large-scale, rhythmic sea-bed patterns: a stability approach
Proefschrift, Universiteit Utrecht
- Jeuken, M.C.J.L., 2000
On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary
Proefschrift, Universiteit Utrecht
- Jeuken, M.C.J.L., 2001
Verificatie van het cellen-concept Westerschelde op basis van historische gegevens
Rapport Z3078, WL delft hydraulics
- Jong, S.A. de, A. van Kleef, 1996
Ontwikkelingen in de Westerschelde, prognose voor de komende 25 jaar
Nota AX-96.009/NWL-96.14/RIKZ-96.006, Rijkswaterstaat/Directie Zeeland
- Kerckhoven, J.D.M. van, 1995
Morphological modelling of ebb and flood channel systems in estuaries
Afstudeerrapport, Faculteit van Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft
- Liek, G.A., 2001
Monitoring van de effecten van de verruiming 48'-43'; beschrijving van de fysische toestand van de Westerschelde t/m 2000, rapport 5
Rapport RIKZ/2001.023, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee
- Liek, G.A., F.O.B. Lefevre, 2002
Datarapportage fysica en chemie 2002
Werkdocument RIKZ/AB/2002.820x, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee

- Mol, G., A.M. van Berchum, G.M. Krijger, 1997
De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43'; beschrijving van trends in de fysische, biologische en chemische toestand
Rapport RIKZ-97.049, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee
- ScheldeAtlas, een beeld van een estuarium, 1999
- Stive, M.J.F., Z.B. Wang, A.W. van der Weck, H.F.P. van den Boogaard, M.J. Baptist, 1998
Definitiestudie Morfologische Dynamiek Westerschelde
Rapport Z2427, WL delft hydraulics
- Veen, J. van, 1950
Eb- en vloodschar systemen in de Nederlandse getijwateren
Tijdschrift KNAG, 2^e reeks, deel 67, pp 303-325
- Verbeek, H., F.T.G. Tank, M.D. Groenewoud, 1998
Drempels in de Westerschelde, natuur en mens aan het werk
Rapport RIKZ-98.011, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee
- Wang, Z.B., R.J. Fokkink, M. de Vries, A. Langerak, 1995
Stability of river bifurcations in 1D morphological models
In Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No. 6, 739-750
- Wang, Z.B., P.M.C. Thoolen, R.J. Fokkink, 1997
Studie naar morfologische effecten van storten en baggeren in de Westerschelde, ten behoeve van MER storten gebaggerd materiaal
Rapport Z2310, WL delft hydraulics
- Wang, Z.B., J.C. Winterwerp, 2001
Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems
In Proceedings of the 2nd IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, September 10-14, 2001, Obihiro, Japan, pp.515-524.
- Wang, Z.B., P. Thoolen, I. Tanczos, 2002
Onderbouwing van het cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer; toetsing aannames met SOBEK berekeningen
Rapport Z3325, WL delft hydraulics
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuijper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen, Z.B. Wang, 2000
Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster Morfologie, rapportage Uitvoeringsfase
Rapport Z2878, WL delft hydraulics
- Winterwerp, J.C., Z.B. Wang, M.J.F. Stive, A. Arends, C. Jeuken, C. Kuijper, P.M.C. Thoolen, 2001
A new morphological schematisation of the Western Scheldt estuary, the Netherlands
In Proceedings of the 2nd IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, September 10-14, 2001, Obihiro, Japan, pp. 525-534.
- Witteveen+Bos, 1999
Getijanalyse Westerschelde
Project Rw741.1, Witteveen+Bos

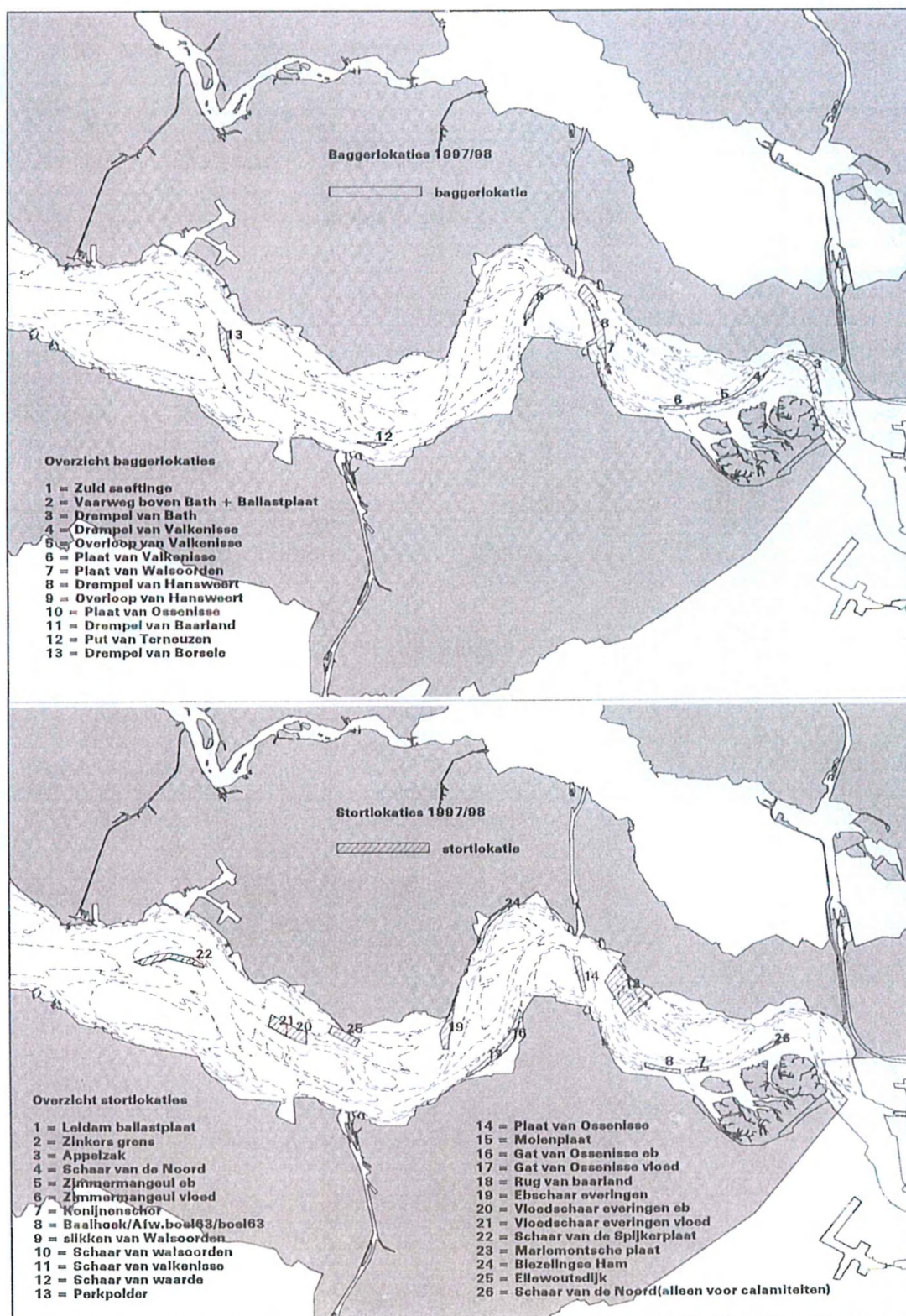
Bijlagen

Inhoudsopgave

INHOUDSOPGAVE	I
BIJLAGE A: BAGGER- EN STORTGEGEVENS.....	II
A.1 BAGGER- EN STORTLOCATIES (LIEK, 2001).....	II
A.2 TOTALE BAGGER- EN STORTHOEVEELHEDEN.....	III
BIJLAGE B: SEDIMENTTRANSPORTFORMULES.....	V
BIJLAGE C: RESULTATEN STABILITEITSANALYSE.....	VI
BIJLAGE D: BEPERKINGEN EN AANNAMES CELLENCONCEPT	X
D.1 BEPERKINGEN (WINTERWERP E.A., 2000)	X
D.2 AANNAMES (WANG E.A., 2002).....	X
BIJLAGE E: GEHELE NIEUWE DENKMODEL.....	XI
BIJLAGE F: TOETSING NIEUWE DENKMODEL	XIII
MEETGEGEVENS.....	XIII
<i>Gegevens nodig voor toetsing</i>	XIII
<i>Afbakening meetgegevens</i>	XV
TOETSING PARAMETERS EN RELATIES	XV
TOETSING STABILITEIT.....	XVI
REFERENTIELIJST	XVII

Bijlage A: Bagger- en stortgegevens

A.1 Bagger- en stortlocaties (Liek, 2001)



A.2 Totale bagger- en storthoeveelheden

	Baggeren (bruto)								Storten (bruto)				
	Oost	Midden	West	Totaal		Onttrokken	Onttrokken	Import Stort		Oost	Midden	West	Totaal
				Westerschelde		Nederland	Belgie	Belgie					Westerschelde
Jaar	Baggeren	Baggeren	Baggeren	Baggeren						Storten	Storten	Storten	Storten
1955	4040890	0	0	4040890		0	119125	0		3921765	0	0	3921765
1956	3684985	0	0	3684985		0	123720	0		3561265	0	0	3561265
1957	3470100	0	0	3470100		0	43355	0		3426745	0	0	3426745
1958	3881792	0	0	3881792		0	68260	0		3813532	0	0	3813532
1959	3762990	0	0	3762990		0	148025	0		3614965	0	0	3614965
1960	4042470	0	0	4042470		0	118555	86328		4010242	0	0	4010242
1961	4498179	0	0	4498179		0	67455	58167		4488891	0	0	4488891
1962	5305193	0	0	5305193		0	77150	0		5228043	0	0	5228043
1963	5025464	0	0	5025464		0	47873	0		4977591	0	0	4977591
1964	5609380	0	0	5609380		26553	55956	0		5526871	0	0	5526871
1965	4443037	0	0	4443037		71847	319695	67798		3947795	171498	0	4119293
1966	3486388	0	0	3486388		163013	423325	4512		2763481	141081	0	2904562
1967	4453317	0	0	4453317		0	17328	0		4435989	0	0	4435989
1968	5208280	0	0	5208280		307993	1387794	0		3512493	0	0	3512493
1969	4176005	0	3277770	7453775		1206858	841271	42013		2625110	2590116	232433	5447659
1970	6388289	0	828228	7216517		2353255	579740	361599		3830075	794874	20172	4645121
1971	5628741	0	1781839	7410580		536715	1508626	44646		3628046	916334	865505	5409885
1972	5714272	0	2488213	8202485		249307	2498126	97184		3090375	1111825	1350036	5552236
1973	8469839	0	1337820	9807659		46808	2708409	0		5714622	0	1337820	7052442
1974	8053596	0	3315485	11369081		147802	1842623	0		6153807	475421	2749428	9378656
1975	9949917	887863	2676584	13514364		61880	3004126	83140		6296255	2732176	1503067	10531498
1976	12096850	0	1969816	14066666		11535	3532132	98471		7474066	1341853	1805551	10621470
1977	9054270	129414	537224	9720908		27741	2204208	894307		5869924	1976118	537224	8383266
1978	8984905	289468	2696893	11971266		7679	1717952	1203408		5986263	2640721	2822059	11449043
1979	11442679	244895	1314731	13002305		14836	2245444	924862		5689401	4356125	1621361	11666887
1980	10302237	352660	1348552	12003449		22440	1367520	383331		4587409	2784857	3624554	10996820
1981	9868942	0	980796	10829738		0	599780	291507		5681723	2123852	2715890	10521465
1982	8187163	3173868	783708	12144739		0	36376	31884		6511555	3631071	1997621	12140247
1983	6192227	518463	1149120	7859810		0	0	736656		4533198	1705624	2357644	8596466
1984	7536152	0	1132022	8668174		0	130508	424693		5917491	1017697	2027171	8962359
1985	8444898	439094	1540387	10424379		0	207037	485050		5990310	2621139	2090943	10702392
1986	10449718	430792	910977	11791487		1061018	1992	954303		8130465	2487310	1065005	11682780
1987	11218610	158430	461432	11838472		0	573662	153087		7435838	2847709	1134350	11417897
1988	10651769	0	519796	11171565		0	346800	102555		6453262	3954262	519796	10927320
1989	9286956	0	704866	9991822		0	263482	0		4682881	4340593	704866	9728340

De fysische effecten van verruiming in de Westerschelde
Bijlagen

1990	5777649	656562	769086	7203297		0	0	0		3756007	2678204	769086	7203297
1991	7538710	574606	910675	9023991		0	181600	0		3930001	4001715	910675	8842391
1992	6518451	352420	840396	7711267		0	56262	0		4234057	2429568	991380	7655005
1993	7272546	396879	663746	8333171		0	976408	0		3116171	876335	3364257	7356763
1994	7221037	1289478	851781	9362296		0	270978	0		4221222	3770633	1099463	9091318
1995	6832737	1435497	1821049	10089283		0	296246	0		2865119	4847362	2080556	9793037
1996	7720963	1544376	803800	10069139		0	309042	0		3343378	4825794	1590925	9760097
1997	8768312	412443	2073110	11253865		0	349303	0		1558758	3441533	5904271	10904562
1998	9822424	2077907	1970102	13870433		0	0	0		574131	4439041	8857261	13870433
1999	7590068	2421476	3322235	13333779		1071752	0	0		600670	4275383	7385974	12262027
2000	7350553	1200374	1873141	10424068		0	0	0		699147	4325832	5399089	10424068
2001	7436338	1273960	2080209	10790507		0	0	0		646761	4515685	5628061	10790507
Totaal	332860288	20260925	49715589	402836802		7389032	31667269	7529501		203057166	91189341	77063494	371310001

Bijlage B: Sedimenttransportformules

Verskillende sedimenttransportformules zijn:

- Engelund en Hansen
- Meyer-Peter-Müller
- Vereenvoudigde (algemene) transportformule

Voor Engelund en Hansen en Meyer-Peter-Müller wordt gebruik gemaakt van de dimensieloze transportparameter $\Phi = \frac{s}{\sqrt{g\Delta D^3}}$ en de dimensieloze stroomparameter

$\Psi = \frac{\mu\tau_b}{\rho g\Delta D} = \mu\theta = \mu \frac{hi}{\Delta D}$. Hierin is s het sedimenttransport g de zwaartekrachtsversnelling

(m^2/s), $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$, D is de korreldiameter van het sediment (m), $\mu = f\left(\frac{C}{C_{90}}\right)$, waarbij

C_{90} de Chézy-coëfficiënt is gerelateerd aan de D_{90} , h is de waterdiepte (m) en i is de helling (-).

- Engelund en Hansen: de formule van Engelund en Hansen (1967) is een totaal transportformule. Het berekende transport bevat dus zowel bodemtransport als zwevend transport van bodemmateriaal.

$$\Phi = 0.05\Psi^{\frac{5}{2}}, \text{ met } \mu = \left(\frac{C^2}{g}\right)^{\frac{2}{5}}$$

- Meyer-Peter-Müller: de formule van Meyer-Peter-Müller is zuiver experimenteel en heeft uitsluitend betrekking op het bodemtransport.

$$\Phi = 8(\Psi - 0.047)^{\frac{3}{2}}, \text{ met } \mu = \left(\frac{C}{C_{90}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

- Vereenvoudigde sedimenttransportformule: $s = \mu u^n = m\left(\frac{q}{h}\right)^n$, waarin m en n constanten zijn.

Bijlage C: Resultaten stabiliteitsanalyse

De numerieke aanpak van het oplossen van een stabiliteitsprobleem wordt gedaan met behulp van fasediagrammen. Hiervoor moeten een aantal verschillende keuzes gemaakt worden. De gemaakte keuzes in deze analyse zijn (Wang e.a., 2001):

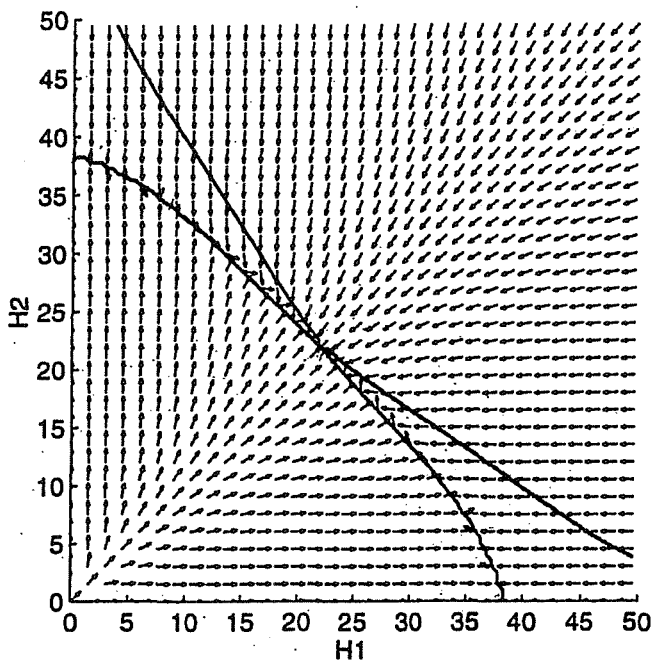
- Knooppuntrelatie: $\frac{S_{1i}}{S_{2i}} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1-k} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^k$
- Waarde van k : 2,2
- Sedimenttransportformule: Engelund-Hansen
- Kenmerken cel: symmetrisch, met daarin geulen met een lengte van 10 km en breedte van 1250; hydrodynamische parameters en sedimenttransportparameters zo gekozen dat evenwichtsdiepte in beide geulen 22 m is.

De evenwichtsdiepte van 22 meter in een systeem zonder ingreep wordt als uitgangssituatie genomen bij hetzelfde systeem met ingreep.

De resultaten van deze numerieke oplossingsmethode zijn in deze paragraaf weergegeven. In de fasediagrammen stellen de twee lijnen $\frac{dh_1}{dt} = 0$ en $\frac{dh_2}{dt} = 0$ voor. Het evenwichtspunt ligt op de

kruising van de twee lijnen. De kruising van een lijn met de x-as of de y-as is ook een evenwichtspunt. Het evenwichtspunt is stabiel als de pijltjes rondom het evenwichtspunt ernaar toe wijzen, het is instabiel als ze dat niet of niet allemaal (zadelpunt) doen.

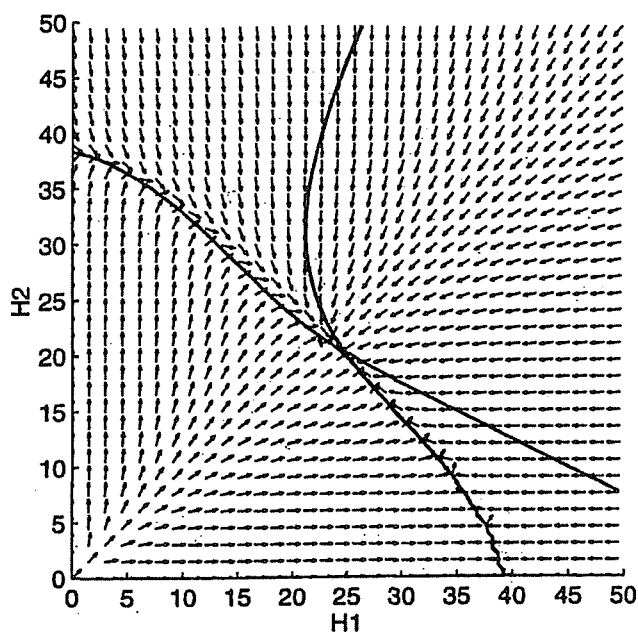
Geen ingreep



Geen ingreep

Het stabiele evenwichtspunt ligt bij evenwichtsdieptes van 22 meter in zowel geul 1 als geul 2. De andere twee evenwichtspunten liggen bij een diepte van 38 meter in geul 1 en een diepte van 0 meter in geul 2, maar ook andersom, een diepte van 0 meter in geul 1 en 38 meter in geul 2. Deze twee evenwichtspunten zijn instabiel: het systeem zal altijd weer naar het stabiele evenwicht gaan met twee geulen open, tenzij de uitgangssituatie is dat één van de twee geulen helemaal verdwenen is, dan zal het systeem een éengeulstelsel blijven.

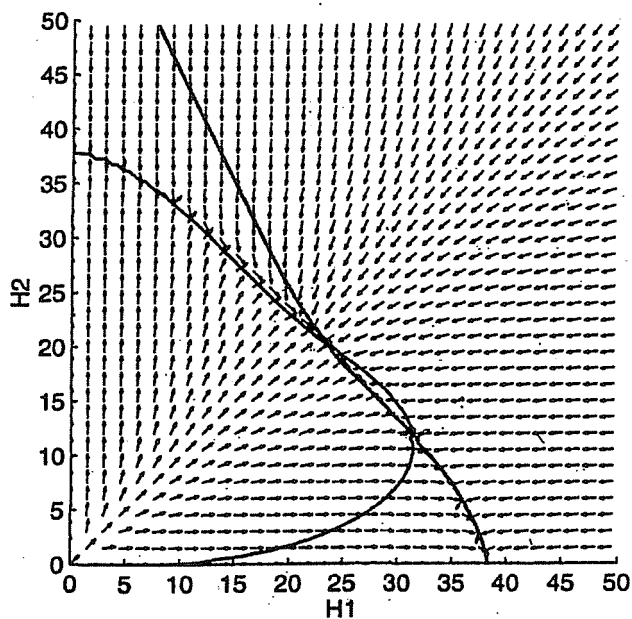
Alleen baggeren



10% baggeren in geul 1

Baggeren in een van de geulen geen invloed heeft op de stabiliteit. Ook bij grotere percentages zal het geen invloed hebben Wang e.a. (1997). De evenwichtsdieptes zijn wel veranderd, de waterdiepte in geul 1 is groter en in geul 2 kleiner vergeleken met de situatie waarin geen ingreep plaatsvond.

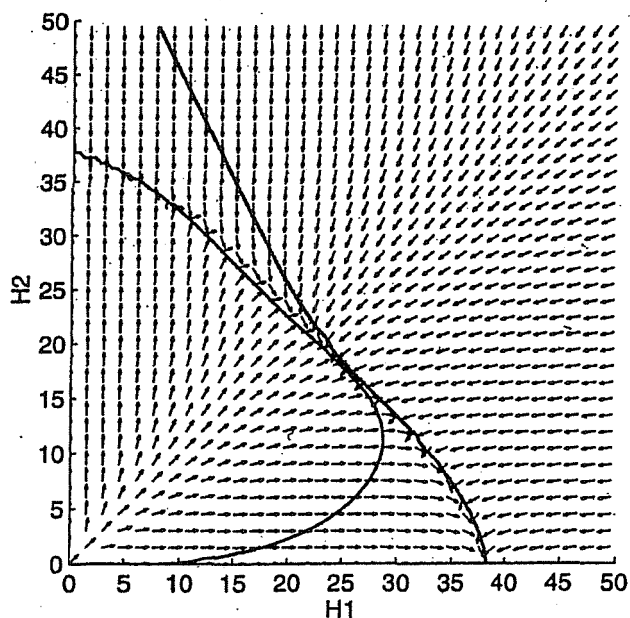
Alleen storten



5% storten in geul 2

Wanneer er 5% gestort wordt in geul 2 is er nog steeds een stabiel evenwichtspunt met twee geulen open. Dit punt is alleen iets verschoven: de waterdiepte in geul 2 is ondieper en geul 1 is dieper. Daarnaast zijn er nog twee dingen veranderd: het evenwichtspunt met geul 2 open is nu

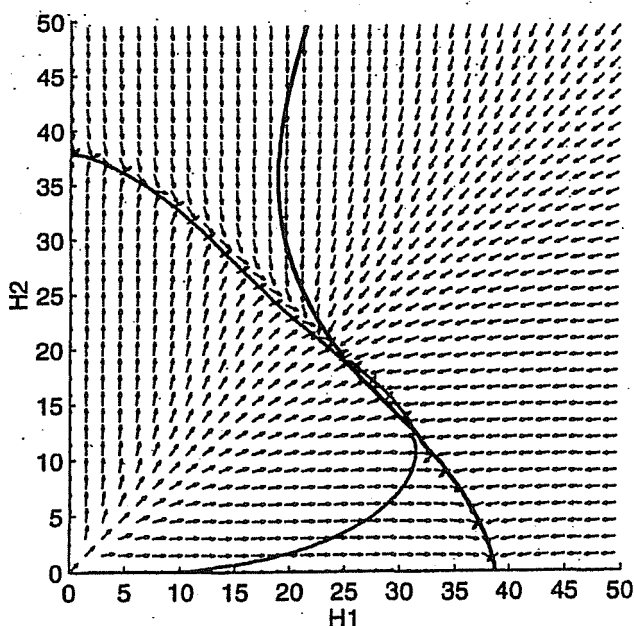
instabiel en er is een extra instabiel evenwichtspunt bijgekomen. Bij de uitgangssituatie waarbij h_1 en h_2 22 m zijn, zal het systeem echter naar een stabiel evenwicht met 2 geulen open willen gaan.



10% storten in geul 2

Wanneer er 10% gestort wordt is er geen stabiel evenwichtspunt meer met twee geulen open. Het enige stabiele evenwichtspunt is het punt waarbij geul 1 open is en geul 2 dicht. Elke uitgangssituatie zal dus leiden tot dit ééngeulstelsel. Blijkbaar geldt 10% (van de transportcapaciteit) storten in één van de geulen als het stortcriterium wanneer er alleen gestort wordt in een cel.

Baggeren en storten



5% baggeren in geul 1 en 5% storten in geul 2

Alleen baggeren bleek geen invloed te hebben op de stabiliteit, maar wanneer er gebaggerd wordt in de ene geul en weer gestort wordt in de andere geul, dan wordt het systeem verder uit zijn huidige evenwicht gebracht en zal dit wel invloed hebben op de stabiliteit. In de stabiliteitsanalyse

is voor de grootte van deze ingreep 5% gebruikt. Dit fasediagram laat zien dat er twee stabiele evenwichtspunten zijn en twee instabiele evenwichtspunten. Bij de uitgangssituatie waarbij h_1 en h_2 22 m zijn, zal het systeem naar een stabiel evenwicht met 2 geulen open willen gaan, waarbij de waterdiepte in geul 1 is toegenomen en in geul 2 is afgenomen.

Bijlage D: Beperkingen en aannames cellenconcept

D.1 Beperkingen (Winterwerp e.a., 2000)

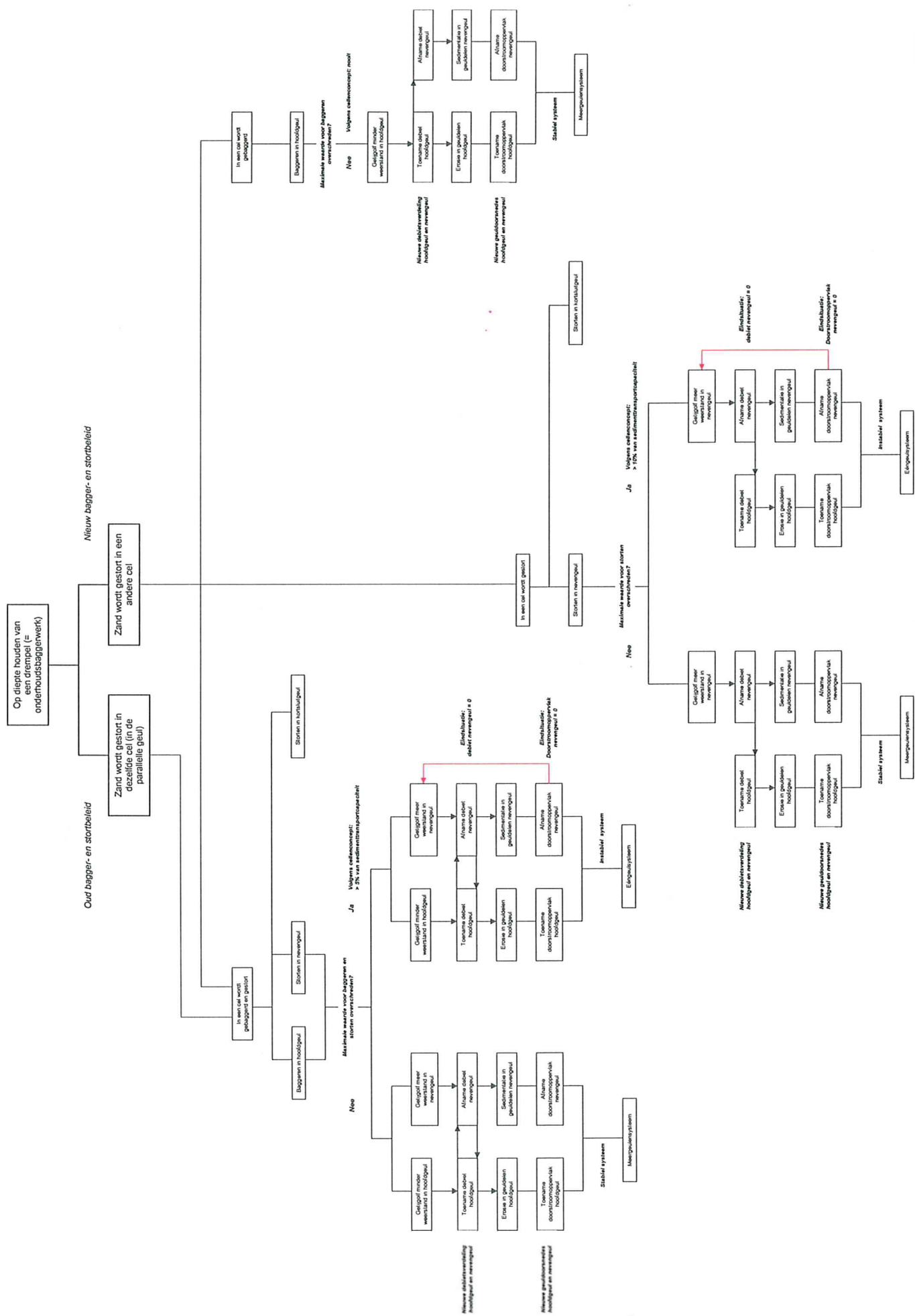
1. Er wordt verondersteld dat het Schelde-estuarium momenteel min of meer in een (dynamisch) evenwicht verkeert. Autonome ontwikkelingen worden nu niet door het cellenconcept beschreven;
2. Het cellenconcept geeft geen inzicht in de stabiliteit van het gehele estuarium of in de interactie (sedimentuitwisseling) tussen de diverse cellen. Er wordt geen rekening gehouden met de zandbalans van de Westerschelde. Ook de sedimentuitwisseling(scapaciteit) tussen de Westerschelde en voordelta wordt niet met het cellenconcept beschreven;
3. Het gedrag van kortsluitgeulen kan niet met het cellenconcept worden bestudeerd;
4. Het cellenconcept beschrijft alleen continu baggeren en storten. De werkelijke wijze waarop gebaggerd en gestort wordt (in blokken) wordt niet gemodelleerd.

D.2 Aannames (Wang e.a., 2002)

1. De stabiliteitstheorie die is afgeleid voor riviersplitsingen is van toepassing op getijdegebieden.
2. Het eb-vloedschaar karakter van het geulsysteem heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium.
3. De autonome ontwikkeling van het geulstelsel heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium.
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 gestort wordt.
5. De sedimentuitwisseling tussen cellen/bochtgroepen heeft geen invloed op de grootte van het stortcriterium.
6. Zeespiegelstijging heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulsysteem en de grootte van het stortcriterium.
7. De invloed van de plaat-geul interactie op de stabiliteit van het geulsysteem en de grootte van het stortcriterium is klein (Winterwerp e.a. (2000), Torenga (2001)).

De eerste zes aannames zijn getoetst met behulp van een 1D-morfologisch model (SOBEK) en het uitvoeren van nieuwe wiskundige stabiliteitsanalyses (Wang e.a. (2002)).

Bijlage E: Gehele nieuwe denkmodel



Bijlage F: Toetsing nieuwe denkmodel

De juistheid van het nieuwe denkmodel kan op twee manieren getoetst worden met behulp van meetgegevens: de kwalitatieve verandering van parameters kan bekeken worden en de relaties tussen de parameters ook. Dit wordt beschreven in een opzet voor toetsing.

Daarnaast is er een globale opzet gegeven voor het toetsen van stabiliteit.

Voorafgaand aan de plannen voor deze toetsingen worden de meetgegevens besproken

Meetgegevens

Gegevens nodig voor toetsing

De gegevens die volgens de parameters in het denkmodel nodig zijn voor toetsing zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Benodigde gegevens voor toetsing

	Wat staat er in de denkmodellen?	Parameters	Meetbaar?	Hoe beschikbaar? (kunstmatige) hoogte drempel	Hoe vertalen?	
					Gemiddelde verandering van drempel (= gemiddelde verandering van waterdiepte)	Gemiddelde verandering van drempel (= gemiddelde verandering van waterdiepte)
<i>Huidig denkmodel & Nieuw denkmodel</i>	Drempels verlagen	Drempel (lokaal)	Ja			
	Getigolfs minder weerstand	Weerstand getigolfs	Nee, niet direct	Indirect met behulp van snelheid getigolfs estuarium		
	Toename getijslag (oostelijk deel) Westerschelde	Getijslag (waterstanden)	Ja	Getijverschil	Gemiddeld verandering getijverschil	
	Toename/afname debiet geulen	Debiet	Ja	Getijvolume	Totale verandering getijvolume	
	Geuldelen verdiepen & verbreden (eroderen)/sedimenteren toename/afname doorstroomoppervlak	Doorstroomoppervlak	Ja	Inhoud geul	Totale verandering geulinhoud	
	Toename oppervlakte & hoogte platen	Oppervlakte platen	Ja	Areaal plaat	Totale verandering areaal plaat	
		Hoogte platen	Ja	Met behulp van inhoud plaat / areaal plaat	Gemiddelde verandering hoogte plaat (m.b.v. totale inhoud plaat/totaal areaal plaat)	
	Afname ondiep water areaal	Ondiep water areaal	Ja	Ondiep water areaal	Totale verandering ondiep water areaal	
	Afname komberging	Komberging	Ja	Met behulp van verschil HWL en LWL en bijbehorend volume	Totale verandering komberging (m.b.v. gemiddeld verschil HWL en LWL en bijbehorend volume)	
	Vrijgekomen sediment naar nevengeulen, kortsluitgeulen en platen	Vrijgekomen sediment	Nee			
<i>Huidig denkmodel</i>	Baggeren en storten in geulen	Baggeren	Ja	Baggerhoeveelheden	Totale baggerhoeveelheid in hoofdgeul	
<i>Nieuw denkmodel</i>		Storten	Ja	Stortheoeveelheden	Totale stortheoeveelheid in nevengeul	
	Storten in kortsluitgeul	Storten	Ja	Stortheoeveelheden	Totale stortheoeveelheid in kortsluitgeul	
	Maximale waarde baggeren en storten wel/niet overschreden		Nee *)	*) Hiervan kan wel een indicatie gegeven worden door het cellenconcept en een bijbehorende tijdschaal	Stortlimiet (en baggedimiet);	
	Stabiliteit systeem		Nee *)			

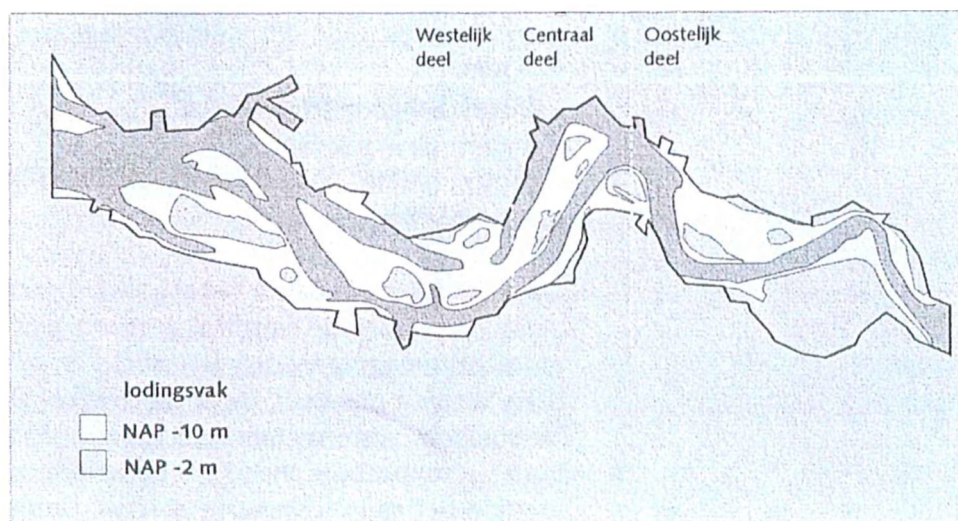
In de laatste kolom in de tabel wordt uitgelegd hoe de beschikbare gegevens kunnen worden gebruikt voor de toetsing. Voor het gebied waarvan de gegevens gebruikt worden totalen en gemiddelden gebruikt, omdat allereerst de gedetailleerde gegevens niet makkelijk toegankelijk zijn en daarnaast omdat verondersteld wordt dat gebruiken van hele gedetailleerde informatie geen grote meerwaarde heeft voor het kwalitatief voorspellen van de effecten in de Westerschelde.

Afbakening meetgegevens

Voor het zo goed mogelijk toetsen van de denkmodellen is het van belang dat er van de totale periode waarin de nodige gegevens gemeten zijn, gegevens gebruikt worden. Dit is de periode van voor de verdieping eerste verdieping tot na de laatste verdieping (1955-2001).

Het gebied waar de meetgegevens vandaan komen wordt echter wel afgebakend. In deze toetsing wordt een deelgebied van de Westerschelde gebruikt, omdat het nieuwe denkmodel de ontwikkeling van een afzonderlijke cel in de Westerschelde beschrijft.

De beschikbare meetgegevens van de monitoring van de Westerschelde zijn geclusterd in bepaalde gebieden: West, Centraal en Oost. Daarnaast zijn deze gegevens ook samengenomen voor de hele Westerschelde. In onderstaande figuur is deze indeling gegeven.



Indeling gegevens gebieden Westerschelde (Mol, 1997)

Wanneer deze kaart vergeleken wordt met de indeling van de Westerschelde in morfologische cellen (figuur 5.1) valt op dat het centrale deel van de Westerschelde ongeveer overeenkomt met macrocel 4. De meetgegevens van Centraal (vanaf nu 'Midden' genoemd) kunnen dus gebruikt worden voor toetsing.

Toetsing parameters en relaties

Allereerst kan het denkmodel worden getoetst door de ontwikkeling van elke parameter in het denkmodel in de tijd te onderzoeken. Daarnaast kan ook de relatie tussen de parameters onderzocht worden door te kijken hoe sterk de relatie is tussen twee parameters (met andere woorden: verandert de ene parameter heel sterk als de ander verandert) en door de onzekerheid in de relatie vast te stellen (met andere woorden: hoe groot is R^2 van de relatie).

Wanneer duidelijk is hoe goed de beschreven relaties zijn en in welke mate de parameters veranderen, kan geconcludeerd worden of het denkmodel goed genoeg is om als basis te dienen voor het opstellen van hypothesen over de ontwikkeling van de Westerschelde.

Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de combinatie van processen in de denkmodellen waarschijnlijk de belangrijkste ontwikkelingen weergeeft, maar dat dit niet zeker is. Wanneer andere processen een (grote) rol spelen zal dit door deze toetsing niet duidelijk worden.

Stappenplan:

1. Bepalen welke van de 3 scenario's van toepassing is.
2. Meetgegevens zoeken van 'Midden' bij de parameters uit de denkmodellen van de periode voor de eerste verdieping tot heden.
3. De gegevens van de parameters in aparte grafieken uitzetten in de tijd (Excel) en kijken of de verwachte ontwikkeling van de parameters daarmee aangetoond is voor zowel na de eerste verdieping als na de tweede verdieping.
4. Hoe groot is de verandering van de parameters?
5. Elke relatie uit het denkmodel in een grafiek uitzetten in de tijd (Excel) en kijken of de gelegde (kwantitatieve) relatie juist is voor zowel na de eerste verdieping als na de tweede verdieping.
6. Hoe sterk is de relatie en hoeveel onzekerheid zit erin?

Toetsing stabiliteit

De stabiliteit van het systeem wordt bekeken door middel van de verandering in de inhoud van geulen (hoofdgeul en/of nevengeul) in de tijd. Het systeem is in evenwicht als de inhoud van de hoofdgeul en de nevengeul niet meer verandert. De twee mogelijke evenwichten zijn: beide geulen zijn nog open, of alleen de hoofdgeul is nog open en de nevengeul is dichtgeslibd.

In dit plan wordt ervan uitgegaan dat de hoofdgeul en de nevengeul veranderen als gevolg van de verdieping en dus niet in hun oude evenwicht blijven.

Er kunnen op het moment van toetsen 2 situaties mogelijk zijn:

1. De geulinhoud verandert niet meer.
In deze situatie is het duidelijk of het systeem stabiel is en het meergeulensysteem behouden is of dat het systeem instabiel is en een ééngeulensysteem is geworden.
2. De geulinhoud verandert nog steeds.
In deze situatie is het (nog) niet duidelijk of het systeem stabiel is. Er kunnen dan twee dingen gedaan worden:
 - Wanneer er voldoende gegevens beschikbaar zijn en deze een duidelijke trend laten zien kan er een logaritmische regressielijn getrokken worden door deze punten. Deze lijn zou kunnen laten zien waar het systeem uiteindelijk naar toe gaat.
 - Wanneer er niet voldoende gegevens beschikbaar zijn of er is geen trend te ontdekken, dan zouden de resultaten van de stabiliteitsanalyse van het cellenconcept uitkomst kunnen bieden. De fasediagrammen laten namelijk zien dat de stabiele evenwichtsdieptes in geval van baggeren, storten of baggeren&storten niet veel afwijken van de evenwichtsdieptes in een systeem waarin geen ingreep plaatsvindt. De maat waarin de evenwichtsdieptes veranderd zijn, kan worden weergegeven in percentages van de oorspronkelijke dieptes. Deze percentages kunnen gebruikt worden bij het bekijken van de inhoud van de geuldelen. Wanneer de inhoud van de geul al ver afwijkt van de oorspronkelijke inhoud (percentage afwijking is groot), zou dat kunnen betekenen dat het systeem niet meer naar een meergeulensysteem wil gaan, maar wil degenereren naar een ééngeulensysteem.

Referentielijst

Liek, G.A., 2001

Monitoring van de effecten van de verruiming 48'-43'; beschrijving van de fysische toestand van de Westerschelde t/m 2000, rapport 5
Rapport RIKZ/2001.023, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee

Mol, G., A.M. van Berchum, G.M. Krijger, 1997

De toestand van de Westerschelde aan het begin van de verdieping 48'/43'; beschrijving van trends in de fysische, biologische en chemische toestand
Rapport RIKZ-97.049, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee

Wang, Z.B., J.C. Winterwerp, 2001

Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems
In Proceedings of the 2nd IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, September 10-14, 2001, Obihiro, Japan, pp.515-524.

Wang, Z.B., P. Thoolen, I. Tanczos, 2002

Onderbouwing van het cellenconcept Westerschelde als instrument voor beleid en beheer; toetsing aannames met SOBEK berekeningen
Rapport Z3325, WL delft hydraulics

Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuijper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen, Z.B. Wang, 2000

Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster Morfologie, rapportage Uitvoeringsfase
Rapport Z2878, WL delft hydraulics