



Drempels in de Westerschelde

natuur en mens samen aan het werk

Rapport RIKZ - 98.011



R

RIKZ



Drempels in de Westerschelde

30027

natuur en mens samen aan het werk

H. Verbeek

F.T.G. Tank (Universiteit Utrecht, thans Rijkswaterstaat,
directie Oost-Nederland)

M.D. Groenewoud (Technische Universiteit Delft,
thans Rijkswaterstaat, Bouwdienst)

Rapport RIKZ - 98.011

ISBN 90-369-3472-9

april 1998

75002

Samenvatting

In dit rapport worden de belangrijkste resultaten van het onderzoek naar drempels in de Westerschelde weergegeven. Drempels zijn in dit verband lokale ondiepten in een estuarium, die een obstakel vormen voor de scheepvaart. Doorgaans worden drempels door baggerwerk verdiept, waardoor er veranderingen in de morfologie optreden.

Het rapport bevat een beschrijving van het onderzoek, bestaande uit bureaustudie, veldonderzoek en numerieke simulatie. Naast de opzet en een beperkt overzicht van de resultaten van de verschillende onderdelen van de studie wordt er vooral ingegaan op de onderlinge samenhang ten aanzien van de morfodynamica van drempels in de Westerschelde. Op basis van de ontwikkelde kennis wordt een conceptueel morfodynamisch model gepresenteerd, waarmee de sturende invloed van het baggerwerk op de morfologische ontwikkeling beschreven wordt.

Het onderzoek heeft geleid tot een beter inzicht in de mechanismen en processen, die de vorming van drempels bepalen. De mechanismen leggen een empirische relatie tussen de waterbeweging en de morfologie. Voor de drempelvorming zijn van belang: de scheiding van eb- en vloed-stroombanen, de verdeling van het getijvolume over hoofd- en nevengeulen en de convergentie of divergentie van de stroombaan. De processen bepalen de vorm van de drempel via (rest)patronen in het sedimenttransport. Voor de drempelvorming zijn het sedimenttransport door onder- en oververzadiging, door secundaire stroming, door getij-asymmetrie en door getij-residuele stroming van belang.

Om het effect van baggerwerk op de morfologie te kunnen bepalen zijn verschillende alternatieven opgesteld, die onderzocht zijn op hun effecten op de aanzanding van de Drempel van Hansweert. De alternatieven verschillen onderling qua lokatie en frequentie van het baggerwerk. Uit de lijst met belovende alternatieven is een selectie gemaakt van alternatieven, welke geëvalueerd zijn met behulp van modelberekeningen. Hierbij is de beperking opgelegd dat de alternatieven binnen een tijdschaal van één jaar significante morfologische effecten moeten hebben op de aanzanding van de Drempel van Hansweert. Bij deze berekeningen zijn de effecten van het bagger- en stortwerk op de aanzanding van de drempel bepaald. Gekeken is of een reductie van de hoeveelheid baggerwerk mogelijk is.

Bij het vergelijken van de resultaten van de berekende alternatieven valt op dat de onderlinge verschillen niet erg groot zijn. De conclusie die hieruit volgt is dat de exacte plaats en tijd van het baggerwerk niet de omvang van het baggerwerk stuurt. Een opvallend resultaat is dat het verrichten van jaarlijks baggerwerk in plaats van maandelijks baggerwerk niet leidt tot extreme toename van het baggerwerk. Dit resultaat is van belang voor toekomstige beheersafspraken en geeft mogelijkheden voor een ecologisch herstel van de Westerschelde.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	5
Figuren en tabellen	9
1. Inleiding	11
1.1 Vraagstelling	11
1.2 Doelstelling en opzet van het onderzoek	12
1.3 Wat zijn drempels?	13
1.4 Afbakening en beperkingen	13
1.5 Opbouw van dit rapport	14
2. Morfodynamica van drempels	15
2.1 De morfologie van drempels in Westerschelde	15
2.2 Metingen in de Westerschelde	18
2.3 Morfodynamische processen op een drempel	19
2.3.1 Mechanismen	20
2.3.2 Processen	21
2.3.3 Koppeling tussen mechanismen en processen	23
3. Menselijke invloeden op drempels in de Westerschelde	25
3.1 Baggerwerken	25
3.2 Storten	26
3.3 Invloed baggerwerken op de drempels	26
3.3.1 Oostelijke drempels (Bath, Valkenisse en Hansweert)	26
3.3.2 Westelijke drempels (Baarland en Borssele)	28
3.4 Conceptueel morfodynamisch model	29
4. Simulatie van de morfodynamica van een drempel	31
4.1 Inleiding	31
4.2 Modelopzet	32
4.2.1 Waterbeweging	32
4.2.2 Sedimenttransport	33
4.2.3 Bodemontwikkeling	33
4.3 Simulatie autonome ontwikkeling	34
4.3.1 Autonome ontwikkeling: metingen	34
4.3.2 Autonome ontwikkeling: berekeningen	35
4.4 Simulatie huidige baggerstrategie	37
4.4.1 Opzet baggerwerk in de simulatie	37
4.4.2 Resultaten simulatie	39
5. Alternatieven voor het baggerwerk op een drempel	41
5.1 Inleiding	41
5.2 Alternatieven baggerwerkzaamheden	41
5.2.1 Variatie frequentie uitvoering baggerwerk	41
5.2.2 Beïnvloeding lokale debietverdeling	41
5.2.3 Vergroting transportafstand	42
5.2.4 Grootschalige kombergingsvergroting	42
5.2.5 Baggeren midden in de vaargeul	42
5.2.6 Zandwinning	42

5.3 Opzet berekeningen	43
5.4 Resultaten berekeningen	45
6. Conclusies over drempels onder invloed van baggerwerk	49
6.1 De morfodynamica van de Drempel van Hansweert	49
6.2 Alternatieven voor het baggerwerk	49
6.3 Alternatieven voor beheer	50
6.4 Mogelijkheden voor nader onderzoek	51
7. Gerealiseerde producten binnen het Drempelonderzoek	53
8. Literatuur	57

Figuren en tabellen

Figuur 1.1	Een langspiegel van de Drempel van Hansweert	13
Figuur 2.1	De Westerschelde met de ligging van de belangrijkste drempels	15
Figuur 2.2	Schema van een ideaal systeem van ebgeul en vloedscharen (naar Van Veen, 1950)	15
Figuur 2.3	Geografische ligging van de Drempel van Hansweert	16
Figuur 2.4	Dwarsdoorsneden over de Drempel van Hansweert (ligging raaien, zie figuur 2.3)	16
Figuur 2.5	Geografische ligging van de Drempel van Borssele	17
Figuur 2.6	Relatie tussen geuldoorsnede en getijvolume in de Westerschelde (naar Blik & Ruijter, 1994)	17
Figuur 2.7	Schematische weergave van de morfodynamische processen	18
Figuur 2.8	Lokatie van de meetraaien op de Drempel van Hansweert	18
Figuur 2.9	Onderscheid tussen proces en mechanisme	19
Figuur 2.10	Overzicht van de mechanismen en processen en hun invloed op de drempel	20
Figuur 2.11	Dwarsdoorsnede van de drempel met de secundaire stroming in meerdere cellen (naar Jansen, 1998)	22
Figuur 3.1	Jaarlijkse baggergegevens en minimale drempeldiepte op: (a) Bath, (b) Valkenisse, (c) Hansweert en (d) Borssele (naar Van den Berg <i>et al.</i> , 1996 en Mol <i>et al.</i> , 1997)	25
Figuur 3.2	Botsend ebgeul-type (Drempel van Hansweert, 1955)	27
Figuur 3.3	Ontwijkend ebgeul-type (Drempel van Hansweert, 1994)	27
Figuur 3.4	Verloop van getijvolume en geuloppervlak voor het Zuidergat en de Schaar van Waarde	27
Figuur 3.5	Botsend ebgeul-type (Drempel van Borssele, 1955)	28
Figuur 3.6	Parellele geul-type (Drempel van Borssele, 1994)	28
Figuur 3.7	Verloop van getijvolume en geuloppervlak voor de Honte en de Schaar van Spijkerplaat	28
Figuur 4.1	Rooster van het DELFT2D-MOR model rond de Drempel van Hansweert	32
Figuur 4.2	Gemeten en berekende waterstand en debiet bij de Drempel van Hansweert	32
Figuur 4.3	Residuele sedimenttransporten bij het morfologisch getij	33
Figuur 4.4	Lokatie van het drempelvak (vak 1 en 2) met diepte rond de Drempel (in m NAP)	34
Figuur 4.5	Bodemligging op basis van lodingen van het baggervak	35
Figuur 4.6	Erosie- en sedimentatiepatronen op de Drempel van Hansweert bij de autonome ontwikkeling met baggervak aangegeven (in m, erosie positief)	36
Figuur 4.7	Lokatie baggervak gebaseerd op gegevens 1991-1994. (diepte in m)	38

Figuur 4.8	Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar huidige baggerstrategie; met drempelvak en baggervak aangegeven (verschillen in m, erosie positief).	38
Figuur 4.9	Bodemontwikkeling in baggervak en drempelvak (vak 1 en 2) baggerwerk in de huidige situatie	39
Figuur 4.10	Bodemontwikkeling in baggervak en drempelvak (vak 1 en 2) na correctie voor baggerwerk	40
Figuur 5.1	Lokatie van de (1) bagger- en (2) stortgebieden bij de simulaties	43
Figuur 5.2	Vergelijking tussen verschillende alternatieven bij maandelijks bagger/stortwerk	45
Figuur 5.3	Vergelijking tussen alternatieven bij maandelijks en jaarlijks bagger/stortwerk	46
Figuur 5.4	Omvang van het baggerwerk als enkel de vaargeul gebaggerd wordt	47

Tabellen

Tabel 5.1	Overzicht van de berekeningen met DELFT2D-MOR	43
-----------	---	----

1. Inleiding

1.1 Vraagstelling

De laatste jaren is binnen het project OOSTWEST veel onderzoek in de Westerschelde uitgevoerd. Dit onderzoek heeft geleid tot een beter inzicht in het fysisch en ecologisch functioneren van het estuarium. De Westerschelde is een uniek estuarium in noordwest Europa met een hoge dynamiek en grote estuariene soortenrijkdom. Toch staat het gebied onder druk door de vele menselijke ingrepen, zoals inpolderingen, havenuitbreidingen en verdiepingen van de scheepvaartroute. In het eindrapport OOSTWEST (Vroon *et al.*, 1997) wordt het effect van de veranderingen verwoord met:

Door gebrek aan ruimte en door de stroomlijning van het estuarium is de mogelijkheid tot slik- en schorvorming beperkt. Hierdoor is in het estuarium nauwelijks nog jong schor aanwezig en schorren in de mariene zone ontbreken vrijwel. Hiermee is veel natuurlijk biotoop voor kustbroedvogels verloren gegaan. Door de morfologische "verstarring" is een blijvende vermindering ontstaan van het ondiepwater areaal. Door het huidige vaarwegbeheer zal dit zich nauwelijks herstellen. De verminderde dynamiek heeft in combinatie met storten van sediment gezorgd voor een groei van de platen, waardoor verlanding optreedt. De laaggelegen voedselrijke zones zijn gedeeltelijk verdwenen en vervangen door voedselrijke gebieden hoog op de platen. Geconcludeerd wordt dat met name in het oostelijk deel de systeemkenmerken natuurlijkheid, zelfregulerend vermogen en compleetheid sterk onder druk staan.

Tijdens het project OOSTWEST is de bijzondere rol van drempels in het morfologisch systeem van de Westerschelde al onderkend. Drempels zijn in dit verband de lokale ondiepten in de vaarweg, welke een belemmering vormen voor de scheepvaart. In de Pilotstudie Oostwest (Pieters *et al.*, 1991) wordt gesteld dat het baggerwerk een negatieve invloed heeft op de fysische structuur van het Schelde estuarium en op het ecologisch functioneren van het Schelde estuarium. Er is sprake van een snelle retourstroming van zand tussen stort- en baggerlokatie, met als effecten: een tijdelijk verhoogde microdynamiek, een vergroting/-verhoging van nabij gelegen plaatgebieden en een lokale, tijdelijke verhoging van de troebelheid. In de Pilotstudie worden al adviezen gegeven om de hoeveelheid baggerwerk (en de daarmee samenhangende negatieve effecten) te minimaliseren.

Naar aanleiding van de Pilotstudie Oostwest is door de directie Zeeland een eerste verkenning van de drempels in de Westerschelde opgezet. Deze verkenning (Blik en Ruijter, 1994) gaf aan dat er weinig bekend is over het functioneren van drempels in estuariene systemen. Verder zijn er weinig metingen ter plaatse van drempels uitgevoerd in verband met de lokaal moeilijk definieerbare geul. Dit probleem was de aanleiding om het specifieke drempelonderzoek op te zetten. Het drempelonderzoek moest vooral een antwoord geven op de vraag: hoe

kan de negatieve invloed van het baggerwerk op het estuarium verminderd worden? Bij de definiëring van het drempelonderzoek was de centrale vraag:

Hoe kan de hoeveelheid baggerwerk op drempels in de Westerschelde structureel verminderd worden?

De basisveronderstelling hierbij is dat "hoe meer zand er door baggeren en storten verplaatst wordt, des te groter de invloed van het baggerwerk op het estuarium is". De beantwoording van de gestelde vraag moet plaatsvinden door inzicht te krijgen in de aanzandingsprocessen, op basis waarvan maatregelen opgesteld kunnen worden om het baggerbezwaar te verminderen.

1.2 Doelstelling en opzet van het onderzoek

De doelstelling van het drempelonderzoek is:

Het verkrijgen van inzicht in de processen die de geometrie van een drempel bepalen en zodanig dat met de verkregen kennis de gevolgen voor beheersalternatieven voldoende nauwkeurig afgeschat kunnen worden en nieuwe beheersalternatieven kunnen worden gegenereerd.

Op basis van deze doelstelling is begin 1995 een opzet gemaakt voor het drempelonderzoek. Enerzijds zal er worden gezocht naar beheersalternatieven om de negatieve invloed van het baggerwerk te minimaliseren. Anderzijds zal er zoveel mogelijk kennis worden verzameld over het functioneren van drempels. Dat is nodig om het effect van ingrepen in het systeem op de aanzanding van drempels te kunnen schatten. Dit heeft geleid tot een opzet met drie hoofdbestanddelen, namelijk: (1) bureaustudie, (2) veldonderzoek en (3) numeriek modelonderzoek. Bij de uitvoering van het onderzoek is er vooral gekeken naar het functioneren van de Drempel van Hansweert. Deze drempel vormt het grootste obstakel in de Westerschelde, zo'n 30% van het baggerwerk vindt hier plaats.

(1) De bureaustudie bestaat uit een verkenning van drempels in de Westerschelde in samenhang met een uitgebreide literatuurstudie naar het concept van drempels in estuariene systemen (Tank, 1995). Ter vergelijking is er gekeken naar "crossings" in riviersystemen, waar beduidend meer onderzoek naar gedaan is (Tank, 1996^a). Tevens is er een historisch morfologische reconstructie gemaakt van de drempels in de Westerschelde in combinatie met een parameterisatie van de geulen in de Westerschelde (Tank, 1996^b). Op basis van de bureaustudies zijn hypothesen ten aanzien van het morfodynamisch gedrag van estuariene drempels geformuleerd.

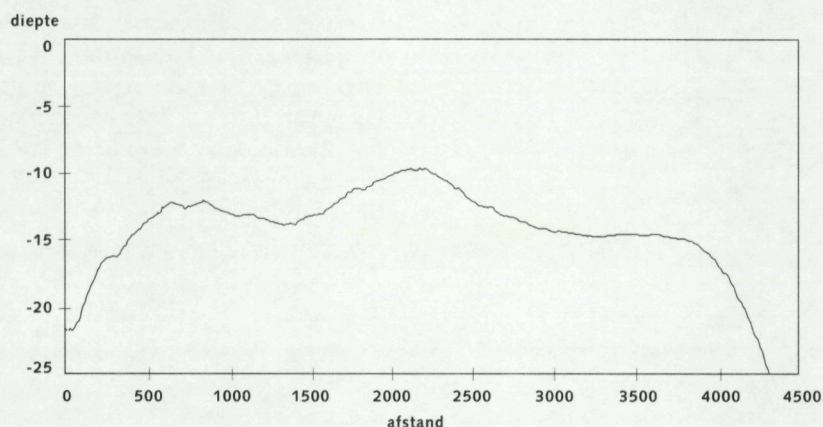
(2) Het veldonderzoek heeft zich geconcentreerd rond de Drempel van Hansweert. In het najaar van 1995 en het voorjaar van 1996 zijn er waterbewegings-, sedimenttransport- en morfologische metingen uitgevoerd (zie hoofdstuk 7: producten Meetdienst Zeeland, 1995/1996). Deze meetcampagne is nader geanalyseerd en gebruikt om de hypothesen omtrent het morfodynamisch gedrag van drempels te verifiëren (Tank, 1997^a, 1997^b, 1997^c). Op basis van deze verificatie is het conceptueel model van het morfodynamisch gedrag van drempels vastgesteld (Tank, 1997^d, Wouters, 1997).

(3) Het numeriek modelonderzoek is gebruikt om op basis van de kennis uit de bureaustudie en het veldonderzoek alternatieven voor de uitvoering van het baggerwerk te kunnen evalueren. Eerst is een model van de Drempel van Hansweert gebouwd en geverifieerd aan de hand van het veldonderzoek (Groenewoud, 1997). Daarna zijn voor verschillende baggeralternatieven simulaties uitgevoerd. Als resultaat zijn de aanzandingssnelheden op de drempel bepaald (Groenewoud & Tank, 1997). Tot slot is gekeken naar de omvang van beperkt baggerwerk in de vaargeul met een vaste breedte en gedefinieerde bodemligging (Groenewoud, 1998)

1.3 Wat zijn drempels?

Drempels zijn natuurlijke, door de stroming zelf veroorzaakte, lokale ondiepten van los sediment in estuaria en getijdenbekkens. De naam wordt ontleend aan de scheepvaart, omdat de ondiepten in de vaargeul een belemmering voor de doorvaart vormen. Als voorbeeld wordt in figuur 1.1 een langsprofiel van de vaargeul over de Drempel van Hansweert gegeven, waaruit de enorme dieptevariatie blijkt.

Figuur 1.1
Een langsprofiel van de Drempel van Hansweert.



Deze obstakels in de vaargeul worden doorgaans door baggeren verdiept. Drempels komen voor in rechte stukken geulen tussen twee bochten of op de overgang tussen twee geulen, zoals tussen een hoofd- en een nevengeul. Deze drempels in estuariene geulen zijn vergelijkbaar met "crossings" in rivieren, met het verschil dat in estuaria een bidirectionele stroming bepalend is voor de vorm van de drempels.

1.4 Afbakening en beperkingen

Bij de studie naar drempels in de Westerschelde is voornamelijk gekeken naar de Drempel van Hansweert. De keuze voor deze drempel is ingegeven door het feit dat op deze drempel zo'n 30% van het baggerwerk in de Westerschelde plaatsvindt en dat de gevolgen hiervan op de morfologie duidelijk zichtbaar zijn over de periode 1950-1995. De morfodynamica van de Drempel van Hansweert is vergelijkbaar met de overige drempels in het oostelijk deel van de Westerschelde. De westelijke drempels zijn niet in detail beschouwd, omdat het baggerwerk hier minder invloed op de morfologie heeft. Voorts is met name naar het "huidige" baggerwerk gekeken, waarmee het baggerwerk in de periode 1985 - 1996 bedoeld is. De 48'/43'-verdieping van de Westerschelde is dus niet meegenomen bij deze studie.

Voor de berekening van alternatieven voor het baggerwerk bij de Drempel van Hansweert is gebruik gemaakt van een numeriek model, waarmee alleen korte termijn veranderingen (tot 1 jaar) berekend zijn. Het gebruikte model is een procesmodel, waarbij een expliciete koppeling gemaakt wordt tussen waterbeweging, sedimenttransport en bodemverandering en waarbij de rekentijdstep veel kleiner is dan de getijperiode. Effecten op de langere termijn of op de schaal van het estuarium zijn niet berekend en deze effecten worden dan ook buiten beschouwing gelaten.

1.5 Opbouw van dit rapport

In dit rapport wordt de samenhang tussen de drie hoofdbestanden van het onderzoek gepresenteerd. De losse onderdelen zijn slechts beperkt als zodanig terug te vinden. Eerst wordt op basis van de fenomenologische kennis een morfodynamische beschrijving van drempels in de Westerschelde geschetst (hoofdstuk 2). Aangezien de invloed van het baggerwerk op het gedrag van drempels zeer groot is, wordt dit apart behandeld (hoofdstuk 3). Vervolgens wordt aangegeven op welke wijze de morfodynamica van drempels met numeriek modelonderzoek beschreven kan worden (hoofdstuk 4). De lijst met mogelijke alternatieven voor het baggerwerk wordt gepresenteerd in hoofdstuk 5, waarbij ten aanzien van een selectie het effect op de aanzanding van de drempel berekend is. Tot slot worden enige conclusies ten aanzien van het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde onder invloed van bepaald baggerwerk gepresenteerd (hoofdstuk 6). Ter afronding wordt een overzicht van de (deel)producten van het drempelonderzoek (hoofdstuk 7) en de referenties (hoofdstuk 8) gegeven.

2. Morfodynamica van drempels

2.1 De morfologie van drempels in Westerschelde

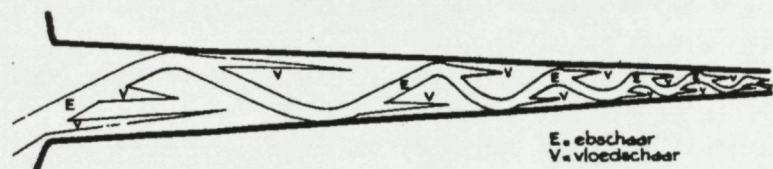
De Westerschelde is een trechtervormig estuarium met een meanderende hoofdgeul. Deze hoofdgeul is over het algemeen ebgedomineerd en bestaat uit een aantal aaneengesloten ebscharen (figuur 2.1). Van de hoofdgeul takken regelmatig nevengeulen af die in stroomopwaartse richting in omvang afnemen en doodlopen in een komgebied, de zogenaamde vloedscharen.

Figuur 2.1
De Westerschelde met de ligging van de belangrijkste drempels.



Aan de benedenstroomse rand van het Westerschelde estuarium is er sprake van een meergeulenstelsel. Stroomopwaarts neemt het aantal hoofdgeulen af van drie in de monding tot één bovenstrooms van Hansweert. Het patroon van de hoofdgeul van de Westerschelde met zijn aftakkende nevengeulen komt overeen met een ideaal systeem van een egeul met vloedscharen (figuur 2.2).

Figuur 2.2
Schema van een ideaal systeem van egeul en vloedscharen (naar Van Veen, 1950).

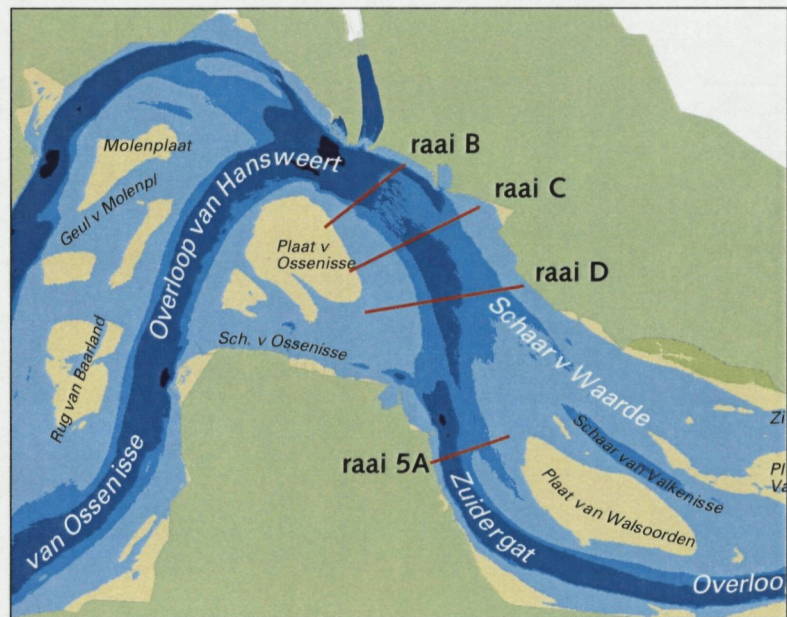


Het sediment in de Westerschelde is zandig en heeft een mediane korrelgrootte van 150 - 250 mm en is goed gesorteerd (Storm, 1996). Naar het westen toe wordt het sediment over het algemeen grover. Het percentage slib in de geulen is klein (5%) waardoor de grootschalige morfologie van het estuarium door het transport van

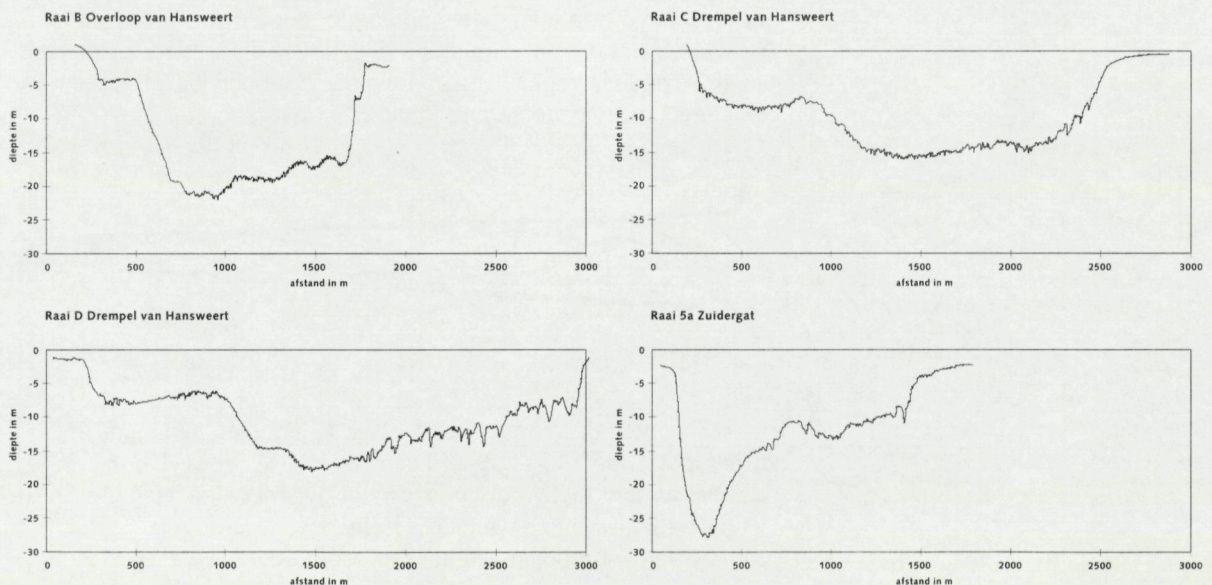
zand wordt bepaald. Het Westerschelde estuarium is een hoog-dynamisch systeem, met grote water- en sedimentverplaatsingen.

Een kaart met de diepteligging van de bodem van de Drempel van Hansweert, in het oostelijk deel van de Westerschelde, verduidelijkt veel over de morfologie van drempels in estuaria (figuur 2.3). Ter plaatse van de Drempel van Hansweert bestaat het Westerscheldesysteem uit één meanderende hoofdgeul waarvan nevengeulen/vloedscharen aftakken. Het eerste dat opvalt is dat ter plekke van de drempel de hoofdgeul relatief breed en ondiep is. Verder komt de drempel voor op de relatief rechte overgang tussen twee meanderbochten van de hoofdgeul. Bij nadere beschouwing blijkt dat deze meanderbochten niet zo goed op elkaar aansluiten: de geul uit het noorden loopt als het ware langs die uit het zuiden. Het lijkt erop alsof beide geulen elkaar willen ontwijken. Aan de hand van enkele dwarsprofielen van een drempel wordt dit verduidelijkt (figuur 2.4).

Figuur 2.3
Geografische ligging van de Drempel van Hansweert.



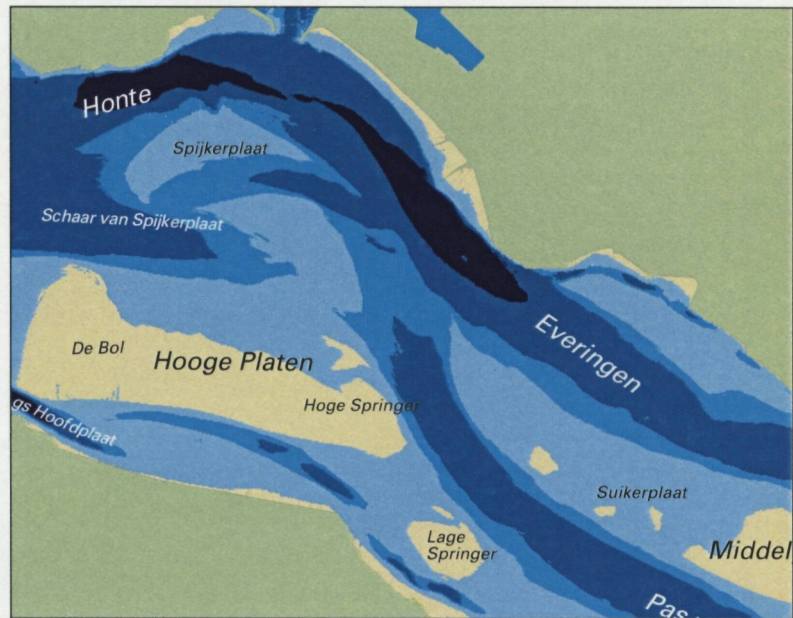
Figuur 2.4
Dwarsdoorsneden over de Drempel van Hansweert (ligging raaien, zie figuur 2.3).



Verder takt in de directe nabijheid van de drempel een grote nevengeul van de hoofdgeul af. Deze nevengeul, de Schaar van Waarde, ligt in het verlengde van de hoofdgeul uit het westen. Een kleinere nevengeul, de Schaar van Ossensisse, takt in het zuidelijk deel van het drempelgebied af.

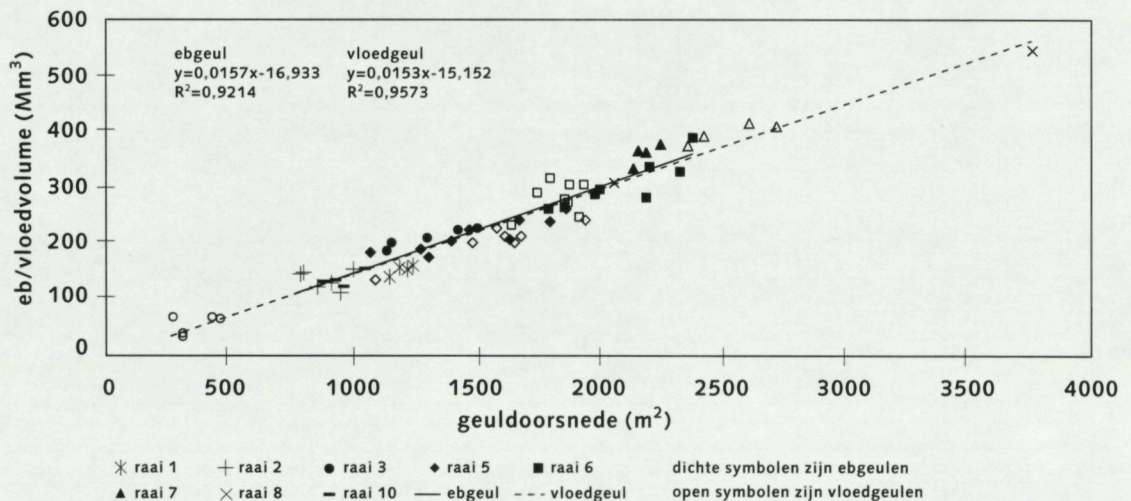
In het westelijk deel van de Westerschelde, waar het systeem bestaat uit twee hoofdgeulen, komen in de vaargeul ook drempels voor. De morfologie van deze drempels lijkt gedeeltelijk op die van de drempels in het oosten van de Westerschelde. Als voorbeeld is de Drempel van Borssele (figuur 2.5) genomen. Deze drempel ligt aan het einde van een ebgeul (Pas van Terneuzen) op de plaats waar andere geulen aftakken (Everingen, Schaar van de Spijkerplaat). Het grote verschil met de oostelijke drempels is dat de westelijke drempels op de grens tussen twee hoofdgeulsystemen voorkomen, die onderling weinig water uitwisselen.

Figuur 2.5
Geografische ligging van de Drempel van Borssele



Figuur 2.6
Relatie tussen geuldoorsnede en getijvolume in de Westerschelde (naar Blik & Ruijter, 1994).

Door Blik en Ruijter (1994) is met behulp van debietmetingen in de Westerschelde, die daar sinds de jaren '30 in een tiental raaien worden verricht, empirische relaties tussen het eb- en vloedvolume en het oppervlak van de geuldoorsnede in de geulen aangetoond (figuur 2.6). De correlatiecoëfficiënt van deze empirische relaties is hoog.

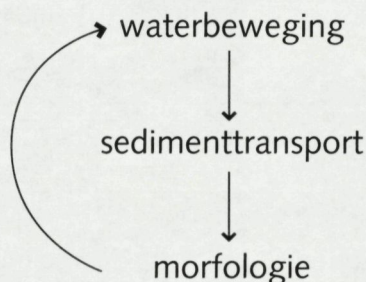


De gebaggerde geuldelen wijken hiervan echter af. Door de baggerwerken zijn de geuldoorsnedes ter hoogte van de drempel uit evenwicht met het getijvolume dat er doorheen stroomt: het doorstroomprofiel van de drempels is te groot voor het getijvolume. Kortom: ze zijn "te ruim". Dit heeft gevolgen voor de waterbeweging en daarmee ook voor het sedimenttransport op de drempels. Bij de drempels in de Westerschelde is de afwijking zo'n 10 - 20 % ten opzichte van het evenwichtoppervlak (Gerritsen & de Jong, 1983; Storm, 1996). Bij de vergelijking tussen geuldoorsnedes in de bochten van de hoofdgeul met de geuldoorsnedes ter hoogte van de drempel moet wel rekening gehouden worden met de dominantie van het getij (Van Kleef, 1994). Ter hoogte van de drempel maken de ebstroom en de vloedstroom gebruik van dezelfde geuldoorsnede.

2.2 Metingen in de Westerschelde

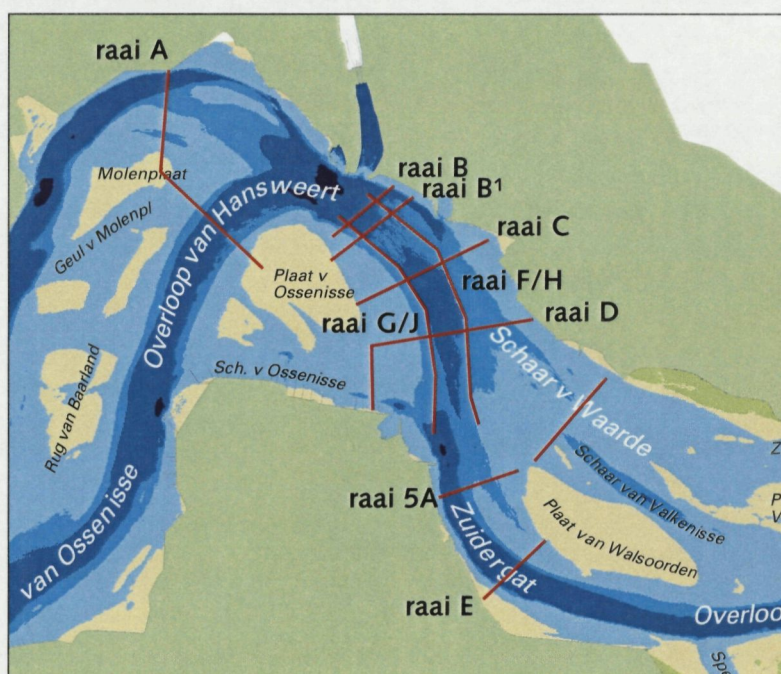
Doel van het drempelonderzoek is het verzamelen van kennis over de morfodynamische processen (zie figuur 2.7) die op drempels spelen. Daartoe zijn er metingen rond de Drempel van Hansweert uitgevoerd en geanalyseerd (zie hoofdstuk 7, producten Meetdienst Zeeland, 1995/1996 en Tank, 1997^a, 1997^b, 1997^c).

Figuur 2.7
Schematische weergave van de morfodynamische processen



Op de Drempel van Hansweert zijn metingen van de stroomsnelheid, het zandtransport en de bodemligging uitgevoerd (Sisternans, 1995). Het merendeel van de metingen vonden plaats tijdens twee meetcampagnes in het najaar van 1995 en het voorjaar van 1996 (Louws, 1995, 1996). De metingen van de stroomsnelheid en de

Figuur 2.8
Lokatie van de meetraaien op de Drempel van Hansweert



Voorwoord

Het RIKZ heeft in opdracht van de directie Zeeland uitgebreid onderzoek gedaan naar het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde in relatie tot het uitgevoerde baggerwerk. Dit onderzoek bestaat uit drie onderdelen:

1. literatuurstudie en bepaling van een historisch morfologische reconstructie van de drempels in de Westerschelde;
2. procesonderzoek naar het morfologisch gedrag van de Drempel van Hansweert aan de hand van uitgebreide metingen;
3. numeriek modelonderzoek naar de invloed van baggerwerk op de Drempel van Hansweert.

Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met de Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, vakgroep Fysische Geografie (door drs. F.T.G. Tank, onder begeleiding van dr. J.H. van den Berg) en de Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, vakgroep Kustwaterbouw (eerst door ir. P.G.J. Siermans en later door ir. M.D. Groenewoud, onder begeleiding van dr.ir. J. van de Graaff en dr.ir. J.A. Roelvink). De projectleiding was eerst in handen van de directie Zeeland (tot begin 1996, door drs. A.W. van Kleef en ir. P.G.J. Siermans) en later in handen van het Rijksinstituut voor Kust en Zee (door drs. H. Verbeek).

Met name de uitvoering van de uitgebreide meetcampagne in 1995 en 1996 rond de Drempel van Hansweert is van grote waarde geweest voor de beeldvorming. Binnen het hier gepresenteerde onderzoek is slechts een deel van het beschikbare materiaal uitgewerkt en gebruikt. Ook in de nabije toekomst zal deze unieke dataset gebruikt worden voor nadere studie. Aan de opzet en uitvoering van de meetcampagne is een grote bijdrage geleverd door medewerkers van de meetdienst van directie Zeeland onder leiding van D. Louws.

Aan dit onderzoek is bijgedragen door verschillende medewerkers van het RIKZ in Middelburg en tijdelijke medewerkers van elders. Hierbij worden C. van der Male, ir. J.H. Vroon, ir. A. Langerak, drs. C. Storm (allen RIKZ), drs. S.W.E. Huijs, drs. M.J. van der Slikke (Universiteit Utrecht), C.A.H. Wouters (stagiaire Technische Universiteit Delft), G. Dam (stagiaire Universiteit Twente) en ir. M.H.P. Jansen (ingenieursbureau Svasek b.v.) met name genoemd.

zandtransporten vonden plaats in een tiental dwars- en langsraaien in het drempelgebied (figuur 2.8). In de meetperiode in 1995 zijn frequent opnames van de bodemligging gemaakt van het gebied rond de Drempel van Hansweert. De bodemligging van het drempelgebied is speciaal gedurende de maand oktober 1995 vijf maal gemeten (eens per week). Gedurende deze meetcampagne vonden, in overleg met de Vlaamse overheid, geen baggerwerken op de Drempel van Hansweert plaats. Op deze wijze kon een indruk van de autonome ontwikkeling van de drempel verkregen worden (Tank, 1997^c). Buiten de meetcampagne in 1995 zijn 3-maandelijkse lodingen uitgevoerd.

Bij de metingen rond de Drempel van Hansweert is gebruik gemaakt van relatief nieuwe technieken:

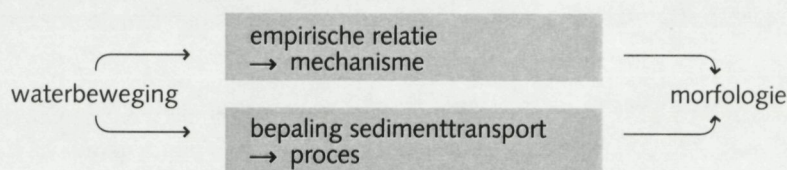
- Voor de stroommetingen is gebruik gemaakt van een ADCP (= acoustic doppler current profiler), waarmee de mogelijkheid bestaat om binnen een korte tijd in een hele dwarsraai stroomvertikalen te bepalen met één meetvaartuig
- Voor het opnemen van de beddingsvormen is gebruik gemaakt van een multibeam echolood
- Voor een continue registratie van de oppervlaktestroming is gebruik gemaakt van het HF-radar-meetsysteem (Dam, 1997)

2.3 Morfodynamische processen op een drempel

De analyse van de metingen heeft veel kennis opgeleverd over het morfodynamisch gedrag van de drempels in de Westerschelde. Hieronder wordt (in een modelvorm) uitgelegd hoe een drempel morfologisch gezien werkt. Dit conceptueel morfodynamisch model van drempels in de Westerschelde bestaat uit twee onderdelen: mechanismen en processen. De mechanismen zijn gedefinieerd als een rechtstreeks (empirisch) verband tussen waterbeweging en morfologie, dat over een langere periode (bijv. een jaar) een geldigheid vertoont. De processen zijn gedefinieerd als een verband dat direct gekoppeld is aan tijdsafhankelijke verschillen in het sedimenttransport (Tank, 1997^d). Hierdoor wordt er bij mechanismen van een semi-stationaire beschrijving van de geometrie (geulvorm, -diepte en -doorsnede) in relatie met een dominant getijvolume uitgegaan. De processen worden gezien als een tijdsafhankelijke beschrijving tussen de waterbeweging en de morfologie, via het sedimenttransport (figuur 2.9).

Figuur 2.9

Onderscheid tussen proces en mechanisme



Op basis van deze indeling is een mechanisme in de tijd dominant over een proces. De processen houden echter de mechanismen in stand. Eigenlijk is een mechanisme een benadering van één of meerdere, niet begrepen of niet onderscheidbare processen. In figuur 2.10 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste mechanismen en processen, welke van belang zijn bij de vorming en handhaving van drempels in een estuarium.

2.3.1 Mechanismen

De drie hoofdmechanismen, zoals genoemd in figuur 2.10, beschrijven de invloed van de waterbeweging op de morfologie. Met de morfologie wordt hier de vorm en het oppervlak van de geuldoorsnede van de drempel bedoeld. Bij een drempel is immers de diepte en de breedte van de vaargeul van belang voor de scheepvaart.

Figuur 2.10

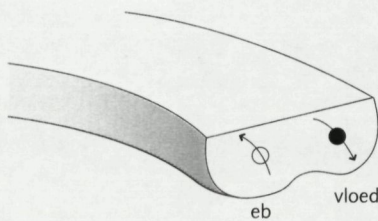
Overzicht van de mechanismen en processen en hun invloed op de drempel

MECHANISMEN waterbeweging → morfologie

- ruimtelijke scheiding eb- en vloedstroombaan op de drempel
 - toename scheiding: groter geuloppervlak, bredere geul
 - afname scheiding: kleiner geuloppervlak, smallere geul
- verdeling getijvolume over hoofd- en nevengeulen
 - samenvloeiing: groter geuloppervlak
 - splitsing: kleiner geuloppervlak
- convergentie/divergentie in de stroombanen rond de drempel
 - divergentie: bredere en ondiepere geul
 - convergentie: smallere/depere geul, kleiner geuloppervlak

PROCESSEN waterbeweging → sedimenttransport → morfologie

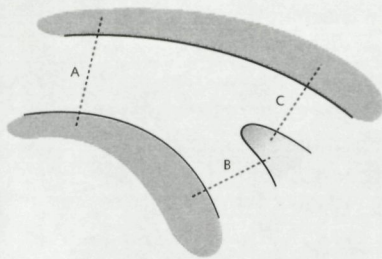
- residueel transport door onder- en oververzadiging
 - momentaan -> erosie en sedimentatiegebieden
 - door verdieping drempel -> aanzanding op de drempel
- residueel transport door secundaire stroming
 - getijfase -> herverdeling sediment in de dwarsdoorsnede (van buitenbocht naar binnenbocht)
 - over jaren -> uitbocht van het geuldeel, versterkingmechanisme "ruimtelijke scheiding"
- transport door getij-assymetrie
 - per getijperiode -> verschillen in lengterichting over drempel
- transport door getij-residuele stroming
 - DT/ST-periode -> verschillen in dwarsrichting over drempel



De ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen

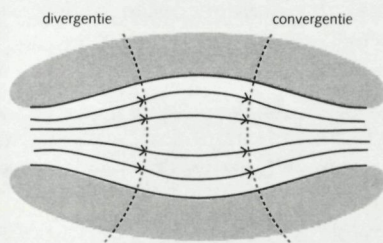
Het mechanisme *de ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen* beïnvloedt de vorm en het oppervlak van de geuldoorsnede. De ruimtelijke scheiding is de afstand tussen de hoofdstroombanen van de eb- en vloedstroom. Bij toename van de ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen zal de geul daardoor breder en ondieper worden. De ruimtelijke scheiding is een gevolg van de verschillende uitbocht van de eb- en vloeddelen in de geulen. Een gevolg van de toename van de ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen is de vergroting van het geuldwarsdoorsnede door de afname van de efficiëntie van het gebruik van het geuloppervlak. De dominantie van een geul neemt dan toe (Van Kleef, 1994). Bij lagere dominantie, wanneer eb en vloed grotendeels dezelfde delen van de geul gebruiken, is een kleiner geuldoorsnede voldoende, maar wel met een relatief smal en diep profiel.

Het mechanisme *de verdeling van het getijvolume* tussen de hoofd- en nevengeulen beïnvloedt de grootte van de geuldoorsnede van een drempel. Een groter getijvolume leidt tot een groter geuloppervlak. Het verband tussen getijvolume en geuloppervlak in de Westerschelde is sterk, zoals onder andere door Blik en Ruijter (1994) is aangetoond.



De verdeling van het getijvolume

Als de stroming voor een drempel deels aftakt via een nevengeul, wordt het getijvolume over beide geulen verdeeld. Het getijvolume over de drempel is kleiner dan in de hoofdgeul voor de splitsing en hierdoor is het geuloppervlak op de drempel kleiner dan voor de splitsing. Omgekeerd zal een samenvloeiing van getijvolumes uit twee geulen voor een drempel het getijvolume over de drempel doen toenemen. Hierdoor zal het geuloppervlak van de drempel groot zijn. Deze beschouwing dient per getijfase beschouwd worden, want een splitsing voor de drempel tijdens de ene getijfase is een samenvloeiing voorbij de drempel tijdens de andere getijfase.

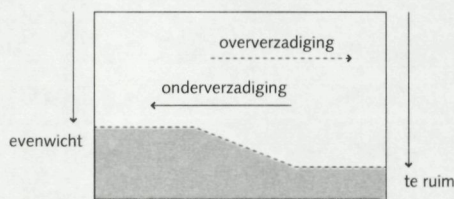


De convergentie/divergentie in de stroombanen rond de drempel

Het mechanisme *de convergentie/divergentie in de stroombanen rond de drempel* beïnvloedt de vorm van het geuloppervlak als volgt: divergerende stroming leidt tot een relatief brede en ondiepe geul en convergerende stroming leidt omgekeerd tot een relatief smalle en diepe geul. Divergerende en convergerende stroming heeft ook invloed op de grootte van de geuldoorsnede. Immers divergentie of convergentie heeft een verandering van de snelheidsverdeling van de stroming over de vertikaal en daardoor van het zandtransport tot gevolg. Bij een veranderende snelheidsverdeling over de vertikaal hoort een andere geuldoorsnede dan in een situatie met een snelheidsverdeling die constant in de tijd is.

2.3.2 Processen

De processen die een rol spelen bij het morfodynamisch gedrag van de drempels werken op verschillende ruimte- en tijdschalen. Kenmerkend is dat als de tijdschaal toeneemt ook de ruimteschaal toeneemt. De processen vormen de schakel tussen de waterbeweging en de morfologie in de drie mechanismen, werkend via patronen in het sedimenttransport. Hieronder worden de processen uit figuur 2.10 beschreven, waarbij vaak het residuele effect over een getijperiode beschreven wordt.



Onder- en oververzadiging

Residueel zandtransport door *onder- en oververzadiging* is één van de belangrijkste processen bij morfologische veranderingen. Het is een proces dat zich afspeelt op verschillende ruimte- en tijdschalen: ruimteschalen van meters tot geulsecties en tijdschalen van seconden tot getijperiode. Veranderingen van de stroomsnelheid leiden tot veranderingen in de concentratievertikaal en dat leidt tot erosie of sedimentatie. Afname van de stroomsnelheid in de tijd leidt tot oververzadiging; toename van de stroomsnelheid leidt tot onderverzadiging. Als de morfologie aanzienlijk uit evenwicht is gezien de heersende waterbeweging kunnen over een getijperiode ruimtelijk consistente patronen in residuele zandtransporten optreden. Hierdoor vinden ruimtelijke patronen in netto erosie en sedimentatie plaats. De drempels in de Westerschelde worden door baggeren verdiept en daardoor uit evenwicht gebracht: ze zijn "te ruim". De mate en ruimtelijke schaal van de verruiming zijn zodanig dat ten gevolge hiervan een reactie plaatsvindt in de vorm van een groot netto zandtransport naar de verdiepte drempel toe mede door ruimtelijke onder- en oververzadiging. Omdat op de drempels vrijwel continu wordt gebaggerd heeft de verruiming een permanent karakter en domineert het residuele zandtransport.



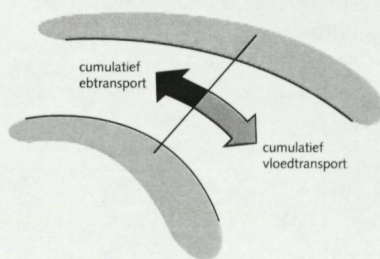
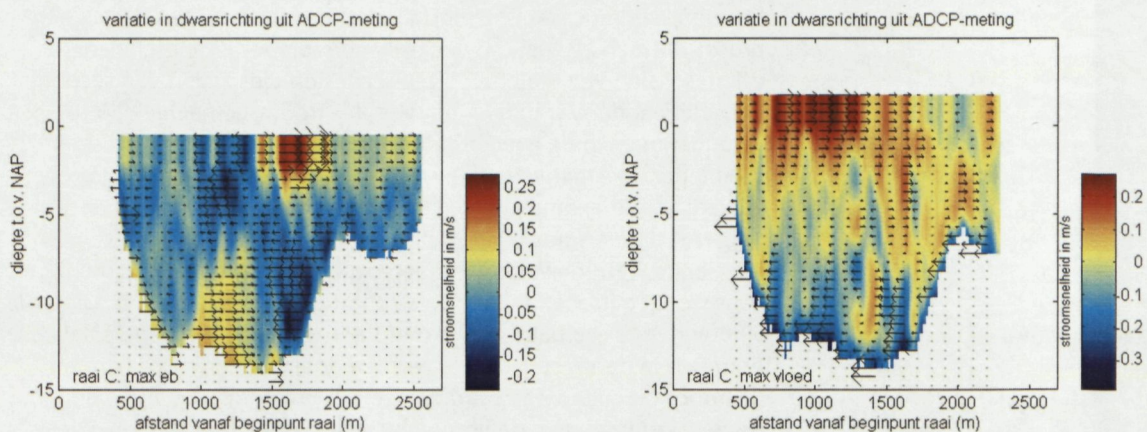
De secundaire stroming

De *secundaire stroming* speelt ook op verschillende ruimte- en tijdschalen. Op een ruimteschaal van een geulsectie en op een tijdschaal van jaren speelt de secundaire stroming een rol bij de uitbocht door een netto sedimenttransport van buitenbocht naar

binnenbocht te veroorzaken. Door uitbochtting gaan eb- en vloedgeulen meer uit elkaar lopen (zie mechanisme van *ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen*). Door Van Veen (1950) is dit de eb- en vloodschaarwerking genoemd. Op een ruimteschaal van een dwarsprofiel en op een tijdschaal van een getijperiode is de secundaire stroming van invloed op de verdeling van het zandtransport binnen een dwarsprofiel. Deze verdeling van zandconcentraties en van het zandtransport binnen een dwarsprofiel beïnvloedt de erosie- en sedimentatiepatronen ten gevolge van het zandtransport mede door ruimtelijke onder- en oververzadigingen in de concentratievertikaal.

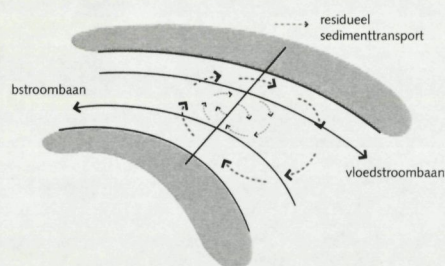
De verdeling van het zandtransport binnen een dwarsprofiel bij bochtstroming wordt op twee wijzen veroorzaakt. In het geval van één circulatiecel veroorzaakt de secundaire stroming ten eerste een netto zandtransport nabij de bodem, waar de grootste zandconcentraties optreden, van buiten- naar binnenbocht. Ten tweede neemt in de binnenbocht de valsnelheid van het sediment relatief af doordat de secundaire stroming daar naar boven is gericht. Het zand in de binnenbocht zal hierdoor minder snel bezinken waardoor de zandconcentratie in suspensie toeneemt. In de buitenbocht neemt de valsnelheid van het sediment juist relatief toe en wordt bezinking van het zand in suspensie versterkt. Het gevolg is dat in de binnenbocht de zandconcentraties in suspensies groter zijn dan in de buitenbocht. Bij complexe morfologische situaties is er zeer waarschijnlijk sprake van meerdere circulatiecellen (Tank, 1997^d). Ter plaatse van de drempel is dit ook waargenomen (figuur 2.11, Jansen, 1998). In dit geval werken dezelfde principes, zij het dat de verdeling van het zand over het dwarsprofiel anders is. Op plaatsen waar twee cellen samenkomen kan, als ze daar naar beneden gericht zijn, "downwelling" (Bathurst et al., 1979) optreden. Dat leidt tot een versterkte schuifspanning op de bodem. Waar twee cellen een naar boven gericht stroompatroon vertonen, treedt "upwelling" op.

Figuur 2.11
Dwarsdoorsnede van de drempel met de secundaire stroming in meerdere cellen (naar Jansen, 1998).



Getij-asymmetrie

Zandtransport door *getij-asymmetrie* is van belang binnen een geulsectie en over een getijperiode. Het zandtransport door getij-asymmetrie heeft een dominante richting (eb- of vloedrichting) over de volledige breedte van de geul. De getij-asymmetrie beïnvloedt, net als de secundaire stroming, het zandtransport mede door ruimtelijke onder- en oververzadiging. Anders dan secundaire stroming die in de richting dwars op de geulas invloed heeft, heeft getij-asymmetrie invloed in de lengterichting van de geul. In het geval van vloedgedomineerd zandtransport door getij-asymmetrie zal tijdens vloed aan de bovenstroomse zijde van een te ruim geuldeel de netto



Getij-Residuele Strooming (GRS)

aanzanding sneller verlopen dan aan de bovenstroomse zijde tijdens eb. Dit steekt als volgt in elkaar: aan de vloedzijde zal tijdens vloed relatief veel sedimentatie plaatsvinden terwijl aan de ebzijde relatief veel erosie plaatsvindt. Tijdens de daaropvolgende ebfase vindt relatief weinig sedimentatie plaats aan de ebzijde van het te ruime geuldeel en aan de vloedzijde is de erosie gering. Op den duur zal de netto sedimentatie aan de vloedzijde zich in vloedrichting uitbreiden, de ebzijde bereiken en verminderen. Bij ebgedomineerd transport door getij-asymmetrie werkt dit omgekeerd.

Zandtransport door *Getij-Residuele Strooming* (GRS) is van belang op een ruimteschaal van een geulsectie en op een tijdschaal van een doortij/springtij-cyclus. Door GRS ontstaan consistente horizontale circulatiepatronen door de interactie tussen het horizontale getij en de geometrie (Storm, 1996). Zandtransporten door GRS laten ruimtelijk zeer consistente resttransporten zien in bijvoorbeeld eb- en vloedgedomineerde geuldelen. Al is de GRS van dijk tot dijk in balans, het geïnduceerd resttransport hoeft echter niet $0 \text{ m}^3/\text{s}$ te zijn en is dit in de meeste gevallen ook niet. Zandtransport door GRS hangt nauw samen met de ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen. Immers: als aan de ene zijde van een drempel geen compenserend zandtransport zou plaatsvinden, zou een drempel de neiging hebben zich op te vullen.

2.3.3 Koppeling tussen mechanismen en processen

De processen die bij *ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroombanen* een belangrijke rol spelen zijn: de secundaire stroming en de getij-residuele stroming. De secundaire stroming speelt een rol op lange termijn bij de uitbocht, waardoor eb- en vloedgedomineerde geulen uit elkaar gaan lopen. Op de korte termijn veroorzaakt de secundaire stroming patronen in het sedimenttransport. Getij-residuele stroming veroorzaakt ruimtelijk consistente en aan beide zijden van de drempel vaak tegengesteld gerichte zandtransporten, waardoor de ruimtelijke scheiding van eb en vloedstroombanen intact blijft. Zandtransport door getij-asymmetrie, inclusief onder- en oververzadigingseffecten spelen indirect een rol bij dit mechanisme.

Het proces dat bij *verdeling van getijvolume* van belang is is zandtransport door onder- en oververzadiging. Bij veranderingen in de verdeling van het getijvolume raakt de morfologie uit evenwicht. De geul waar het getijvolume is toegenomen is te krap en door toename van de stroomsnelheid vindt daar erosie plaats. De andere geul is te ruim en er vindt door afname van de stroomsnelheid sedimentatie plaats. De andere processen, zoals secundaire stroming en getij-asymmetrie, hebben alleen indirect invloed op dit mechanisme, bijvoorbeeld alleen op aanzandingspatronen.

Het proces dat bij *convergentie/divergentie* van de stroombanen rond de drempel van belang is is onder- en oververzadiging. Als de stroombanen divergeren of convergeren leidt een verandering in de concentratievertikalen tot sedimentatie of erosie. Als voorbeeld: divergerende stroming kan leiden tot afname van de stroomsnelheid en daarmee tot oververzadiging. De oververzadiging heeft sedimentatie tot gevolg. Voor convergerende stroming werkt dit mechanisme omgekeerd. De processen secundaire stroming en getij-asymmetrie spelen een indirecte rol bij dit mechanisme.

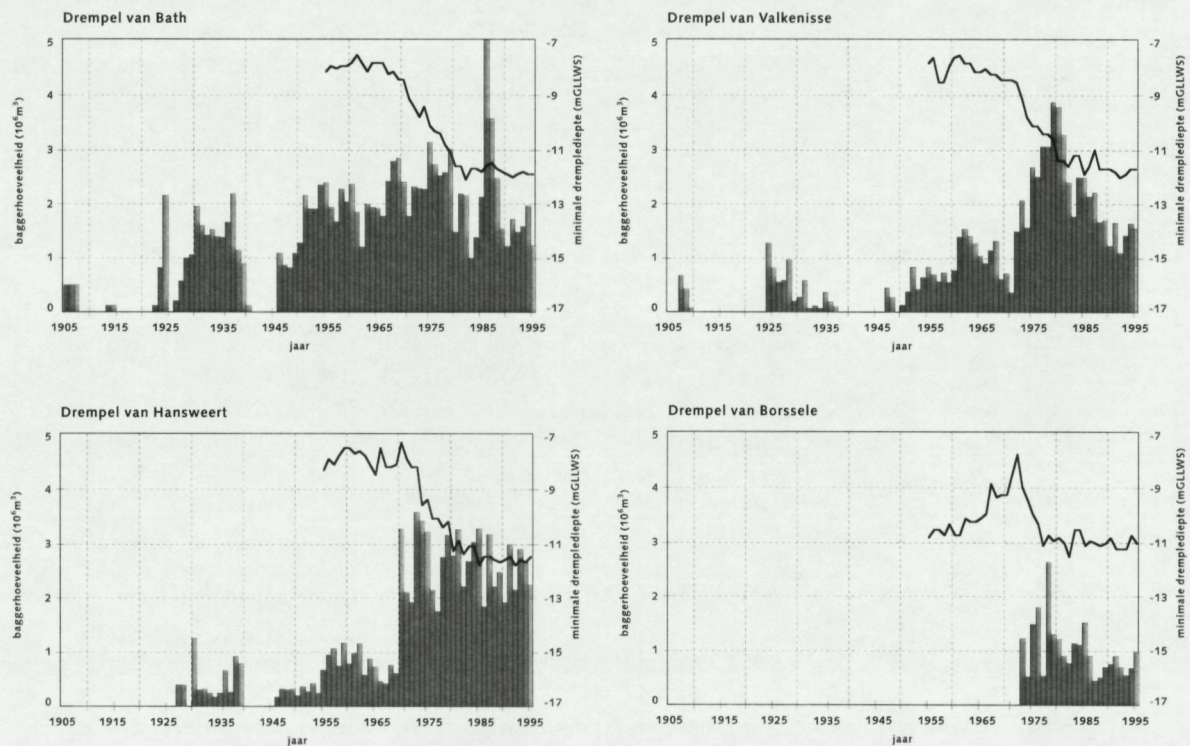
3. Menselijke invloeden op drempels in de Westerschelde

3.1 Baggerwerken

Al sinds het begin van deze eeuw wordt er in de Westerschelde gebaggerd. De baggerwerken begonnen in het oosten op de Drempel van Bath en breidden zich in westwaartse richting uit. Op de Drempel van Bath begonnen de baggerwerken in 1905, op de Drempel van Valkenisse in 1907, op de Drempel van Hansweert in 1927 en op de Drempel van Borssele in 1973 (Mol, 1995) (figuur 4.1). Op de Drempel van Baarland is alleen tussen 1969 en 1975 kortstondig gebaggerd. In 1975 is de vaargeul van het Middelgat naar de Overloop van Hansweert verlegd.

Figuur 3.1

Jaarlijkse baggergegevens en minimale drempeldiepte op: (a) Bath, (b) Valkenisse, (c) Hansweert en (d) Borssele (naar Van den Berg *et al.*, 1996 en Mol *et al.*, 1997).



De baggerwerken in het begin van deze eeuw op de Drempels van Bath en Valkenisse waren weinig frequent en van kleine omvang. Vanaf de jaren '20 nam op de drie oostelijke drempels de frequentie van de baggerwerken evenals de omvang toe. Weer later, vanaf 1950, wordt op de drie oostelijke drempels jaarlijks gebaggerd: gemiddeld 2 Mm^3/jr op de Drempel van Bath, ruim 1 Mm^3/jr op de Drempel van Valkenisse en 0.75 Mm^3/jr op de Drempel van Hansweert. De drempels werden toen tot een diepte van 11 - 12 m beneden N.A.P. gebaggerd. In 1970 nemen de baggerwerken toe in het kader van de "Eerste Verdieping van de Westerschelde". Alle drempels, inclusief die van Borssele, worden tot 14 - 15 m beneden N.A.P. verdiept. Hierdoor

worden de drempels 4 tot 7 m beneden hun oorspronkelijke natuurlijke diepte gehouden (Pieters *et al.*, 1991).

In deze periode zijn de baggerwerken niet alleen tot de drempels beperkt, ook op andere plaatsen worden geulen verbreed en bochten ruimer gemaakt. De totale baggerwerken in de Westerschelde nemen tijdens de eerste jaren van de verdieping toe tot circa 14 Mm³/jr. Na een tiental jaren stelt er zich een nieuw soort evenwicht in en neemt het jaarlijkse baggervolume af tot 8 Mm³. De verdieping in de jaren '70-'75 heeft met name invloed op de baggerinspanning op de Drempels van Valkenisse en Hansweert en veel minder op die van Bath. Voor de eerste twee drempels verdrievoudigt de baggerinspanning aanvankelijk. Een verklaring voor het feit dat ondanks de toename van de overdiepte op de Drempel van Bath de baggervolumina niet toenemen is dat de zandtoevoer limiterend is.

3.2 Storten

Het gebaggerde materiaal moet natuurlijk ergens worden gelaten. Grotendeels wordt dit teruggestort en 1 - 2 Mm³/jr wordt onttrokken aan het estuarium door zandwinning. In de loop van de tijd is bij het storten een strategie ontwikkeld om de waterbeweging en de geulontwikkeling te sturen, ten einde een vermindering van het baggerwerk te bewerkstelligen. De baggerspecie wordt gestort in de nevengeulen, waarmee wordt beoogd meer water door de hoofdgeul te dwingen, waardoor drempelvorming beperkt zou worden. Daarnaast vinden er stortingen plaats langs eroderende geuloevers om verder afkalven tegen te gaan. Een derde onderdeel van de strategie is om het materiaal naar het westen te brengen (Pieters *et al.*, 1991). Dit laatste wordt momenteel uitgevoerd in het kader van de 48'/43'-verdieping (Huijs, 1997), die sinds medio 1997 uitgevoerd wordt. Omdat de stortingen tot voor kort vaak maar enkele kilometers westwaarts van de baggerlokatie, in vaak ook nog vloedgedomineerde geulen of geuldelen, plaatsvinden is het materiaal binnen enkele dagen weer terug op de plaats van herkomst. Door Storm (1996) is dit aannemelijk gemaakt voor de Drempel van Bath. Het materiaal wordt in feite rondgepompt.

3.3 Invloed baggerwerken op de drempels

3.3.1 Oostelijke drempels (Bath, Valkenisse en Hansweert)

De morfologie van de -gebaggerde- drempels heeft sinds de jaren '50 een grote verandering vertoont. Ten oosten van Hansweert is deze verandering het grootst. De relatie met de sterke menselijke ingrepen is erg duidelijk. De drie drempels in het oosten van de Westerschelde waren in de jaren '50 aan het eb-gedomineerde (westelijke) eind van een hoofdgeul gelokaliseerd. De ebgeulen waren door een ondiep overgangsgebied (drempel minimum) verbonden met een relatief rechte vloedgedomineerde hoofdgeul die er min of meer loodrecht op staat. In figuur 3.2 staat ter illustratie de morfologie van de Drempel van Hansweert in 1955. De vorm van deze drempel wordt het "botsende ebgeul"-type drempel genoemd.

In de jaren '90 is de situatie sterk gewijzigd: de vloedgeul is als het ware voor een deel omgebogen en sluit beter aan op de ebgeul. Het andere deel van de vloedgeul heeft aan belang ingeboet en stroomt langs de ebgeul heen. De aansluiting is echter niet perfect: de eb- en

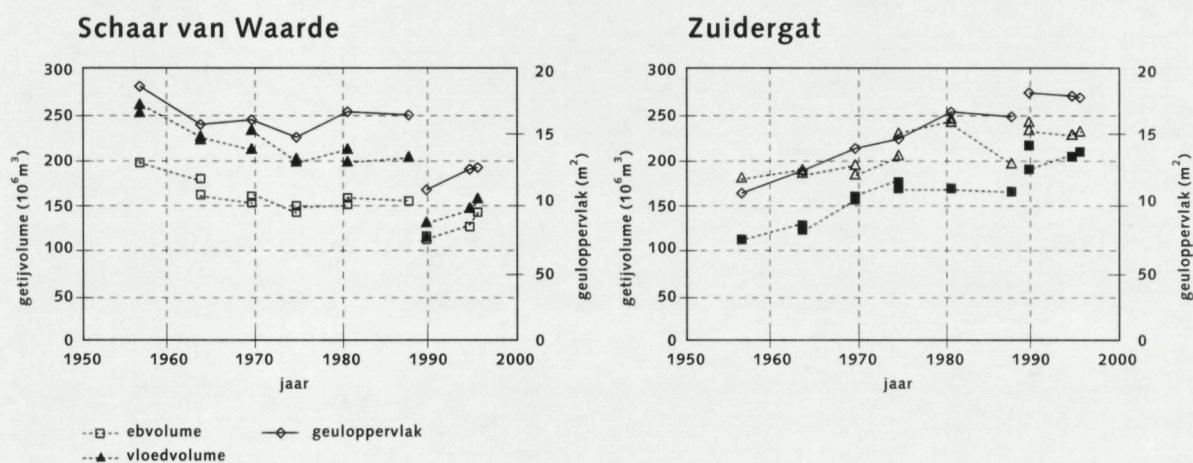
vloedgedomineerde delen ontwijken elkaar. Ter illustratie staat in figuur 3.3 de morfologie van de Drempel van Hansweert in 1994. Deze vorm wordt het "ontwijkende geulen"-type drempel genoemd. De overgang van het "botsende ebgeul"-type naar het "ontwijkende geulen"-type drempel kwam al vanaf de jaren '50 op gang maar is voor het overgrote deel opgetreden in de jaren '70. Het is dus met name een gevolg van menselijk ingrijpen door de verdieping in de jaren '70-'75 en het continue onderhoudsbaggerwerk daarop volgend.



Figuur 3.2
Botsend ebgeul-type (Drempel van Hansweert, 1955).



Figuur 3.3
Ontwijkend ebgeul-type (Drempel van Hansweert, 1994).

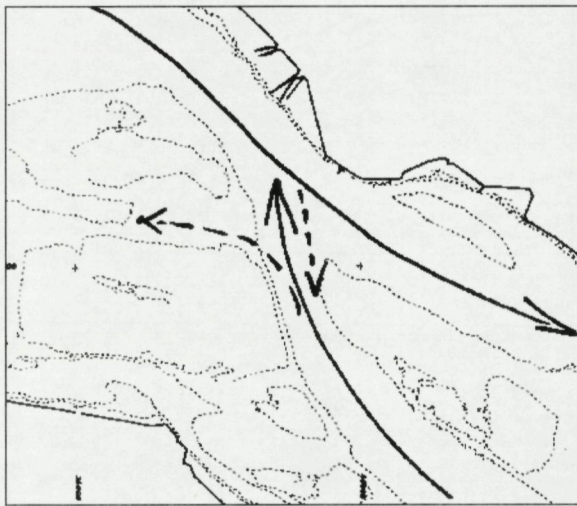


Figuur 3.4
Verloop van getijvolume en geuloppervlak voor de Schaar van Waarde en het Zuidergat.

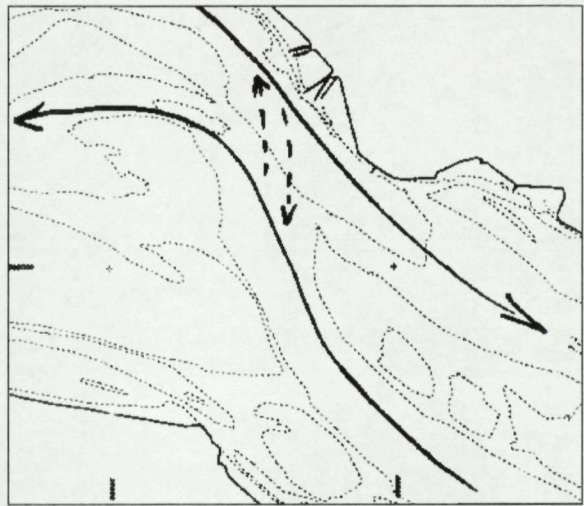
Tegelijkertijd met de overgang van het "botsende ebgeul"-type naar het "ontwijkende geulen"-type drempel is de verdeling van de getijvolumina over de geulen veranderd. In het kort komt het erop neer dat het getijvolume (zowel eb- als vloedvolume) over de drempel is toegenomen ten koste van het volume door de nevengeulen. De verdeling van het getijvolume op de Drempel van Hansweert tussen 1957 en 1996 illustreert dit (figuur 3.4).

3.3.2 Westelijke drempels (Baarland en Borssele)

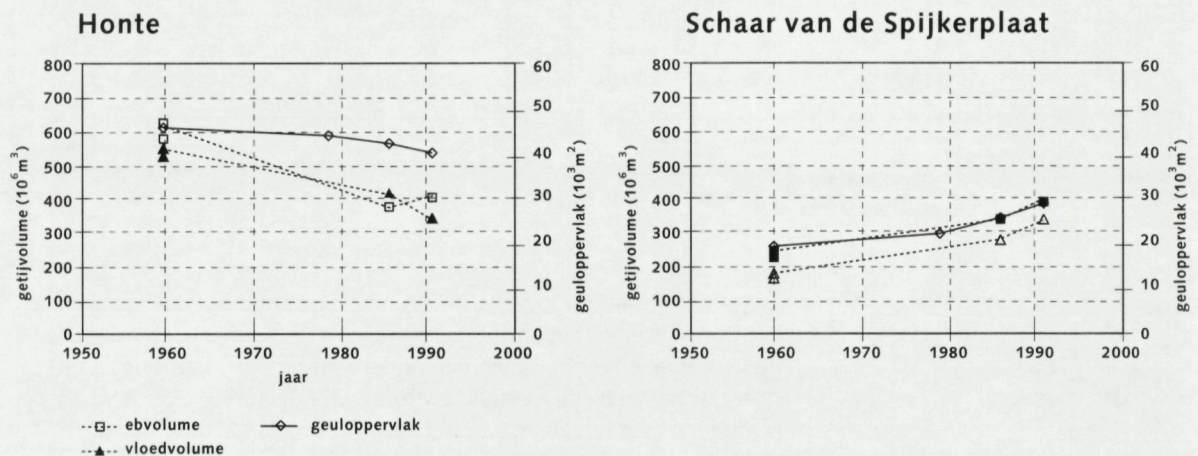
De twee drempels ten westen van Hansweert, de Drempels van Baarland en Borssele, die voorkomen in het deel van het estuarium met twee hoofdgeulen, hebben sinds de jaren '50 ook een overgang ondergaan. In de jaren '50 waren beide drempels, net als die in het oosten, van het "botsende ebgeul"-type. Geleidelijk zijn beide drempels overgegaan naar het "parallele geulen"-type. In de jaren '90 is deze overgang voltooid. In het "parallele geulen"-type bevinden de drempels zich op de overgang tussen twee parallel aan elkaar lopende hoofdgeulen. Om één en ander te verduidelijken wordt in figuren 3.5 en 3.6 de morfologie van de Drempel van Borssele in 1955 en 1994 weergegeven. De overgang naar het "parallele geulen"-type drempels heeft een natuurlijke oorzaak. Door geulmigraties zijn bepaalde geulen meer water gaan trekken, waardoor de eb en de vloed als het ware gescheiden langs elkaar stromen. De baggerwerken hebben op de westelijke drempels nauwelijks invloed gehad, omdat de omvang ervan in geen verhouding staat tot de dimensies van het systeem aldaar.



Figuur 3.5
Botsend ebgeul-type (Drempel van Borssele, 1955).



Figuur 3.6
Ontwikkend ebgeul-type (Drempel van Borssele, 1994).



Figuur 3.7
Verloop van getijvolume en geuloppervlak voor de Honte en de Schaar van Spijkerplaat.

De verdeling van het getijvolume in de hoofdgeulen rondom de drempels is eveneens gewijzigd. In figuur 3.7 staat als voorbeeld de verdeling van het eb- en het vloedvolume tussen de Honte en de Schaar van de Spijkerplaat tussen 1960 en 1991. Uit deze figuur blijkt een toename van het getijvolume in de Schaar van de Spijkerplaat ten koste van het volume in de Honte.

3.4 Conceptueel morfodynamisch model

Ter afronding van de morfodynamische beschrijving wordt een conceptueel model beschreven, waarin de eerder genoemde punten samenkomen. Het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert wordt volledig bepaald door de getijstroming. De toevoer van zand door golven van de Plaat van Ossensisse naar de drempel is te verwaarlozen (Israël, 1997).

Op de Drempel van Hansweert lopen de stroombanen van eb en vloed relatief sterk uiteen. Door de ruimtelijk scheiding van eb- en vloedstroombanen wordt de geuldoorsnede ter plaatse van de drempel niet effectief gebruikt, een deel van de geuldoorsnede wordt door de vloed en een deel door de eb gebruikt. De dominante van het getij voor deze delen van de geuldoorsnede is groot. In de geulbochten is deze dominantie veel kleiner en maken eb- en vloedstroming van gelijke delen van de dwarsdoorsnede gebruik.

Door de verdeling van het getijvolume over de Drempel van Hansweert en de nevengeulen stroomt niet al het water over de drempel. Tijdens eb stroomt wordt circa 5% van het ebvolume uit het Zuidergat vlak voor de Drempel door de Schaar van Ossensisse. Op het noordelijk deel van de drempel komt tijdens eb 40% van het totale ebvolume uit de Schaar van Waarde bij het ebvolume in de hoofdgeul. Tijdens de vloedfase stroomt eveneens zo'n 40% van vloedvolume van de hoofdgeul door de Schaar van Waarde. Door deze aftapping is het geuloppervlak van het hele drempelgebied aanzienlijk kleiner dan bij de aansluitende geulbochten.

De verdeling van het getijvolume op de Drempel van Hansweert wordt de laatste 40 jaar gestuurd door baggerwerken op de drempel en in mindere mate door stortingen in de Schaar van Waarde. Hierdoor is de verdeling van het getijvolume over hoofd- en nevengeul aanzienlijk veranderd: het getijvolume over de drempel is aanzienlijk toegenomen. Toch is de drempel nog steeds uit evenwicht met het nieuwe getijvolume: door het continue baggerwerk is deze te ruim.

Door de divergentie van de stroming tijdens vloed aan de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert ontstaat hier een breed en relatief ondiep dwarsprofiel. Op het zuidelijke deel van de drempel vindt er tijdens eb geen tot nauwelijks divergentie plaats. Het sedimenttransport dat gekoppeld is aan dit mechanisme is aan beide zijden van de drempel niet in balans met elkaar. De invloed van de divergentie op de vorm van het profiel aan de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert tijdens vloed is dominant over de invloed van de convergentie tijdens eb.

Omdat de Drempel van Hansweert verdiept wordt en te ruim is, is het belangrijkste natuurlijke proces dat morfologische veranderingen veroorzaakt het residueel zandtransport door ruimtelijke onder- en oververzadiging. Door dit proces vindt over een getij netto aanzanding

plaats op de drempel. Het grootste deel van deze aanzanding vindt plaats vanuit het noorden omdat op de drempel vloedgedomineerd zandtransport plaatsvindt. Binnen een getij en in de breedte van de geul heeft de secundaire stroming invloed op het patroon van aanzanding door de onder- en oververzadiging. Het is niet goed bekend hoe dit patroon eruit ziet. Uit berekeningen met het 3D waterbewegingsmodel TRISCAL (Jansen, 1998; Wouters, 1998) volgt het belang van de secundaire stroming op het sedimenttransport. Het lijkt erop dat minimaal twee cellen aanwezig zijn die in ruimte en tijd sterk veranderen.

4. Simulatie van de morfodynamica van een drempel

4.1 Inleiding

Naast de analyse van de meetgegevens van de Drempel van Hansweert kan inzicht in het gedrag van drempels in de Westerschelde vergroot worden door het analyseren van simulaties van het morfodynamisch gedrag met behulp van een numeriek model. Uit de verschillende modelinstrumenten (Verbeek, 1998) is de keuze gemaakt voor een morfologisch procesmodel. De reden hiervoor is dat het effect van baggeren en storten binnen dit onderzoek lokaal geanalyseerd moet worden. Daarnaast is de koppeling met het uitgevoerde procesonderzoek ook van belang. Hierdoor is gekozen voor DELFT2D-MOR, een modelpakket dat ontwikkeld is door het Waterloopkundig Laboratorium (WL, 1997).

DELFT2D-MOR is een 2Dh-modellenpakket voor morfologische ontwikkeling en bestaat uit:

- (roostergenerator RGFGRID)
- (bodeminterpolatie QUICKIN)
- stromingsmodel TRISULA (vergelijkbaar met WAQUA van Rijkswaterstaat)
- golvenmodel HISWA (ontwikkeld door TU-Delft)
- sedimenttransportmodel TRSTOT en TRSSUS (totaal en suspensie/bodemtransport)
- bodemontwikkelingsmodel MORSYS
- (grafisch presentatiepakket GPP)

Een morfologische simulatie wordt opgebouwd uit een golvendeel, een stromingsdeel, een sedimenttransportdeel en een bodemontwikkelingsdeel. Door een slimme combinatie van deze vier onderdelen door het morfologisch stuurprogramma wordt de uiteindelijke morfologische simulatie opgebouwd (zie Groenewoud, 1997).

Het modelonderzoek richt zich op het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert en is in twee stappen ingedeeld. De eerste stap betreft de modelbouw en de simulatie van de huidige situatie (Groenewoud, 1997). De simulatie van de huidige situatie heeft als doel het model te calibreren en te verifiëren. Door de resultaten van de simulatie van de huidige situatie te vergelijken met meetgegevens kan een goede indruk van de nauwkeurigheid van de berekeningen verkregen worden.

De tweede stap betreft de simulatie van verschillende alternatieven, waarbij gekeken wordt naar het effect van de wijze van baggeren en storten op de aanzanding van de drempel (Groenewoud & Tank, 1997). Het model is gebruikt om zowel kwalitatief als kwantitatief een beeld te krijgen van de gevolgen van diverse alternatieven voor de uitvoering van het baggerwerk. Dit gebeurt door (a) analyse van de ruimtelijke aanzandingspatronen en (b) berekening van de totale aanzanding op de drempel over een periode van een jaar.

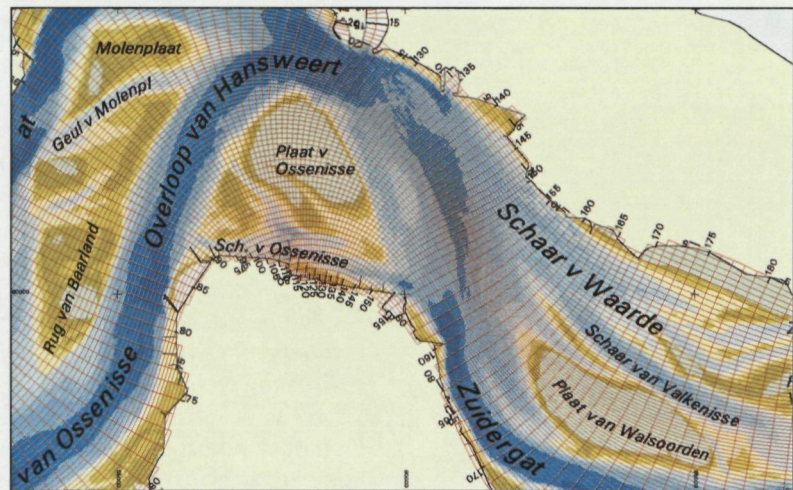
4.2 Modelopzet

Met behulp van het DELFT2D-MOR systeem is een model gemaakt van de hydro- en morfodynamica in en nabij het gebied van interesse: de Drempel van Hansweert. Allereerst was het nodig een ruimtelijke schematisatie van het gebied te maken (figuur 4.1). Het gebied waarvan een grid is gemaakt reikt van Vlissingen-Breskens tot aan Prosperpolder (grens Nederland - België). Het grid is fijnmazig in het gebied van interesse (grid ongeveer 25 bij 50 m) en bestaat uit ongeveer 14500 gridpunten. De bodemliggingsgegevens van 1996 zijn gebruikt als uitgangspunt voor de berekeningen.

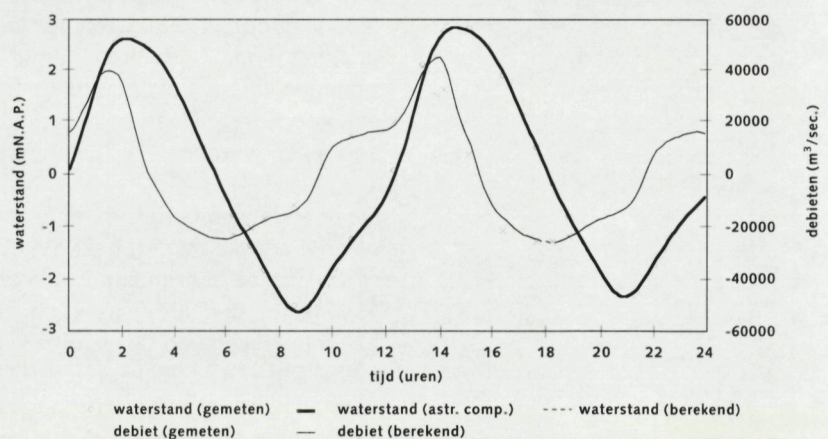
4.2.1 Waterbeweging

Bij de randen van het model bevinden zich waterstandsstations waarvan de meetgegevens gebruikt zijn om het model mee aan te sturen. Op basis van meerjarige meetreeksen zijn de astronomische componenten van de waterstanden bepaald, welke als randvoorwaarden opgelegd worden. De calibratie van het model is gedaan door in tussengelegen waterstandsstations (Terneuzen, Hansweert, Baalhoek en Bath) waterstanden op basis van astronomische componenten te vergelijken met de berekende waterstanden. De validatie van het model is uitgevoerd door de gemeten en de berekende debieten door raaien bij de Drempel van Hansweert te vergelijken (figuur 4.2). Hiervoor is gebruik gemaakt van gegevens uit de meetcampagne. Uit de figuur blijkt dat de overeenkomsten tussen gemeten en berekende waterstanden en debieten goed zijn.

Figuur 4.1
Rooster van het DELFT2D-MOR model rond de Drempel van Hansweert.



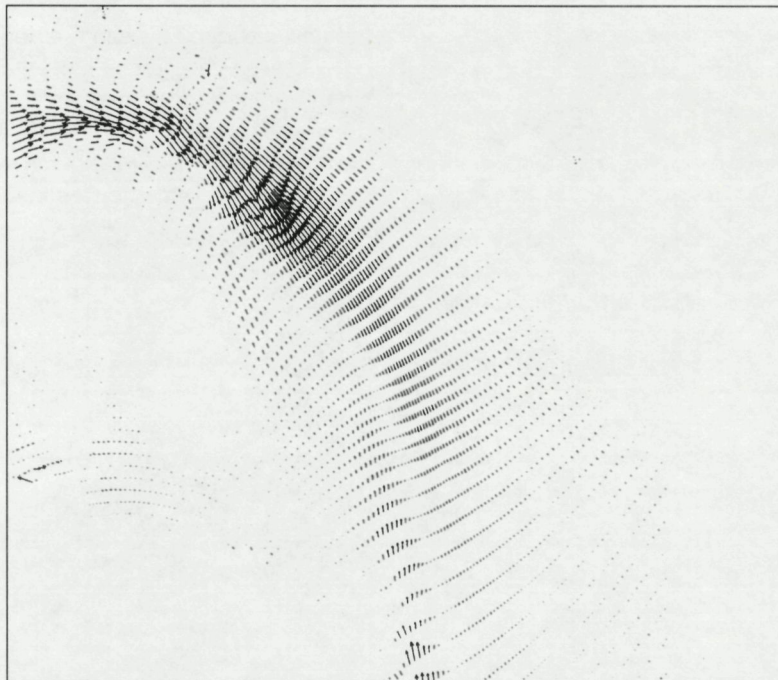
Figuur 4.2
Gemeten en berekende waterstand en debiet bij de Drempel van Hansweert.



4.2.2 Sedimenttransport

Voor het berekenen van het zandtransport is gebruik gemaakt van de Van Rijn. Deze formulering gaat uit van een gescheiden benadering van bodemtransport en suspensietransport en is gecalibreerd met een groot aantal datasets formulering (Van Rijn, 1984^a, 1984^b en 1984^c). Meetgegevens uit de meetcampagne op de Drempel van Hansweert zijn gebruikt om het zandtransportmodel te calibreren. Naar aanleiding van het procesonderzoek is het effect van secundaire stroming op het sedimenttransport meegenomen in de berekeningen (de zogenaamde $2\frac{1}{2} D$ benadering). Op basis van het procesonderzoek blijkt dat de berekening van het suspensietransport nodig is om het effect van over- en onderverzadiging te kunnen meenemen in de berekeningen. Helaas bleek dit onderdeel van het modelsysteem (tijdelijk) niet te gebruiken te zijn. Hierdoor is voor de berekeningen gebruik gemaakt van het totaal transport, waardoor niet het actuele transport, maar de actuele transportcapaciteit wordt bepaald.

Figuur 4.3
Residuele sedimenttransporten bij het morfologisch getij.



¹ Het morfologische getij is het getij dat, bij herhaling gedurende 14 dagen, zandtransporten geeft die vergelijkbaar zijn met de netto zandtransporten die zouden optreden bij een volledig doottij-springtij cyclus van 14 dagen.

In figuur 4.3 staan de residuele sedimenttransporten afgebeeld die voorkomen bij het morfologisch getij¹. Te zien is dat zowel vanuit noordelijke als vanuit zuidelijke richting de residuele (= netto) zandtransporten naar de drempel zijn toegericht. Ter hoogte van de drempel neemt de transportgrootte af. De drempel zal dus volgens het model aanzanden, hetgeen overeenkomt met wat men in de natuur waarneemt. Opvallend is ook het duidelijke effect van het elkaar ontwijken van eb- en vloedstroming. Aan de noordoostelijke zijde van de drempel zijn de sedimenttransporten vloedgedomineerd en aan de zuidwestelijke zijde ebgedomineerd. Het mechanisme van het elkaar ontwijken van eb- en vloedstroming is al eerder door Van Veen (1950) onderkend (zie ook § 2.3).

4.2.3 Bodemontwikkeling

DELFT2D-MOR is een morfodynamisch model, d.w.z. dat het model in staat is veranderingen in de bodemligging over een bepaalde termijn te berekenen. Echter hoe langer deze termijn is, des te onnauwkeuriger zullen de resultaten zijn. In het kader van het drempelonderzoek is ervoor gekozen om de bodemontwikkeling gedurende 1 jaar te

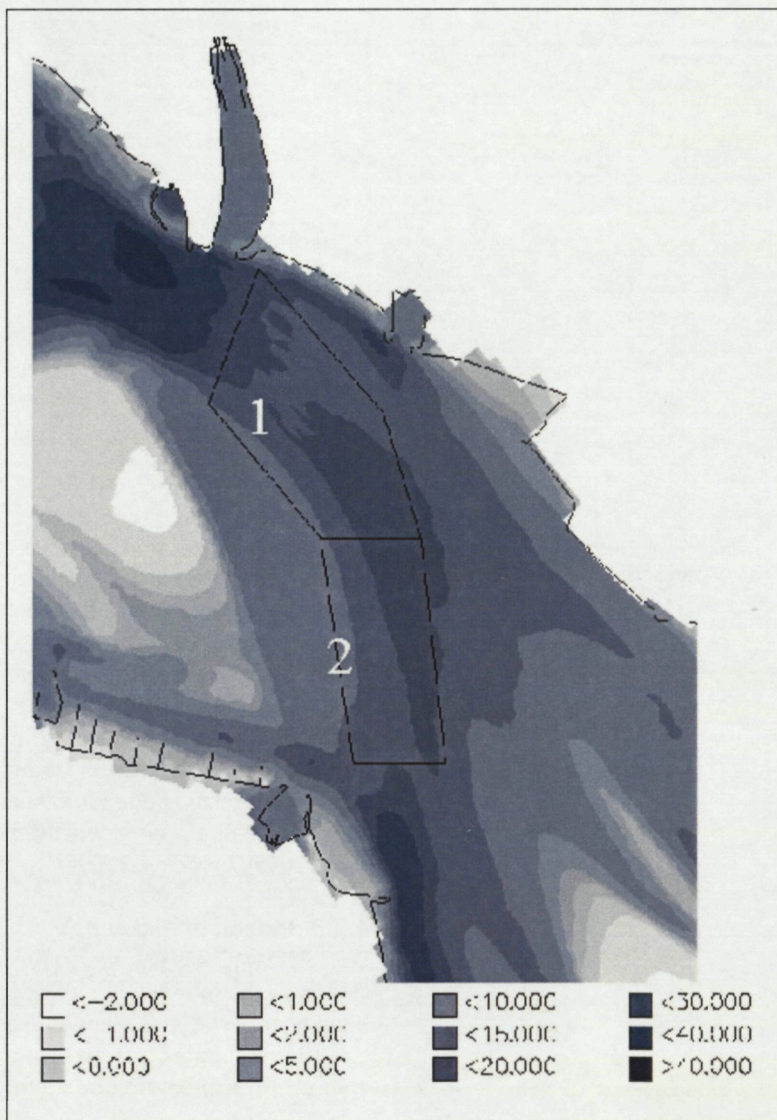
berekenen. Voor deze berekeningen is gebruik gemaakt van methodes om de rekentijd te bekorten, zoals het gebruik van een morfologisch getij (Groenewoud, 1997). De consequentie hiervan is dat de resultaten op een globale schaal wel goed worden weergegeven, maar dat op lokale schaal verschillen kunnen optreden ten opzichte van een volledige doodtij-springtij cyclus. Voor de toetsing van het model is gekeken naar de simulatie van de autonome ontwikkeling en de simulatie van de huidige baggerstrategie.

4.3 Simulatie autonome ontwikkeling

4.3.1 Autonome ontwikkeling: metingen

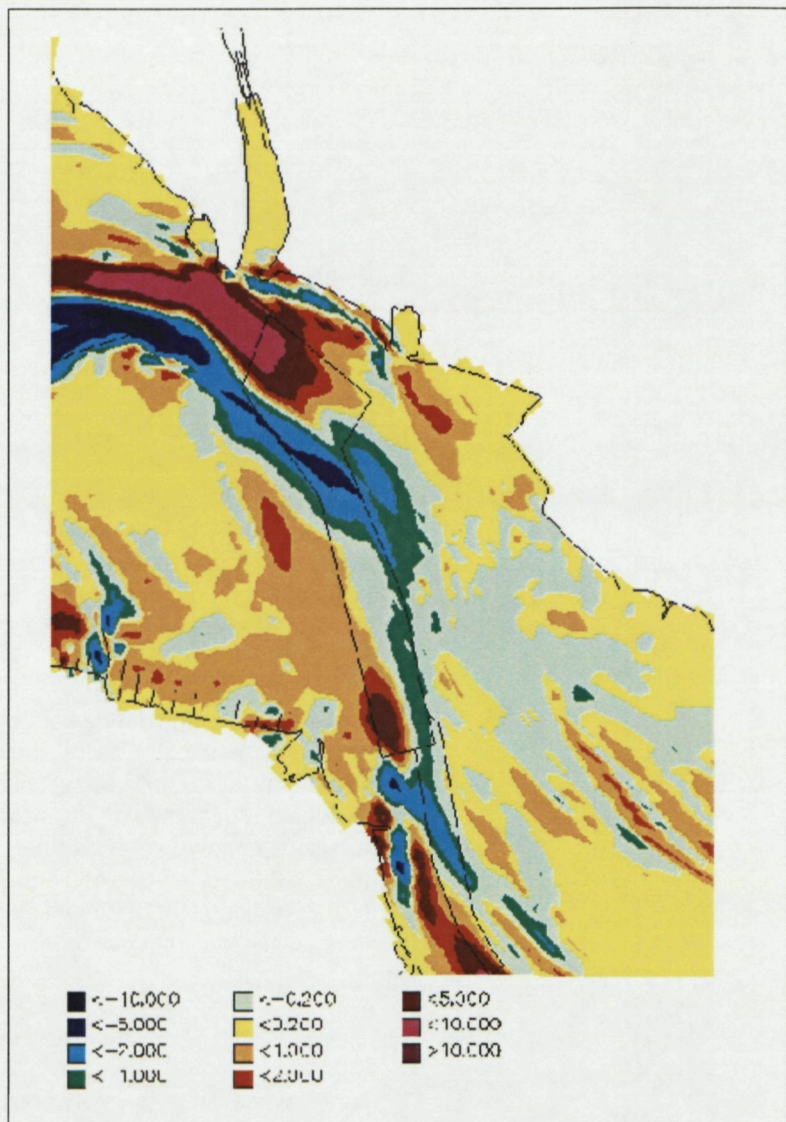
Om een beeld te krijgen van de ontwikkeling van de Drempel van Hansweert over een periode van enkele jaren zijn de lodingsgegevens van de periode 1990-1996 onderzocht. Gebruik is gemaakt van de driemaandelijke lodingen van de Westerschelde die digitaal beschikbaar zijn. Er is een drempelvak gedefinieerd waarvoor de ontwikkeling van de gemiddelde bodemdiepte is berekend (figuur 4.4). Dit drempelvak heeft een oppervlakte van $3,25 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Dit drempelvak vertoont een trend van 0,06 m/jaar (standaard deviatie = 0,09 m) aanzanding (figuur 4.5). Deze trend is niet gecorrigeerd voor de hoeveelheid baggerwerk in het gebied.

Figuur 4.4
Lokatie van het drempelvak (vak 1 en 2) met diepte rond de Drempel (in m NAP).



Figuur 4.6

Erosie- en sedimentatiepatronen op de Drempeel van Hansweert bij de autonome ontwikkeling met baggervak aangegeven (in m, erosie positief).



De binnenbocht boven de Plaat van Ossensisse zandt volgens de modelberekeningen sterk aan, deels ten gevolge van de secundaire stroming die sedimenttransport genereert van de buitenbocht naar de binnenbocht. Het lijkt er op dat de aanzanding wordt overdreven door het model. Hiermee wordt echter een fenomeen uit de praktijk opgelost. Het is bekend dat op deze lokatie veelvuldige plaatvallen optreden, die op deze wijze (onbedoeld) meegenomen worden. In de Overloop van Hansweert treedt erg veel erosie op. Te zien is dat de erosiekuil zich ten dele uitstrekt tot binnen het baggervak op de Drempeel van Hansweert. Binnen het drempelvak gaat de erosie over in sedimentatie. Ook in de binnenbocht van het Zuidergat vindt sedimentatie plaats. In deze binnenbocht bevindt zich in werkelijkheid ook een baggerlocatie. De lokaties waar volgens de berekeningen aanzanding plaatsvindt komen in grote lijnen overeen met de gebieden waar in werkelijkheid ook aanzanding plaatsvindt.

Om nu ook kwantitatief een uitspraak te doen, is het verloop van de gemiddelde diepte in het drempelvak berekend. Het drempelvak blijkt een gemiddelde aanzandingssnelheid te vertonen van 0,57 m/jaar (de ontwikkeling in de tijd is nagenoeg lineair). Deze trend is kleiner in vergelijking met de langjarige trend op basis van de metingen (= 0,88 m/jaar). Het model berekent dus een kleinere aanzanding dan in de

natuur optreedt in het geëvalueerde gebied. Voor dit type berekeningen mag dit resultaat overigens als goed worden beschouwd. Tijdens de eb- en vloedfase vinden grote sedimenttransporten plaats in tegengestelde richtingen. Het netto resultaat is de optelsom van twee grote hoeveelheden sedimenttransport met tegengestelde richting en is derhalve gevoelig voor relatief kleine veranderingen van de transporten tijdens de eb- en vloedfase.

Een mogelijke oorzaak voor het verschil in berekende en gemeten aanzanding zou in het feit kunnen liggen dat de erosiekuil ten noorden van de Plaat van Ossensisse zich in de berekeningen uitstrekt tot in het noordelijk deel van het drempelvak en daarmee de aanzanding in het overige gedeelte van het drempelvak voor een deel te niet doet. Een soortgelijk effect treedt op in het zuidelijk deel van het drempelvak, in de overgang van het Zuidergat naar de Drempel van Hansweert, waar ook een erosiekuil ontstaat.

Het model geeft voor het doel van deze studie een goede weergave van de autonome ontwikkeling rond de Drempel van Hansweert, ondanks de sterke vereenvoudiging en het beperkt aantal fysische processen dat meegenomen wordt.

4.4 Simulatie huidige baggerstrategie

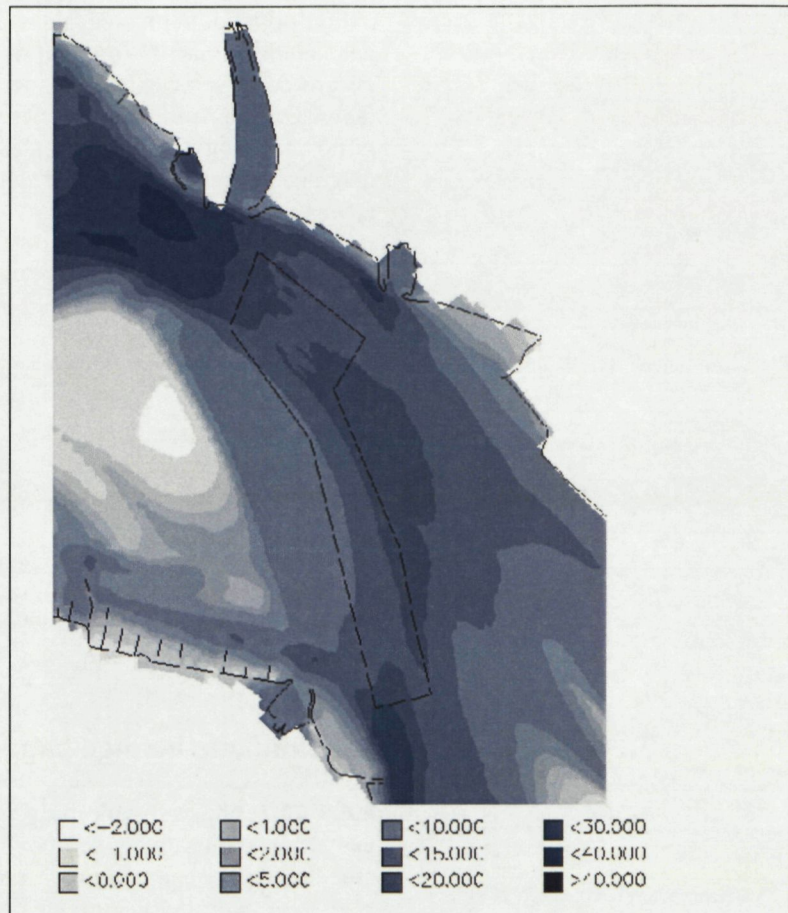
4.4.1 Opzet baggerwerk in de simulatie

Bij het huidige vaarwegonderhoud (tot medio 1997) wordt er min of meer continu gebaggerd op de Westerschelde. Op de Drempel van Hansweert wordt er gedurende de laatste jaren (1990-1996) gemiddeld ongeveer $2.65 \text{ Mm}^3/\text{jr}$ gebaggerd. In figuur 4.7 staat het gebied afgebeeld waarbinnen in de periode 1991-1994 op de drempel is gebaggerd. Dit baggerwerk is uiteraard niet evenredig over het gebied verdeeld. Voor de simulatie wordt hier wel van uitgegaan.

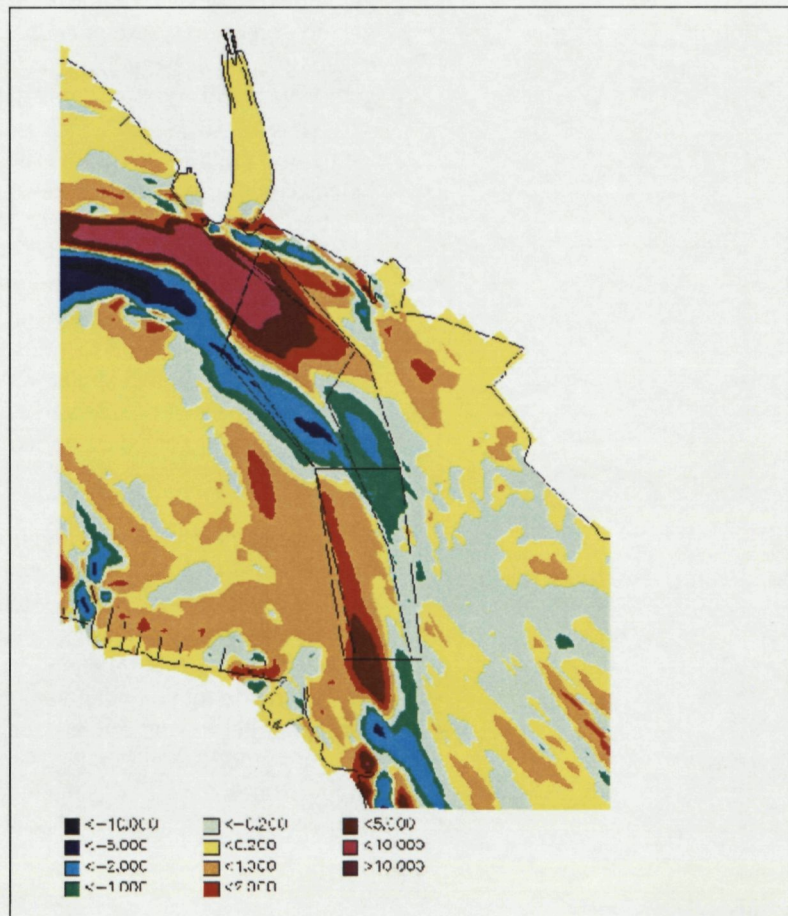
De huidige DELFT2D-MOR versie heeft niet de mogelijkheid om tijdens een morfologische berekening baggerwerkzaamheden binnen een bepaald gebied te simuleren. Met andere woorden, tijdens een morfologische berekening is het niet mogelijk de diepte in een bepaald gebied te vergroten. Om nu toch een simulatie van de huidige baggerstrategie te kunnen maken, is besloten om 12 maal per jaar een gelijke hoeveelheid zand te 'baggeren' in een bepaald gebied. Hiervoor is het nodig dat de berekening na een maand simulatietijd onderbroken wordt, waarna met behulp van een hiervoor geschreven programma in het aangegeven gebied de bodem met een bepaalde grootte wordt verlaagd.

Er is gekozen om binnen een gebied te baggeren dat grotendeels overeenkomt met het baggergebied, maar dat binnen de grenzen ligt van het reeds eerder gedefinieerde drempelvak. Er is dus sprake van een **drempelvak** en een **baggergebied**. Het baggergebied heeft een oppervlakte van $2,07 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Per jaar wordt er $2,65 \text{ Mm}^3$ gebaggerd. Jaarlijks zal de totale bodemverlaging dan $2,65 / 2,07 \approx 1,28 \text{ m}$ bedragen. Per maand zal de bodem dan met $1,28 / 12 \approx 0,11 \text{ m}$ verlaagd moeten worden. Bij de simulatie van de huidige baggerstrategie wordt dus maandelijks in het baggergebied, aangegeven in figuur 4.7, de bodem verlaagd met ongeveer $0,11 \text{ m}$.

Figuur 4.7
Lokatie baggervak gebaseerd op gegevens 1991-1994. (Diepte in m).



Figuur 4.8
Sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar huidige baggerstrategie met drempelvak en baggervak aangegeven (verschillen in m, erosie positief).



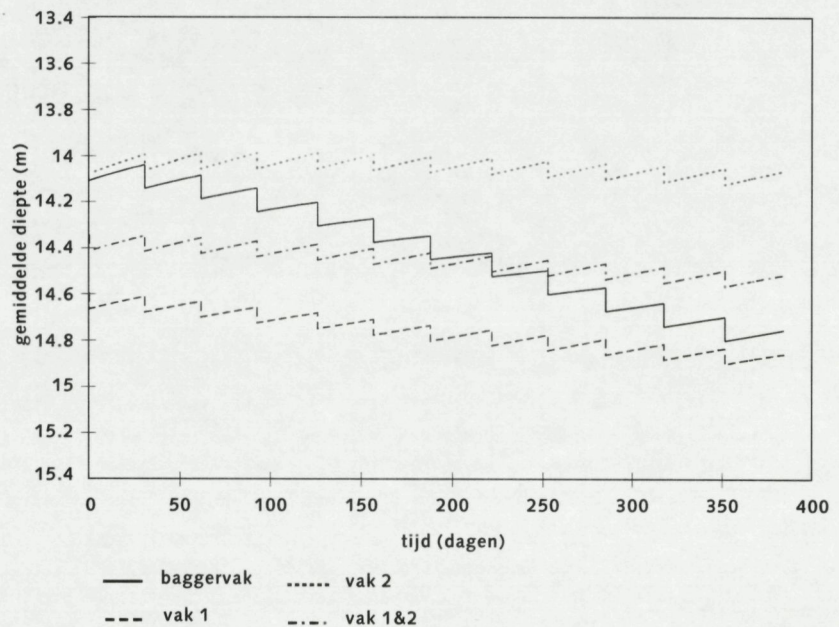
4.4.2 Resultaten simulatie

Met DELFT2D-MOR is een periode van een jaar gesimuleerd. In dat jaar is dus 12 maal gebaggerd. De bodem van 1996 is als uitgangspunt genomen, net zoals bij de berekening van de autonome ontwikkeling. Figuur 4.8 laat de sedimentatie- en erosiepatronen na 1 jaar tijd zien. Ook zijn het gedefinieerde drempelvak (= uiterste omhullende lijn) en het baggervak weergegeven.

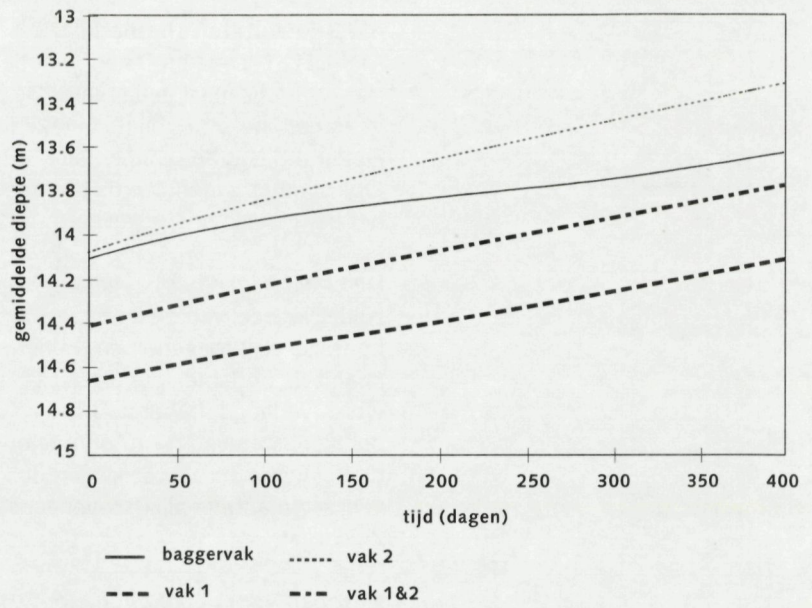
De effecten van het baggerwerk zijn duidelijk zichtbaar. Vooral in het zuidelijke deel van de Drempel van Hansweert is de diepte hoofdzakelijk toegenomen. In het noordelijk deel van de Drempel neemt de bodemdiepte plaatselijk af, ook in het gebied waar de bodem wordt verlaagd. In het noordelijke deel is er veel erosie, net zoals bij de berekeningen van de autonome ontwikkeling al was geconstateerd. In de binnenbocht noordelijk van de Plaat van Ossensisse vindt ook weer veel sedimentatie plaats, eveneens als in de binnenbocht van het Zuidergat.

Net zoals voor de autonome ontwikkeling is van het drempelvak het verloop van de gemiddelde diepte bepaald. Om de aanzandingstrend te bestuderen en te vergelijken met de autonome ontwikkeling is de bodemontwikkeling gecorrigeerd voor het baggerwerk (figuur 4.9 en 4.10). Gemiddeld is in het drempelvak de aanzandingstrend 0,62 m na 1 jaar. De berekening van de autonome ontwikkeling liet een aanzandingstrend van 0,57 m/jr zien. De aanzanding in het drempelvak is bij de simulatie van de huidige baggerstrategie ongeveer 9% groter dan bij de simulatie van de autonome ontwikkeling. Een logische verklaring hiervoor is dat door het baggeren de drempel op overdiepte wordt gehouden en dat daardoor het gebied ook sneller aanzandt. Deze constatering is van belang voor het evalueren van de baggeralternatieven, waarbij ook de frequentie van het baggeren zal worden gevarieerd.

Figuur 4.9
Bodemontwikkeling in baggervak en drempelvak (vak 1 en 2) baggerwerk in de huidige situatie.



Figuur 4.10
Bodemontwikkeling in baggervak en
drempelvak (vak 1 en 2) na correctie voor
baggerwerk.



5. Alternatieven voor het baggerwerk op een drempel

5.1 Inleiding

Om de negatieve gevolgen van het huidige bagger- en stortbeleid te verminderen zijn er verschillende alternatieven van vaargeulbeheer bedacht. Niet alle alternatieven leenden zich voor simulatie met DELFT2D-MOR, zodat een selectie noodzakelijk was. Hieronder worden eerst de alternatieven gepresenteerd, daarna wordt een selectie gemaakt ten aanzien van de numerieke simulatie en ten slotte worden de resultaten van de geselecteerde simulaties met DELFT2D-MOR beschreven.

5.2 Alternatieven baggerwerkzaamheden

5.2.1 Variatie frequentie uitvoering baggerwerk

Momenteel wordt er min of meer continu gebaggerd in de Westerschelde. Het bagger- en stortwerk verstoort de natuur daardoor ook continu. Een mogelijkheid om de negatieve effecten van het baggerwerk te verminderen zou een verlaging van de frequentie van het uitvoeren van het baggerwerk kunnen zijn. Een consequentie van het verlagen van de frequentie is, dat telkens als er gebaggerd wordt, er een grotere hoeveelheid gebaggerd zal moeten worden. Deze frequentieverlaging zal leiden tot een toename van het baggerwerk per keer (dus ook meer stortwerk per keer). De vraag is echter of de totale jaarlijkse hoeveelheid zand die gebaggerd zal moeten worden, sterk zal veranderen als de baggerfrequentie wordt gevarieerd. Verlaging van de bagger- en stortfrequentie zou de ecologie van het bewuste gebied ten goede kunnen komen. Als voorbeeld van dit uitgangspunt kan gedacht worden aan seizoensbaggeren. Door te baggeren in seizoenen van lage(re) ecologische activiteit zouden de negatieve effecten van het baggeren en storten verminderd kunnen worden. Er moet met nadruk worden gesteld dat het effect van variatie van de bagger- en stortfrequentie op de ecologie nog onderzocht zal moeten worden.

5.2.2 Beïnvloeding lokale debietverdeling

Eén van de mechanismen van aanzanding op de drempel is de vertraging van de stroming ter plaatse van de (gebaggerde) drempel. Door de lagere stroomsnelheden nemen de sedimenttransporten op de drempel af en zal de drempel aanzanden. Een mogelijkheid om de hoeveelheid baggerwerk te verminderen is er voor te zorgen dat de stroming minder vertraagd ter hoogte van de drempel dan in de huidige situatie het geval is. De drempel zal in dat geval naar verwachting minder aanzanden. De lokale debietverdeling kan op verschillende wijzen worden beïnvloed. Er kan gebruik gemaakt worden van "harde" maatregelen of van "zachte" maatregelen.

1. Zachte maatregelen

Door het gebaggerde materiaal te storten in een nevengeul zal de stroming door de nevengeul enigszins verminderen. Daardoor zal de stroming over de drempel relatief groter worden. In het geval van de

Drempel van Hansweert kan gedacht worden aan storten in de Schaar van Waarde. Het materiaal kan eventueel afkomstig zijn van de drempel zelf (werk met werk maken). Het nadelige effect van storten in nevengeulen is echter de beperking van de natuurlijke dynamiek.

2. Harde maatregelen

Om de stroming meer over de drempel te leiden kan ook gebruik gemaakt worden van harde constructies. Leidammen en kribben kunnen de stroming meer over de drempel leiden en daardoor zal de natuurlijke evenwichtsdiepte wellicht toenemen en het baggerwerk afnemen. Het grote nadeel van deze harde constructies is dat de natuurlijke dynamiek van het estuarium afneemt. De stroming wordt gefixeerd en dat leidt tot een reductie van de dynamiek. Verder zal de transportcapaciteit over de drempel toenemen met als gevolg mogelijk meer sedimentatie.

5.2.3 Vergroting transportafstand

In de huidige baggerpraktijk wordt de baggerspecie op een afstand van slechts enkele kilometers van de winplaats teruggestort. Uit traceronderzoek is gebleken dat dit materiaal vaak snel weer op de oude plaats terug is (Pieters *et al.*, 1991; Storm, 1996). Een vergroting van de transportafstand zal er toe leiden dat het veel langer duurt voordat het materiaal weer op de oude plaats is teruggekeerd, of dat het gebaggerde materiaal de oude plaats helemaal niet meer bereikt. Door een vergroting van de transportafstand kan de hoeveelheid baggerwerk dus misschien worden beperkt. Ook geeft de vergroting van de transportafstand in het oostelijk deel van de Westerschelde een andere morfologie, doordat dit deel (bij het storten in het westelijk deel van de Westerschelde) verruimd wordt. Een gevolg hiervan kan zijn dat de plaatranden meer zand aan de geulen afgeven.

5.2.4 Grootschalige kombergingsvergroting

Grootschalige kombergingsvergroting zou kunnen leiden tot een diepere ligging van de drempel. De gedachte hierachter is als volgt: door een vergroting van de komberging landinwaarts van de drempel (bijvoorbeeld door ontpoldering) zal het getijvolume over de drempel toenemen. Dit zal leiden tot een vergroot doorstroomoppervlak, waardoor de hoeveelheid baggerwerk af zou kunnen nemen. De omvang van de vergroting van de komberging en de lokatie in het estuarium bepaalt het effect. De huidige plannen voor kombergingsvergroting (met name in België, zie Arends & Les, 1997) zullen gezien de ligging ten opzichte van de Drempel van Hansweert nauwelijks effect hebben op de debieten bij de Drempel van Hansweert.

5.2.5 Baggeren midden in de vaargeul

In de huidige baggerstrategie is het gebruikelijk om langs de rand van de vaargeul te baggeren. Als in het midden van de vaargeul wordt gebaggerd, worden eb- en vloedstroom op de drempel meer naar elkaar toe getrokken en zal door convergentie het sedimenttransport toenemen. Dit kan een diepere evenwichtsligging van de drempel tot gevolg hebben.

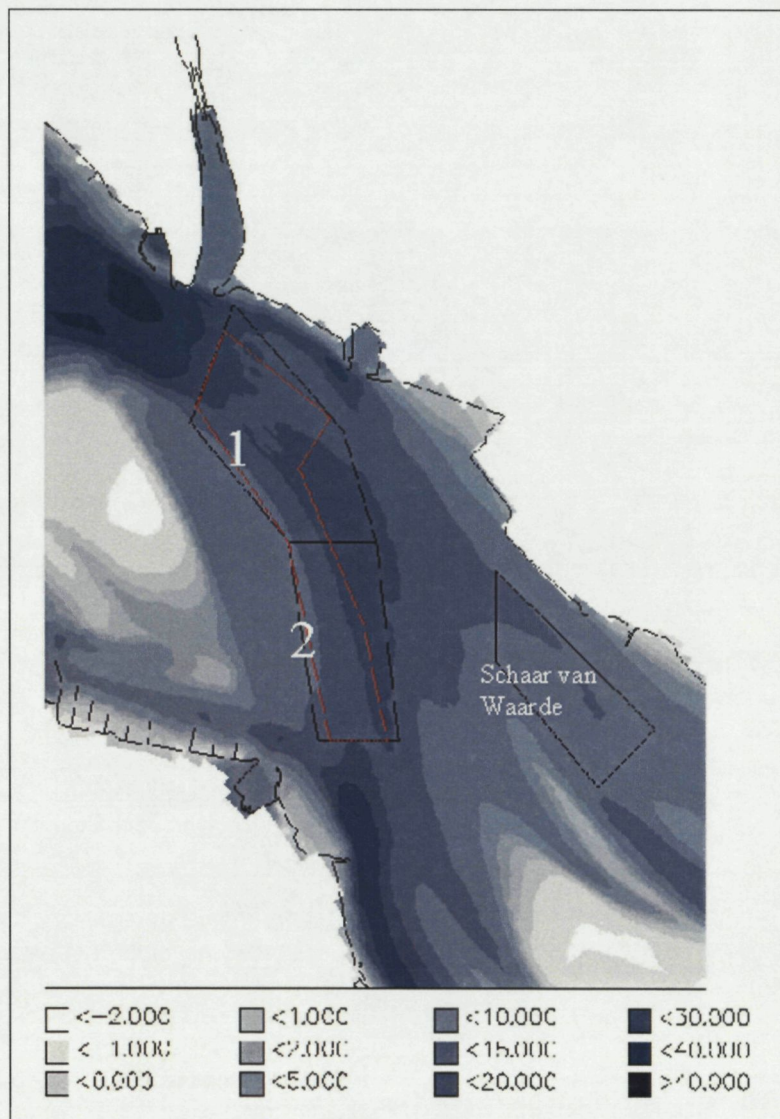
5.2.6 Zandwinning

Naast het verder weg storten van het gebaggerde materiaal (in het westelijk deel van de Westerschelde) kan ook een verruiming van het oostelijk deel bereikt worden door grootschalige zandwinning. Zeker de combinatie van baggerwerk en zandwinning is aantrekkelijk, omdat dan slechts eenmalig ingegrepen wordt.

5.3 Opzet berekeningen

Code	Omschrijving	Baggergebied	Stortgebied	Frequentie (per jaar)
0	Autonome ontwikkeling	-	-	-
1a	Huidige baggerstrategie	baggervak	-	12
1b	Huidige baggeromvang jaarlijks baggeren	baggervak	-	1
2a	Maandelijks baggeren en storten	baggervak	Schaar van Waarde	12
2b	Jaarlijks baggeren en storten	baggervak	Schaar van Waarde	1
3a	Maandelijks baggeren in het gehele drempelvak	drempelvak	-	12
3b	Jaarlijks baggeren in het gehele drempelvak	drempelvak	-	1
4a	Maandelijks storten in de Schaar van Waarde	-	Schaar van Waarde	12
4b	Jaarlijks storten in de Schaar van Waarde	-	Schaar van Waarde	1
5	Leidam in de Schaar van Waarde	-	-	-

Tabel 5.1
Overzicht van de berekeningen met DELFT2D-MOR.



Figuur 5.1
Lokatie van de (1) bagger- en (2) stortgebieden bij de simulaties.

In de voorgaande paragraaf zijn verschillende alternatieven benoemd. Door de keuze van het DELFT2D-MOR systeem zijn er beperkingen ten aanzien van de mogelijke simulaties. Vooraf is bepaald dat de simulaties binnen een tijdschaal van 1 jaar en rond het drempelgebied tot een significante morfologische verandering moeten kunnen leiden. Hierdoor is de selectie van alternatieven beperkt tot:

1. de lokatie van het baggergebied
2. de lokatie van het stortgebied
3. de frequentie van het baggeren c.q. storten

In tabel 5.1 wordt een overzicht gegeven van de uitgevoerde modelberekeningen.

De verschillende lokaties van de bagger- en stortgebieden staan afgebeeld in figuur 5.1. De jaarlijkse totale hoeveelheid baggerwerk is bij de diverse alternatieven constant gehouden (namelijk $2,65 \text{ Mm}^3/\text{jr}$). Dit is gedaan om de resultaten onderling vergelijkbaar te maken.

0. Autonome ontwikkeling: geen bagger- en stortwerk

De simulatie van de autonome ontwikkeling is reeds beschreven in hoofdstuk 4. Met de autonome ontwikkeling wordt de morfodynamische ontwikkeling zonder menselijk ingrepen verstaan.

1a. Huidige baggerstrategie: maandelijks baggeren

De huidige baggerstrategie is gesimuleerd door 12 maal per jaar in het gedefinieerde baggervak de bodem met ongeveer 0,11 m te verdiepen. Totaal komt de verdieping per jaar overeen met een gebaggerde hoeveelheid van $2,65 \text{ Mm}^3$. De simulatie van de huidige baggerstrategie is reeds beschreven in het vorige hoofdstuk.

1b. Variatie frequentie baggerwerk: jaarlijks baggeren

Bij deze berekening wordt er in plaats van 12 maal per jaar, 1 maal per jaar gebaggerd. Voor aanvang van de berekening wordt in het baggervak $2,65 \text{ Mm}^3$ gebaggerd. Dit komt overeen met een verdieping van het baggervak met 1,28 m in het baggervak en een gemiddelde verdieping van het omhullende drempelvak van 0,82 m.

2a. Maandelijks baggeren en storten

Het verschil tussen deze berekening en de simulatie van de huidige baggerstrategie is dat er nu wel gestort wordt, namelijk in de Schaar van Waarde (figuur 5.1). Het gebied in de Schaar van Waarde heeft een oppervlak van $1,15 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Maandelijks zal in dit gebied dan $2,65 / 12 = 0,22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ gestort worden. Dit komt overeen met een verondieping van $0,22 / 1,15 = 0,19 \text{ m}$ per maand. Met het storten in de Schaar van Waarde wordt beoogd de lokale debietverdeling te beïnvloeden.

2b. Jaarlijks baggeren en storten

Dit alternatief vertoont overeenkomsten met berekening 2a, met dit verschil dat nu de jaarlijkse hoeveelheid in één keer gebaggerd en gestort wordt. De bodemdpte in het stortvak in de Schaar van Waarde zal hierdoor met $2,65 / 1,15 = 2,30 \text{ m}$ afnemen.

3a. Vergroot baggervak: maandelijks baggeren

Bij deze berekening wordt het effect van de grootte van het baggervak onderzocht door met een vergroot baggervak te rekenen. Het vergrote baggervak is gelijk aan het gedefinieerde drempelvak in plaats van het eerder gedefinieerde baggervak (figuur 5.1). De bodem wordt maandelijks verlaagd en het "gebaggerde" zand wordt niet teruggestort.

3b. Vergroot baggervak: jaarlijks baggeren

Deze berekening lijkt op het vorige alternatief, maar met dit verschil dat de jaarlijkse hoeveelheid in een keer wordt gebaggerd.

4a. Storten Schaar van Waarde: maandelijks storten

Bij deze berekening wordt het effect van alleen het maandelijks storten in de Schaar van Waarde onderzocht.

4b. Storten Schaar van Waarde: jaarlijks storten

Bij de berekening wordt het effect van alleen het jaarlijks storten in de Schaar van Waarde onderzocht.

5. Leidam

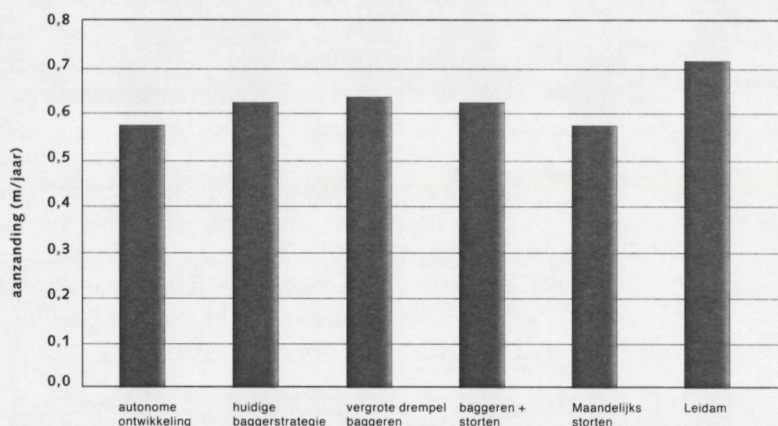
Een leidam in de Schaar van Waarde blokkeert in zekere mate de eb- en vloedstroming door de nevengeul. Bij dit alternatief is een leidam aangelegd met een kruinhoogte van 2 meter onder N.A.P. met een zogenaamde "fixed bottom". Dit laatste betekent dat er wel sedimentatie op de leidam kan plaatsvinden, maar dat er geen erosie beneden 2 meter onder N.A.P. kan optreden.

5.4 Resultaten berekeningen

Om de resultaten van de verschillende berekeningen met elkaar te vergelijken zijn de aanzandingssnelheden in het drempelvak met elkaar vergeleken. De berekeningen waarbij gebaggerd werd zijn gecorrigeerd voor de hoeveelheden baggerwerk. Er wordt alleen maar nagegaan hoe snel de drempel aanzandt tussen de "baggerwerkzaamheden" door.

Figuur 5.2 vergelijkt de autonome ontwikkeling met de ontwikkelingen ten gevolge van het maandelijks baggeren en/of storten. Te zien is dat bij de simulatie van de autonome ontwikkeling het drempelvak het minst aanzandt (0,57 m/jaar). Als er alleen gebaggerd wordt, zandt de drempel meer aan (0,62 m/jaar). Dit lijkt een logisch effect omdat door het baggeren de bodem ter plaatse van de drempel verdiept en de stroomsnelheden daardoor afnemen. Deze afname zal leiden tot een toename van de sedimentatie.

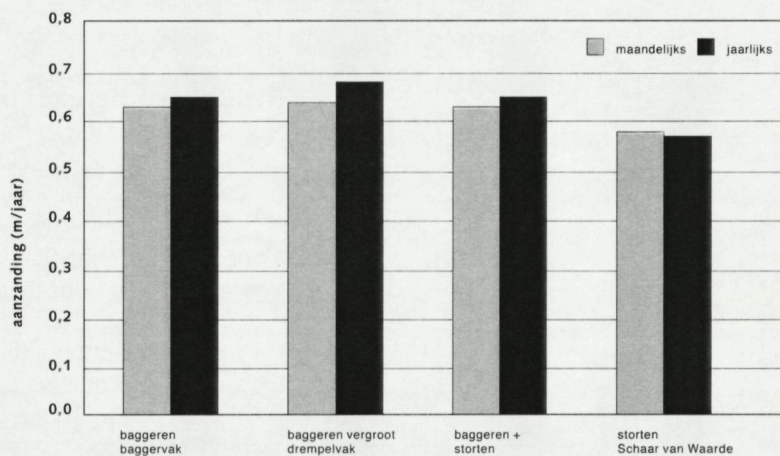
Figuur 5.2
Vergelijking tussen verschillende alternatieven bij maandelijks bagger/stortwerk.



Als er gebaggerd wordt in het vergrote baggervak, zandt de drempel iets meer aan (0,63 m/jaar). Wanneer er maandelijks gebaggerd en gestort wordt, zandt de drempel evenveel aan als in het geval waarin alleen gebaggerd wordt (0,62 m/jaar). Wanneer er niet gebaggerd wordt en alleen gestort wordt in de Schaar van Waarde, zandt de drempel aan met 0,57 m/jaar. Dit is gelijk aan de aanzanding in het drempelvak in geval van de berekening van de autonome ontwikkeling. Het storten in de Schaar van Waarde lijkt vooralsnog weinig effect te hebben. Bij de leidam is de aanzanding het grootst (0,71 m/jaar) door de toegenomen sedimenttransportcapaciteit over de drempel.

Bij alle berekeningen bleek de gemiddelde bodemontwikkeling in de tijd nagenoeg lineair te verlopen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de drempel dermate ver uit evenwicht is (vanwege het baggerwerk door de jaren heen), dat het "lijkt" of de respons bijna lineair is. Met andere woorden, het tijdsdomein dat onderzocht is, is relatief kort ten opzichte van de morfologische tijdschaal.

Figuur 5.3
Vergelijking tussen alternatieven bij maandelijks en jaarlijks bagger/stortwerk.

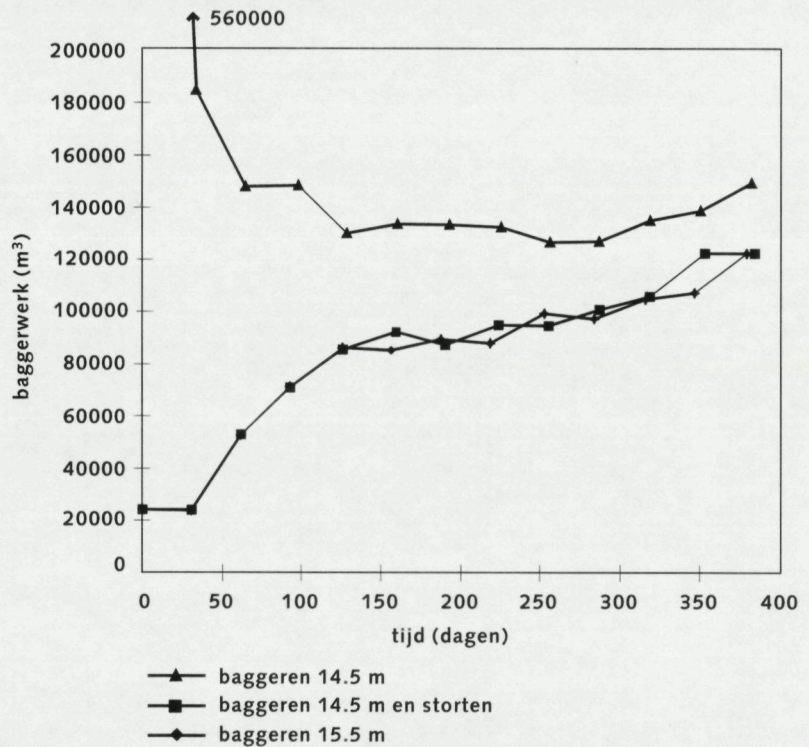


In figuur 5.3 wordt de vergelijking tussen maandelijks en jaarlijks baggeren en/of storten gemaakt. De trends in het drempelvak zijn gecorrigeerd voor de hoeveelheid baggerwerk. Er wordt dus gekeken hoe snel het baggervak weer aanzandt. Te zien is dat in de eerste drie gevallen jaarlijks baggeren iets meer aanzanding in het baggervak geeft dan maandelijks baggeren. Bij de berekeningen van het jaarlijks baggeren wordt de drempel eerst op overdiepte gebracht en zandt daardoor sneller aan. Als er maandelijks gebaggerd wordt op de drempel bedraagt de aanzanding 0,62 m/jaar; bij jaarlijks baggeren is dat 0,64 m/jaar. Het verschil is dus erg klein. Als er gebaggerd en gestort wordt, bedraagt de trend bij maandelijks baggeren en storten 0,62 m/jaar en bij jaarlijks baggeren en storten 0,64 m/jaar. Als er gebaggerd wordt in het vergrote drempelvak bedraagt de aanzanding bij maandelijks baggeren 0,63 m/jaar en bij jaarlijks baggeren 0,67 m/jaar.

Wanneer er alleen gestort wordt in de Schaar van Waarde blijkt uit de berekening dat als de jaarlijkse hoeveelheid stortmateriaal in één keer in de Schaar van Waarde wordt gestort de drempel iets langzamer aanzandt (0,56 m/jaar) dan in het geval van de autonome ontwikkeling. Storten in de Schaar van Waarde lijkt in dit geval de aanzanding dus enigszins te verminderen. De verschillen zijn echter miniem.

In aanvulling op het bovenstaande is ook gekeken naar de baggeromvang als alleen de vaargeul met een breedte van 300 m gebaggerd wordt (Groenewoud, 1998). Dit is gedaan voor een vaargeuldiepte van N.A.P. -14,5 m en N.A.P. -15,5 m. Uit deze berekening blijkt dat na een inspeelperiode het baggerwerk stijgt tot zo'n 0.10 - 0.15 Mm³/maand (figuur 5.4). Op jaarbasis wordt bij een vaargeul op -14,5 m slechts 1,1 Mm³ gebaggerd. Dit is veel minder dan het gemiddelde baggerwerk over 1990-1996 (2.65 Mm³/jaar).

Figuur 5.4
Omvang van het baggerwerk als enkel de vaargeul gebaggerd wordt.



Het verschil ontstaat met name door de beperking van het baggerwerk tot de vaargeul, waarbij de randen hard gedefinieerd zijn. Ook het ankergebied ten noordoosten van de Drempel van Hansweert is bij deze variant niet meegebaggerd. Opvallend is dat de aanzanding met name in de binnenbocht langs het Plateau van Ossensisse plaatsvindt (Groenewoud, 1998).

6. Conclusies over drempels onder invloed van baggerwerk

6.1 De morfodynamica van de Drempel van Hansweert

Het morfologisch gedrag van de Drempel van Hansweert wordt volledig bepaald door de getijstroming. Hierbij spelen 3 duidelijke mechanismen een belangrijke rol:

1. door ruimtelijke scheiding van de stroombanen van eb en vloed wordt de dwarsdoorsnede ter plaatse van de drempel niet effectief gebruikt;
2. door de verdeling van het getijvolume over de drempel en nevengeul stroomt niet al het water over de drempel;
3. door de divergentie van de stroming tijdens vloed aan de noordelijke zijde van de Drempel van Hansweert ontstaat hier een breed en relatief ondiep dwarsprofiel; op het zuidelijke deel van de drempel vindt er tijdens eb geen tot nauwelijks divergentie plaats.

De verdeling van het getijvolume op de Drempel van Hansweert wordt de laatste 40 jaar gestuurd door baggerwerken op de drempel en stortingen in de Schaar van Waarde. Hierdoor is de verdeling van het getijvolume over hoofd- en nevengeul aanzienlijk veranderd: het getijvolume over de drempel is aanzienlijk toegenomen. Toch is de drempel nog steeds uit evenwicht met het nieuwe getijvolume: door het continue baggerwerk is deze te ruim. Omdat de Drempel van Hansweert verdiept wordt is de dwarsdoorsnede lokaal te ruim. Dit induceert een gerelateerd sedimenttransportproces. Tijdens dit onderzoek zijn de volgende processen onderscheiden:

1. het residueel zandtransport door ruimtelijke onder- en oververzadiging, waardoor netto aanzanding op de drempel plaatsvindt;
2. de aanzanding door getij-asymmetrie leidt tot aanzanding vanuit het noorden omdat op de drempel vloedgedomineerd zandtransport plaatsvindt;
3. binnen een getij en in de breedte van de geul heeft de secundaire stroming invloed op het patroon van aanzanding.

De aanzandingssnelheid van de verdiepte drempel gedurende een maand is ongeveer van gelijke omvang als de maandelijkse baggerhoeveelheden (Tank, 1997^c). Uit berekeningen met DELFT2D-MOR van de verdiepte Drempel van Hansweert blijkt dat deze aanzanding nagenoeg lineair verloopt (Groenewoud, 1997). De aanzanding is het grootst op de plaatsen waar recentelijk is gebaggerd.

6.2 Alternatieven voor het baggerwerk

Binnen dit onderzoek zijn een aantal alternatieven voor het baggerwerk gegenereerd en nader beschreven:

- variatie in de frequentie van het baggerwerk
- beïnvloeding van de lokale debietverdeling door
 - zachte maatregelen
 - harde maatregelen

- vergroting van de transportafstand
- grootschalige kombergingsvergroting
- baggeren midden in de vaargeul
- constructie van een leidam

Met het numerieke model zijn alleen de varianten doorgerekend gebaseerd op (a) variatie in de frequentie van het baggerwerk en (b) beïnvloeding van de lokale debietverdeling. Uit de berekeningen blijkt als eerste dat volgens de berekeningen de effecten van de variatie van baggerlocatie, stortlocatie en baggerfrequentie op de mate van aanzanding van de drempel relatief klein zijn. De mate van aanzanding schommelt bij de berekeningen rond de 0,6 m/jaar (na correctie voor het baggerwerk).

Als er jaarlijks wordt gebaggerd in plaats van maandelijks neemt de jaarlijkse aanzanding toe, echter in relatief geringe mate (3 - 6 %). Een verlaging van de frequentie van het baggerwerk behoort dus op basis van de berekeningen tot de mogelijkheden om de negatieve gevolgen van het huidige baggerwerk te verminderen.

Het stortwerk blijkt ondergeschikt te zijn aan het baggerwerk, maar het werkt wel modifierend op de omvang van het baggerwerk. Storten in de Schaar van Waarde vermindert het baggerwerk nauwelijks. De berekening waarbij de jaarlijkse hoeveelheid in één keer in de Schaar van Waarde werd gestort, zonder dat er baggerwerk op de Drempel van Hansweert werd uitgevoerd heeft wel een iets kleinere aanzanding op de drempel tot gevolg dan in het geval van de autonome ontwikkeling.

Op basis van de modelresultaten geeft een beperking van het baggerwerk tot alleen de vaargeul een veel grotere reductie van de baggeromvang. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat dit baggerwerk over de periode van 1 jaar bleef toenemen. Hieruit blijkt dat de morfologische aanpassing op dit type baggerwerk nog niet bereikt was.

De modelvariant met de leidam gaf een sterke verhoging van de aanzanding op de drempel te zien met zo'n 25%. Dit komt doordat de stroming in deze variant meer over de drempel wordt gedwongen, waardoor de transportcapaciteit lokaal toeneemt. Op de verdiepte drempel (die morfologisch uit evenwicht is) leidt dit tot een versterkte sedimentatie. Dit alternatief geeft daarnaast een beperkte morfodynamiek van de nevengeulen te zien.

6.3 Alternatieven voor beheer

Met de kennis, die in het kader van het drempelonderzoek is verzameld, kunnen in de komende tijd verschillende alternatieven voor het baggerwerk op de drempels in de Westerschelde uitgewerkt worden. De berekeningen, zoals gepresenteerd in dit rapport, hebben daarnaast de mogelijkheden van het huidige modelinstrumentarium aangetoond. Er zijn enige alternatieven voor het baggerwerk doorgerekend met dit instrumentarium en de resultaten geven aan wat het effect op de omvang van de aanzanding of het baggerwerk is. Als in de komende tijd nieuwe alternatieven gegenereerd worden kunnen ook deze met het genoemde instrumentarium doorgerekend worden en kan het effect op de omvang van het baggerwerk bepaald worden.

Het gebruikte modelinstrumentarium kent echter haar beperkingen. Zo zijn tot nu toe geen varianten langer dan 1 jaar gemodelleerd. Verder zijn slechts een beperkt aantal varianten doorgerekend. In feite is alleen sprake van enige korte termijn voorspellingen op basis van het modelinstrumentarium. Maar in het kader van het drempelonderzoek is ook niet expliciet gewerkt aan het genereren van alternatieven voor het beheer. Op basis van dit kennisdocument kan de beheerder zelf haar keuzes maken.

6.4 Mogelijkheden voor nader onderzoek

Bij het drempelonderzoek zijn veel nieuwe dingen bekend geworden en is er een verbeterd begrip van het morfodynamisch gedrag van drempels in de Westerschelde opgebouwd. Op het punt van kennisontwikkeling en op het punt van beheersondersteuning is grote vooruitgang geboekt. Er blijven echter altijd nieuwe punten van onderzoek over. Hieronder worden de belangrijkste genoemd.

Een nog niet eerder genoemde en weliswaar niet actieve factor in het morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert is de dijkconfiguratie en de bestortingen van geulwanden. De dijken en de geulwandverdedigingen leggen een limiet op aan de mechanismen. Met name het mechanisme ruimtelijke scheiding van eb- en vloedstroomlijnen wordt hierdoor beïnvloed. Het uitbochten van de geulen wordt hierdoor beperkt waardoor de scheiding tussen eb- en vloedstroombanen niet wordt vergroot. Een tweede en minder belangrijk effect is dat door de dijken en de geulwandverdedigingen de secundaire stroming niet meer in het horizontale maar in het verticale vlak werkt waardoor de geulen dieper worden.

De resultaten van de berekeningen met DELFT2D-MOR zijn goed te noemen. Het wordt echter aanbevolen de huidige berekeningen verder te analyseren en een gevoeligheidsanalyse uit te voeren met betrekking tot de verschillende parameters in het model. Met name secundaire stromingseffecten en de invloed van onder- en oververzadiging moeten nader bestudeerd worden, onder andere door gebruik van suspensief transport in plaats van totaal transport. Op deze wijze kunnen de modelresultaten verder verbeterd worden en wordt meer inzicht verkregen in het effect van de diverse parameters. In het kader van modelontwikkeling binnen het cluster Structuur van het klantenplan Zeeland wordt momenteel gewerkt aan de interpretatie van de 3D waterbeweging en het hieraan gekoppelde sedimenttransport. Dit proces moet leiden tot een gevalideerd morfologisch model voor de Westerschelde.

Het hier gepresenteerde onderzoek is uitgevoerd voordat de 48'/43'-verdieping in gang is gezet. Voorgesteld wordt om de ontwikkeling rond deze verdieping door te rekenen met het modelinstrumentarium. Hiervoor zal het wel nodig zijn om de stabiliteit van de oplossing op de middellange termijn nader te onderzoeken. Dit kan door een vergelijking te maken met ander soortige modellen zoals een gekoppeld proces-empirisch model (bijvoorbeeld ESTMORF). Bij dit laatste modeltype wordt de empirische relatie over getijvolumes en geuldoorsneden gekoppeld met een procesmatige berekening van het geïnduceerde sedimenttransport.

7. Gerealiseerde producten binnen het Drempelonderzoek

Rijkswaterstaat, directie Zeeland

D. Louws, 1995^a. Meetplan Drempelmetingen Drempel van Hansweert t.b.v. verdieping Westerschelde en introductie H.F. radar stroommetingen, ZLMD-95.M.016, september 1995.

D. Louws, 1995^b. 2^e Meetplan Drempel van Hansweert t.b.v. introductie H.F. radar stroommetingen, 15 november t/m 19 december 1995.

D. Louws, 1996. Meetplan Drempelmetingen 1996 Drempel van Hansweert t.b.v. introductie H.F. radar stroommetingen, ZLMD-96.M.007, februari 1996.

Meetdienst, 1995. Stroom- en sedimentmeting Drempel van Hansweert (raai F, G, H, J) 23 oktober 1995, notitie ZLMD-95.N.027, afdeling AXMH, december 1995

Meetdienst, 1996^a. OSM-meting Drempel van Hansweert (detailmeting I) 29 september t/m 29 oktober 1995, notitie ZLMD-95.N.028, afdeling AXMH, januari 1996

Meetdienst, 1996^b. Debiet- en sedimentmeting Drempel van Hansweert (raai C) 25 oktober 1995, notitie ZLMD-95.N.031, afdeling AXMH, januari 1996

Meetdienst, 1996^c. Debietmeting (ADCP) Drempel van Hansweert (raai B en C) 3 november 1995, notitie ZLMD-95.N.039, afdeling AXMH, mei 1996

Meetdienst, 1996^d. Debietmeting (ADCP) Drempel van Hansweert (raai E) 6 november 1995, notitie ZLMD-95.N.040, afdeling AXMH, mei 1996

Meetdienst, 1996^e. Debiet- en sedimentmeting Drempel van Hansweert (raai B' en Dz) 17 april 1996, notitie ZLMD-96.N.010, afdeling AXMH, juli 1996

Meetdienst, 1996^f. Stroombaanmeting (eb) Drempel van Hansweert 24 april 1996, notitie ZLMD-96.N.020, afdeling AXMH, oktober 1996

Meetdienst, 1996^g. Stroombaanmeting (vloed) Drempel van Hansweert 21 mei 1996, notitie ZLMD-96.N.021, afdeling AXMH, oktober 1996

Meetdienst, 1996^h. Stroom- en sedimentmeting Drempel van Hansweert (raai M) 16 september 1996, notitie ZLMD-96.N.022, afdeling AXMH, oktober 1996

Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek^{Δ39}

Sistermans, P., 1995. Metingen Drempel van Hansweert, meetplan, Technische Universiteit Delft, Vakgroep Waterbouwkunde, september 1995.

Groenewoud, M.D., 1997. Modelling morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 1: Modelbouw en simulatie huidige situatie. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde.

Groenewoud, M.D. & F.T.G. Tank, 1997. Modelling morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 2: Alternatieven voor baggerwerk. TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde.

Groenewoud, M.D., F.T.G. Tank, J.A. Roelvink, J. van de Graaff & H. Verbeek, 1997. Modelling of the morphodynamics of a sill in the Scheldt Estuary, Combined Australasian Coastal Engineering and Ports Conference, Christchurch, New Zealand, vol II, 637-642.

Wouters, C.A.H., 1997. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Toetsing van hypothesen en beschrijvend morfodynamisch model van de Drempels van Bath en Valkenisse. Stagerapport Technische Universiteit Delft, Vakgroep Waterbouwkunde, in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-97.831x

Universiteit Utrecht, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek

Tank, F.T.G., 1995. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Een verkennende studie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 95-18.

Tank, F.T.G., 1996^a. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Literatuurstudie en hypothesen. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 96-07.

Tank, F.T.G., 1996^b. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Parameterisatie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 96-08.

Tank, F.T.G., 1997^a. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de waterbeweging op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-01.

Tank, F.T.G., 1997^b. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-08.

Tank, F.T.G., 1997^c. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de morfologie op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-09.

Tank, F.T.G., 1997^d. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Een conceptueel morfodynamisch model - Toetsing hypothesen. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-14.

Tank, F.T.G., P.G.J. Sijm, M.D. Groenewoud & H. Verbeek, 1997. The morphodynamics of a sill in the Scheldt Estuary (The Netherlands) and the influence of maintenance dredging activities, XXVII IAHR congress "Water for a changing global community", San Francisco, Theme B, vol I, 695-700.

8. Literatuur

Arends, A.A. & B.A.J. Les, 1997, Toelaten van een gecontroleerd gereduceerd getij in de Kruibeke polder, Rijksinstituut voor Kust en Zee & Svasek b.v., werkdocument RIKZ/AB-97.848x.

Bathurst, J.C., C.R. Thorne & R.D. Hey, 1979. Secondary flow and shear stress at river bends. *Journal of the Hydraulics Division*, HY10, 1277 - 1295.

Berg, J.H. van den, M.C.J.L. Jeuken & A.J.F. van der Spek, 1996, Hydraulic processes affecting the morphology and evolution of the Westerschelde estuary, *Estuarine Shores: Evolution, Environments and Human Alterations*, Chapter 7, Edited by K.F. Nordstrom & C.T. Roman, John Wiley & Sons Ltd.

Blik, A.J. & M.N. Ruijter, 1994. Verklarend onderzoek drempels Westerschelde. Ingenieursbureau Svasek, project 940.

Dam, G., 1997. De vergelijking van HF-radar met andere stromingsgegevens. Een onderzoek naar de HF-radar metingen bij de locatie Hansweert. Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee. Stageverslag, RIKZ/OS-97.820X.

Gerritsen & de Jong, 1983. Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde, Rijkswaterstaat/Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Nota WWKZ-83.V008.

Groenewoud, M.D., 1997. Modelling morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 1: Modelbouw en simulatie huidige situatie. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde.

Groenewoud, M.D. & F.T.G. Tank, 1997. Modelling morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Fase 2: Alternatieven voor baggerwerk. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde.

Groenewoud, M.D., 1998. Modelling morfodynamisch gedrag van de Drempel van Hansweert. Aanvullende berekeningen. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde.

Huijs, S.W.E., 1997. Baggerinspanning bij verdieping '48/'43. Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, Afdeling Rivierkunde (NWL), Notitie NWL-97.21, 6 p.

Israel, C., 1997. Modelling van het sedimenttransport over de Plaat van Ossensisse in de Westerschelde, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Waterbouwkunde.

Jansen, M.H.P., 1998. Validatie TRISCAL en aanzet sedimenttransport, t.b.v. Project Verdieping. Rapportage Activiteit C. Ingenieursbureau Svasek bv, projectnr. 1011.

Jong, H. de, 1989. Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932 (voorlopige versie). Rijkswaterstaat/Dienst Getijdewateren, Nota GWAO-89.1004.

Kleef, A.W. van, 1994. Verklaring voor de veranderingen in de grootschalige zandbalans van het gebied rond het Middelgat, Westerschelde. Rijkswaterstaat/Directie Zeeland.

Louws, D., 1995. Meetplan Drempelmetingen Drempel van Hansweert t.b.v. verdieping Westerschelde en introductie H.F. radar stroommetingen, ZLMD-95.M.016, september 1995.

Louws, D., 1996. Meetplan Drempelmetingen 1996 Drempel van Hansweert t.b.v. introductie H.F. radar stroommetingen, ZLMD-96.M.007, februari 1996.

Mol, G., 1995. De Westerschelde: een resultaat van menselijke ingrepen. Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rapport RIKZ-95.030.

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, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rapport RIKZ-97.049.

Pieters, T., C. Storm, T. Walhout & T.Ysebaert, 1991. Het Schelde-estuarium, méér dan een vaarweg, rapportage van een pilotstudie naar de ontwikkelingen van de fysische structuur van het Schelde-estuarium, Rijkswaterstaat/Dienst Getijdewateren, nota GWWS-91.081.

Rijn, L.C. van, 1984^a. Sediment transport, part I: bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 10, 1431-1456.

Rijn, L.C. van, 1984^b. Sediment transport, part II: suspended load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 11, 1613-1641.

Rijn, L.C. van, 1984^c. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 12, 1733-1754.

Sistermans, P., 1995. Metingen Drempel van Hansweert, meetplan, Technische Universiteit Delft, Vakgroep Waterbouwkunde, september 1995.

Storm, C., 1996. Residuele zandtransporten in de Westerschelde. Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee. RIKZ-Werkdocument OS-96.837X, 72 p.

Tank, F.T.G., 1995. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Een verkennende studie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 95-18.

Tank, F.T.G., 1996^a. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Literatuurstudie en hypothesen. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 96-07.

Tank, F.T.G., 1996^b. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Parameterisatie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 96-08.

Tank, F.T.G., 1997^a. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de waterbeweging op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-01.

Tank, F.T.G., 1997^b. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van zandtransportmetingen op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-08.

Tank, F.T.G., 1997^c. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Beschrijving en analyse van metingen van de morfologie op en rondom de Drempel van Hansweert. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-09.

Tank, F.T.G., 1997^d. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Een conceptueel morfodynamisch model - Toetsing hypothesen. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 97-14.

Veen, J. van, 1950. Eb- en vloed-schaar systemen in de Nederlandse getijwateren. Tijdschrift KNAG, 2e reeks, deel 67, pp. 303-325.

Verbeek, H. 1998. Morfologisch onderzoek van de Westerschelde, overzicht modelinstrumentarium, Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS 98.804x.

Vroon, J.H., C. Storm & J. Coosen, 1997. Westerschelde, stram of struis? Eindrap-port van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rijkswaterstaat/RIKZ, Rapport RIKZ-97.023

Wouters, C.A.H., 1997. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Toetsing van hypothesen en beschrijvend morfodynamisch model van de Drempels van Bath en Valkenisse. Stagerapport Technische Universiteit Delft, Vakgroep Waterbouwkunde, in opdracht van het Rijksinstituut voor Kust en Zee, werkdocument RIKZ/OS-97.831x.

Wouters, C.A.H., 1998. Drempel van Valkenisse, afstudeeronderzoek naar mechanismen die bijdragen aan de vorming van de Drempel van Valkenisse, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek.

WL, 1997. DELFT3D-mor, User Guide version 0.1.

