

Residuele zandtransporten in de Westerschelde

drs. C. Storm¹

RIKZ Werkdocument OS-96.837X

december 1996

Project Oostwest

Rijksinstituut voor Kust en Zee /RIKZ

¹ thans werkzaam bij Rijkswaterstaat Directie Zeeland

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
0 Samenvatting	6
1 Inleiding	8
2 Zandtransporten in estuaria	9
2.1 Transportcyclus van zand	9
2.2 Resuspensie, concentratie en depositie	9
2.3 ZandTransporten	10
2.3.1 Bodem- en suspensietransporten	10
2.3.2 Temporele variaties	10
2.3.3 Ruimtelijke variaties	10
2.4 Gemeten en berekende zandtransporten in de Westerschelde	11
3 Zandtransportpaden in de Westerschelde	17
3.1 Residuele zandtransporten afgeleid uit zandbalansen	17
3.2 Transportpaden volgens de McLaren trendanalyse	17
3.3 Reststromen afgeleid uit een waterbewegingsmodel	18
3.4 Transportrichtingen uit asymmetrie zandgolven	19
3.5 Synthese transportpaden	19
4 Mechanismen voor residuele zandtransporten in estuaria	28
4.1 Inleiding	28
4.2 Residueel zandtransport door asymmetrie in de waterbeweging	28
4.2.1 Getij-asymmetrie	28
4.2.2 Getijgedreven Residuele Strooming (GRS)	29
4.2.3 Dichtheidsstrooming	30
4.3 Residueel zandtransport door asymmetrie in depositie- en resuspensieprocessen	30
4.3.1 Settling lag en scour lag	30
4.3.2 Onder- en oververzadiging	31
4.4 Residueel zandtransport door golfwerking	32
5 Kwantificering zandtransportmechanismen in de Westerschelde	41
5.1 Inleiding	41
5.2 Getij-asymmetrie versus Getijgedreven Residuele Strooming	41
5.3 Onder- en oververzadigingen	43
5.4 Maatgevende mechanismen voor de residuele zandtransporten in de Westerschelde	45
6 Case studies Westerschelde	55
6.1 Retourstroming Stortplaats Konijnenschor naar de Drempel van Valkenisse en Bath	55
6.2 Retourstroming Platen van Hulst naar de Drempel van Hansweert	55
6.3 Effect vergroting getijvolumina op aanzanding drempel	56
6.4 Afname baggervolumina door vergroten afstand tussen bagger- en stortlocaties	57
7 Conclusies	66
8 Aanbevelingen	68
9 Referenties	69

Lijst van Figuren

Figuur 2.1	Overschrijdingsduren van 0,25 en 0,5 m/s voor debietraaien 3 en 5a; najaar 1990.	13
Figuur 2.2	Ligging debietraaien 3 en 5a en meetlocaties.	14
Figuur 2.3	Vertragingseffecten geïllustreerd door variaties in suspensieconcentraties als een functie van de getijstroming gedurende één getijcyclus: dichte lijnen resuspensiefase; onderbroken lijnen afzettingsfase; stippellijnen overgang (Nichols and Biggs, 1985).	14
Figuur 2.4	Ligging debietraaien Westerschelde.	15
Figuur 2.5	Berekende en gemeten zandtransporten voor metingen in de Overloop van Valkenisse van 5 september 1990.	16
Figuur 3.1	Vakindeling Zandbalans Westerschelde (Uit den Bogaard, 1995).	21
Figuur 3.2	Vijfjaarlijkse resultaten zandbalans Westerschelde 1955-1990 volgens trendlijnen (Uit den Bogaard, 1995).	21
Figuur 3.3	Transportpaden voor het residuele zandtransport in het westelijk deel van de Westerschelde bepaald volgens de McLaren methode (McLaren en Powys, 1993).	22
Figuur 3.4	Transportpaden voor het residuele zandtransport in het oostelijk deel van de Westerschelde bepaald volgens de McLaren methode (McLaren en Powys, 1994).	23
Figuur 3.5	Transportpaden voor het residuele zandtransport in de Beneden Zeeschelde bepaald volgens de McLaren methode (McLaren en Powys, 1994).	24
Figuur 3.6	Euleriaanse resstromen (water) voor een gemiddeld getij in het westelijk deel van de Westerschelde berekend met het numerieke waterbewegingsmodel DETWES; $2\frac{1}{2}$ grids = $1 \text{ m}^2/\text{s}$ (Van der Male, 1993).	25
Figuur 3.7	Euleriaanse resstromen (water) voor een gemiddeld getij in het oostelijk deel van de Westerschelde berekend met het numerieke waterbewegingsmodel DETWES; $2\frac{1}{2}$ grids = $1 \text{ m}^2/\text{s}$ (Van der Male, 1993).	26
Figuur 3.8	Residuele zandtransportpaden in het oostelijk deel van de Westerschelde afgeleid uit sonar- waarnemingen (Ruessink, 1991) en luchtfotointerpretaties (Asselman, 1991).	27
Figuur 4.1	Schematisch model van residueel transport en trapping aangedreven door het getij en de rivierafvoer in een macrogetijd estuarium met een matig ontwikkelde dichtheidsstroming (Allen et al, 1980).	33
Figuur 4.2	De geometrie van twee schematisaties (b en c) met een diep en ondiep gedeelte (c is dieper dan b met name de geulsectie) en modelresultaten voor deze schematisaties (d en e) met de ratio van de verticaal- gemiddelde stroomsnelheden van maximum vloed en maximum eb (Friedrichs et al., 1992).	33
Figuur 4.3	Ratio van het sedimenttransport nabij de bodem voor vloed en eb (kritische erosiesnelheid = 0 m/s) als functie van de relatieve fase en amplitude van de M_2 en M_4 componenten van het horizontale getij (Friedrichs and Aubrey, 1988).	34
Figuur 4.4	Maximum eb- en vloodsnelheden in de Westerschelde in 1935 en 1975 (Pieters, 1993).	34
Figuur 4.5	Plaatselijke getijkrommen gemiddeld getij (1971-1980) in het Schelde-estuarium van Vlissingen tot Gentbrugge (Claessens en Belmans, 1984).	35
Figuur 4.6	Eb- en vloodscharen in de Westerschelde volgens Van Veen (1950).	36
Figuur 4.7	Geïntegreerde effectieve "fluid power" (in ergs/cm^2 per getijcyclus) rondom een plaat (Granat and Lud- wick, 1980).	36
Figuur 4.8	Invloed van dijkconfiguraties op het geulenstelsel (Peters en Sterling, 1976).	37
Figuur 4.9	Gedeeltelijk gemengd estuarium met mengpatroon: boven longitudinale sectie estuarium; beneden- typische saliniteit- en stroomverticaal.	37
Figuur 4.10	Stroommetingen ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens (15 oktober 1970) (Peters en Sterling, 1976)	38
Figuur 4.11	Settling lag en scour lag effect (in Nichols and Biggs, 1985).	39
Figuur 4.12	Schematische weergave van onder- en oververzadigde getijstromen in de aanloop naar een sterk verruimd geuldeel (bijvoorbeeld drempel).	40
Figuur 5.1	Verticaal gemiddelde stroomsnelheden, watertransporten en debieten in 4 meetlocaties in de Overloop van Valkenisse met de gemeten waterstand bij Baalhoek; 5 september 1990.	47
Figuur 5.2	Berekende zandtransporten in 4 meetlocaties in de Overloop van Valkenisse; 5 september 1990.	48
Figuur 5.3	Ligging meetverticalen binnen het dwarsprofiel in de Overloop van Valkenisse; 5 september 1990.	48
Figuur 5.4	Berekende zandtransporten in 4 meetlocaties in de Overloop van Valkenisse; 5 september 1990: a) gecorrigeerde waterbeweging (residueel debiet=0) en b) gecorrigeerd via concentraties.	49
Figuur 5.5	Geschematiseerde situatie voor residueel transport door onder- en oververzadigingen (geulverruiming hier geïllustreerd als een verdieping); aan de linkerzijde is het geulprofiel in evenwicht met de waterbeweging (getijvolumina), aan de rechterzijde is het doorstroomprofiel van de geul 10 of 20% te	

	ruim.	50
Figuur 5.6	Geschematiseerde sinusvormige waterbeweging; zonder getijasymmetrie en GRS.	50
Figuur 5.7	Gevoeligheid van het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen ten aanzien van de grootte van de verstoring (10 en 20%), de afstand waarover de verstoring plaatsvindt (2 en 4 km) en de aanpassingslengte (0,5 en 1 km).	51
Figuur 5.8	Het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen versus het verschil in zandtransport tussen een geul en een verruimde geul (drempel) voor verschillende grootten van de verstoring.	52
Figuur 5.9	Transport op drempel ten opzichte van Transport in geul en het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen versus de mate van verstoring (beiden procentueel uitgedrukt).	52
Figuur 5.10	Zandtransport naar een drempel door onder- en oververzadigingen en GRS.	53
Figuur 5.11	Het verband tussen de voor het zandtransport relevante getijweg en het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen.	54
Figuur 6.1	Residuele zandtransportpaden in de omgeving van de Drempels van Valkenisse en Bath en de Stortlocatie bij Konijnenschor gebaseerd op de zandbalans en expert judgement.	60
Figuur 6.2	Residuele zandtransportpaden in de omgeving van de Drempel van Hansweert en de stortlocatie Platen van Hulst gebaseerd op de zandbalans en best professional judgement.	61
Figuur 6.3	Gebieden met een erosie (matrix) of sedimentatie (arccering) van meer dan 2 m over de periode van 1986 tot 1992.	62
Figuur 6.4	Elkaar ontwijkende stroombeelden voor maximum vloed en eb in de omgeving van de Drempel van Valkenisse (DETWES)	63
Figuur 6.5	Bimodale geulprofielen afwaarts en opwaarts van de Drempel van Valkenisse en een redelijk symmetrisch profiel op de Drempel.	63
Figuur 6.6	Veranderingen van residuele sedimenttransporten door onder- en oververzadigingen als gevolg van een vergroting van het getijvolume met 10% over een 20% verruimde sterk geschematiseerde drempel; A voor toename getijvolume, B direct na toename getijvolumina, C1 nieuwe evenwichtssituatie en C2 nieuwe evenwichtssituatie met 5% hogere stroomsnelheden.	64
Figuur 6.7	Schematische weergave van de effecten van dichtbij en verder weg storten in een één-dimensionale benadering waarbij alleen rekening wordt gehouden met residuele transporten door onder- en oververzadigingen.	65

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Globale totaaltransporten voor zand per getij (eb+vloed) in verschillende dwarsraaien van de Westerschelde (Fig. 2.4) [in 1000 ton] (droge stof 1250 kg/m ³) (Korstanje, 1984; WWW, 1989; Storm en de Ruig, 1990; Allersma, 1992; Kruyt, 1992).	12
-----------	--	----

Voorwoord

Dit rapport is opgesteld in het kader van het project Oostwest, een samenwerkingsverband tussen het Rijksinstituut voor Kust en Zee /RIKZ (voorheen de Dienst Getijdewateren), de Directie Zeeland (beide Rijkswaterstaat) en het Instituut voor Natuurbeheer te Hasselt (België).

Alle medewerkers van het project Oostwest en met name Jacques Vroon, Ad Langerak, Harm verbeek, Janrik van den Berg en Claire Jeuken, wil ik bedanken voor hun kritische bijdrage in de vorm van opmerkingen kanttekeningen en text voorstellen. Een aantal ideeën die in dit rapport hun weerslag hebben gevonden, zijn ontstaan in de vele en vaak inspirerende discussies met Tom Pieters. Daarvoor mijn hartelijke dank.

Kees Storm
December 1996, Middelburg

0 Samenvatting

Residuele sedimenttransporten bepalen de morfologische veranderingen in het estuarium. Een profielverandering, geulmigratie of de ophoging of erosie van een plaat kunnen alleen plaatsvinden als er netto sediment wordt verplaatst. Netto sedimentverplaatsingen in eb- of vloedrichting worden veroorzaakt door ruimtelijke verschillen in sedimenttransporten. De zandtransportcapaciteit in de Westerschelde is hoog door een combinatie van sterke getijstromen en relatief fijn bodemsediment. Per eb- of vloedfase kan het zand in suspensie een afstand afleggen die wordt geschat op enkele kilometers. De geulen (en geulranden) zijn de zandtransportaders van het estuarium.

In de eb- en vloedgedomineerde geulen en geuldelen worden circulatie cellen of "zandneren" aangedreven. Het patroon van het residuele zandtransport is met verschillende methodieken onderzocht: zandbalansen, de McLaren analyse, via numerieke waterbewegingsmodellen en veldwaarnemingen. De methodieken vertonen min of meer dezelfde patronen. De transportpaden beginnen meestal in een geul en eindigen op een (verdiepte) drempel, plaat of schor. De transportpaden draaien vaak om platen heen. De drempels lijken als knooppunten van hoofd- en nevengeulen een strategische positie in te nemen ten aanzien van het residuele zandtransport in het estuarium. Hoge platen en schorren hebben alleen een (tijdelijke) bergende functie voor het zand en zijn onbelangrijk voor het doorgaande zandtransport. De vorm van de geulen zoals reeds door Van Veen ingedeeld in eb- en vloedscharen blijkt een betrouwbare eerste aanwijzing te zijn voor de richting van het residuele zandtransport. Het vertrouwen in de bathymetrie als indicator voor het residuele zandtransport is hierdoor versterkt. Binnen brede geulen is meestal een vloed- en ebgedomineerd deel aanwezig.

Het residuele zandtransport in een estuarium is het gecombineerde gevolg van meerdere mechanismen:

- 1) asymmetrieën in de waterbeweging door a) de getij-asymmetrie, b) de Getijgedreven Residuele Stroming (GRS) en c) een dichtheidsstroming en
- 2) asymmetrieën in sedimentlast veroorzaakt door traagheidseffecten zoals a) "scour lag" en "settling lag", b) door ruimtelijke variaties in transporterend vermogen van de stroming door profielveranderingen en
- 3) een preferentiële transportrichting door golfwerking.

ad 1) Getijgedreven Residuele Stroming, het eb- of vloedoverschot, bepaalt in een dwarsprofiel in sterke mate de richting en grootte van het residuele zandtransport. GRS is met name sterk ontwikkeld in bocht-overgangen (drempels) en in eb- en vloedscharen. Het aandeel van de getij-asymmetrie in het lokale residuele zandtransport is meestal ondergeschikt aan de GRS component. Gezien de vorm van het verticale getij, namelijk een kortere duur van de vloedfase, zal in de Westerschelde een vloedgericht zandtransport worden bevorderd. Verwacht wordt dat in relatief ondiepe gebieden een sterkere vloedgerichte component aanwezig is dan in de diepe geulen. Wellicht is in sommige diepe geulen zelfs sprake van een ebgerichte component. Getij-asymmetrie is voor de lange termijn ontwikkeling van een estuarium waarschijnlijk belangrijker dan GRS, omdat getij-asymmetrie qua richting consistent is.

ad 2) De doorstroomprofielen van gebaggerde drempels worden in het oostelijk deel van de Westerschelde door het onderhoudsbaggerwerk 10 tot 20% ruimer gehouden dan het evenwichtsprofiel behorende bij de waterbeweging. Hierdoor ontstaan in combinatie met de alternerende getijstroom ruimtelijke onder- en oververzadigingen waardoor een residueel zandtransport in de richting van de drempel wordt aangedreven. Gevoeligheidsberekeningen geven aan dat de grootte van dit transport tot circa 30% van het totale zandtransport voor de geul in evenwicht kan bedragen. Dit residuele zandtransport is positief gecorreleerd met de gradiënt van de verstoring (m^2 verandering doorstroomprofiel per km geullengte). Dit residueel zandtransport treedt alleen op als de profielverandering zich voordoet binnen de getijweg voor het zandtransport.

ad 3) Het transport door golfwerking is over het algemeen patroon van ondergeschikt belang. Op de geëxponeerde delen van het intergetijdegebied is het tijdens stormen wel een belangrijke factor.

Door het tegelijkertijd optreden van de verschillende mechanismen kan het residuele zandtransport lokaal worden versterkt of verzwakt. Getijgedreven Residuele Stroming en getij-asymmetrie spelen een belangrijke rol in de hele Westerschelde. Onder- en oververzadigingen kunnen in de directe omgeving van sterk verdiepte drempels en belangrijke stortlocaties de richting en de grootte van het residuele zandtransport beïnvloeden. Andere mechanismen zoals dichtheidsstromingen, scour lag/settling lag, transport door golfwerking zijn in de Westerschelde van ondergeschikt belang.

Op basis van de kennis opgedaan bij de analyse van de residuele zandtransporten is een inschatting te maken van de effecten van mogelijk toekomstig vaargeulbeheer zoals 1) *een vergroting van de getijvolumina* (ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens) en 2) *het vergroten van de afstand tussen bagger- en stortlocaties*.

Direct na de *vergroting van de getijvolumina* nemen de stroomsnelheden en daarmee ook de zandtransportcapaciteit toe, zowel op de drempels als in de tussengelegen geuldelen. Hierdoor nemen ook de aanzandingsnelheden op de oostelijke drempels toe, althans initieel. Als gevolg van zandonttrekkingen en berging van zand in het intergetijdegebied verruimen de geulen. De stroomsnelheden in de tussenliggende geuldelen nemen daarmee af tot normale proporties. Op de drempels is de snelheid wel blijvend verhoogd. Aan de hand van een sterk geschematiseerd één-dimensionaal rekenvoorbeeld wordt getoond dat het zandtransport richting drempel met 45% kan afnemen ten opzichte van de situatie vóór het vergroten van het getijvolume. Dit zou betekenen dat de drempeldiepte met minder baggeren kan worden onderhouden. Echter, de situatie rondom drempels is bij uitstek drie-dimensionaal en vooral de aanstroming van de drempel is van groot belang. Rondom de *Drempel van Bath* is bijvoorbeeld slechts beperkte ruimte voor migraties van de geulen. De buitenbochten van de geulen worden nu al sterk vastgehouden door oeverwerken en resistente klei- en veenlagen in de geulranden. In dit gebied is de kans klein dat de aanstroming van de drempel, de horizontale geulconfiguratie, significant zou wijzigen als gevolg van een toename in het getijvolume. Andere drempels in de Westerschelde kennen vaak grotere vrijheidsgraden, waardoor de kans op wijziging van de horizontale geulgeometrie groter is. Zo'n wijziging kan het gedrag van de drempel, en daarmee het aanzandingspatroon, aanzienlijk beïnvloeden.

Door het *verder naar het westen storten* zal op termijn in het westelijk deel een relatief overschot en in oostelijk deel een relatief tekort aan zand ontstaan. De aanzandingsnelheid op de gebaggerde drempels in het oostelijk deel zal afnemen door het verdwijnen van de kunstmatig onderhouden sedimentbronnen vlakbij de drempels en door de kleinere gradiënt in onder- en oververzadigingen. Het westelijk deel zal vergelijkbare ontwikkelingen vertonen als de afgelopen twee decennia in het oostelijk deel zijn waargenomen. Dus relatief "krappe" geulen rondom de stortlocaties en een toename van de zandberging in het intergetijdegebied, ophoging en uitbreiding van de platen. De bergingscapaciteit van de geulen en platen in het westelijk deel is aanzienlijk groter dan in het oostelijk deel. Om dezelfde effecten te krijgen als in het oostelijk deel zal dus veel meer gestort moeten worden. Doordat netto zand uit het estuarium wordt onttrokken zal de uiteindelijke bagger-"kuil" in het oostelijk deel een aanzienlijk groter volume innemen dan de stort-"berg" in het westelijk deel.

De sedimentaanvoer naar de vloedschaar van de Everingen zal sterk toenemen. Vanuit dit gebied en de stortlocatie in het Gat van Ossensse zal een vloedgedomineerd transport naar de Overloop van Hansweert worden aangedreven. De drempels aan de west- en oostzijde van de Plaat van Ossensse zullen dan cruciale sedimentatiegebieden zijn. De mogelijkheden om sediment te transporteren zijn uiteraard niet onbeperkt. Het is zeer wel denkbaar dat de grootschalige retourstroom van west naar oost juist door omstandigheden in het middengebied wordt gereguleerd.

1 Inleiding

Morfologische veranderingen kunnen alleen optreden doordat sediment netto in een bepaalde richting wordt verplaatst. Een geulprofielverandering, een geulmigratie, de ophoging van een plaat of erosie van een schor, kunnen alleen tot stand komen door residuele sedimenttransporten. Deze residuele sedimenttransporten in eb- of vloedrichting worden veroorzaakt door ruimtelijke verschillen in sedimenttransporten. In de Westerschelde is het getij de motor van het sedimenttransport.

Naast de natuurlijke sedimenttransporten, worden jaarlijks in de Westerschelde enkele miljoenen m³'s zand op kunstmatige wijze verplaatst van bagger- naar stortlocaties. Dit onderhoudsbaggerwerk is praktisch volcontinu in bedrijf. Zandbalansen afgeleid uit dieptekaarten, tonen aan dat de baggerlocaties telkens opnieuw aanzanden en dat het merendeel van het gestorte zand naar andere locaties in het estuarium wordt getransporteerd. Er lijkt een retourstroming plaats te vinden van stort- naar baggerlocaties. Het inzicht in de wijze waarop dit gebeurt en de interactie met "natuurlijke" residuele sedimentverplaatsingen is beperkt. Met een beter inzicht in de residuele sedimenttransporten kunnen de bagger-, stort- en zandwinstrategieën worden geoptimaliseerd en ongewenste effecten worden geminimaliseerd.

De centrale vraagstelling is waarom en via welke paden sediment van een erosie- naar een sedimentatiegebied wordt getransporteerd? Deze algemene vraag is uitgesplitst in een aantal deelvragen:

- * Wat zijn de natuurlijke en kunstmatige erosie- en sedimentatiegebieden?
- * Via welke paden vindt dit residuele zandtransport plaats van en naar deze gebieden?
- * Welk mechanisme of welke combinatie van mechanismen bepalen deze netto zandtransporten?
- * Wat is de invloed van het vaargeulonderhoud op het patroon en de omvang van residuele zandtransporten?
- * Hoe wordt het patroon van residuele zandtransporten beïnvloed door bijvoorbeeld veranderingen van de geometrie van het estuarium, het vergroten van het getijvolume en het vergroten van de afstanden tussen bagger- en stortlocaties?

De doelstelling van deze analyse is 1) het analyseren van het ruimtelijk patroon van de residuele sedimenttransport in de Westerschelde en 2) het beschrijven en ordenen van de processen die dit patroon van residueel sedimenttransport bepalen. Aan de hand van opeenvolgende zandbalansen, gecombineerd met gedetailleerde morfologische informatie over erosie en sedimentatie ten gevolge van geulmigraties en plaatontwikkelingen, kan een overzicht worden verkregen waar en hoeveel sediment resulterend is getransporteerd. Andere gegevens, zoals uit de McLaren-analyse, de reststromen uit een waterbewegingsmodel en de asymmetrie van bodemribbels, geven aanwijzingen over de paden die het sediment gevolgd heeft.

De Westerschelde is een zandig estuarium. Slib is voor morfologische veranderingen van ondergeschikt belang, schorren en havens uitgezonderd. Omdat in deze studie de grootschalige morfologische processen centraal staan, beperkt dit document zich tot de zandtransporten.

In hoofdstuk 2 wordt een korte behandeling gegeven van het zandtransport, waarin processen als resuspensie, depositie en transport worden gedefinieerd. In hoofdstuk 3 worden ruimtelijke patronen van de residuele zandtransporten beschreven voor het oostelijk deel van de Westerschelde. In hoofdstuk 4 komen verschillende mechanismen aan de orde die residuele zandtransporten in estuaria kunnen veroorzaken. De relevantie van deze mechanismen voor het residuele zandtransport in de Westerschelde worden deels middels gevoeligheidsanalyses aangegeven in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 zijn aan de hand van een aantal case-studies deze inzichten geconcretiseerd.

2 Zandtransporten in estuaria

2.1 Transportcyclus van zand

De beweging van zand in een estuarium kan gezien worden als een cyclus van 3 processen: resuspensie, transport en depositie. Deze processen zijn afhankelijk van de waterbeweging en de eigenschappen van het sediment, zoals deeltjesgrootte, vorm, dichtheid en compositie. Het vermogen van de stroming om sediment in suspensie te houden en te verplaatsen, de transportcapaciteit, wordt in belangrijke mate bepaald door de stroomsnelheid. In een estuarium is sprake van grote temporele en ruimtelijke variaties in de stroomsnelheid en daarmee ook in de transportcapaciteit. Als de stroomsnelheid en dus de transportcapaciteit toeneemt zal de stroom in principe sediment opnemen en erosie op. Omgekeerd treedt bij afname van de transportcapaciteit sedimentatie op. Ruimtelijke gradiënten in transportcapaciteit bepalen dus het momentane patroon van sedimentatie en erosie.

Het momentane zandtransport, ofwel het actuele zandtransport, is het product van de zandconcentratie en stroomsnelheid in de stroomverticaal. Geïntegreerd in de tijd over een eb en/of vloedcyclus, is dit het totaaltransport behorende bij die getijperiode.

2.2 Resuspensie, concentratie en depositie

Resuspensie van ongeconsolideerd sediment vindt plaats zodra de door de stroming uitgeoefende schuifkracht de weerstandskracht van het sediment overschrijdt. Deze weerstandskracht wordt uitgedrukt in de kritieke bodemschuifspanningssnelheid (u_{*c}) welke gerelateerd is aan de verticale snelheidsgradiënt vlakbij de bodem. Deze wordt bepaald door het verhang, de waterdiepte, de bodemruwheid (en dus ook bodemvormen) en een eventuele verticale dichtheidsgradiënt.

Met uitzondering van enkele eroderende geuloevers en enkele diepe ontgrondingskuilen, bestaat de gehele bodem van de Westerschelde uit ongeconsolideerd zand. Het zand heeft een mediane korrelgrootte van 150 tot 250 μ en is goed gesorteerd. Het sediment in het westelijk deel is over het algemeen grover dan in het oostelijk deel (De Looff, 1978 en 1980).

Om dit sediment in beweging te brengen moet een snelheid op 1 m boven de bodem worden overschreden van 0,2 tot 0,3 m/s (Miller et al., 1977; Heathershaw, 1981). Opgemerkt moet worden dat voor een verdere menging van dit sediment hoger in de waterkolom hogere stroomsnelheden nodig zijn voor een voldoende turbulente diffusie. In de geulen van de Westerschelde wordt de stroomsnelheid van 0,25 m voor de bodem+1m bij een gemiddeld springtij gedurende 30 tot 90 % van de tijd overschreden, afhankelijk van de ligging in het dwarsprofiel. In Fig. 2.1 a en b zijn voor de debiettraaien 3 en 5a in het oostelijk deel van de Westerschelde (Fig. 2.2) de overschrijdingsduren voor eb en vloed uitgezet. Golfwerking in combinatie met stroming verhoogt de bodemschuifspanningen en turbulenties waardoor extra sediment kan worden geresuspenseerd.

De hoeveelheid sediment in suspensie, de *concentratie*, wordt bepaald door de mate waarin de opwaarts gerichte krachten op de sedimentdeeltjes ten gevolge van de turbulente diffusie de neerwaartse gravitatieve krachten overschrijden (Rouse, 1937; Allen, 1985). De turbulente diffusie, een gevolg van schuifspanning in de waterkolom, wordt opgewekt doordat het water weerstand ondervindt van de bodem. In stationaire omstandigheden kan, als voldoende sediment beschikbaar is, de verticaal een evenwichtsconcentratie bereiken. De waterkolom is dan, gegeven de omstandigheden, verzadigd. In feite is dit een dynamische evenwichtssituatie, waarbij er gemiddeld in de tijd evenveel sediment wordt geresuspenseerd als gedeponneerd. Er is dan dus geen *netto* uitwisseling met de bodem, terwijl er wel sediment verplaatst kan

worden.

Depositie van een zandkorrel vindt plaats als de opwaartse krachten te klein zijn om deze in suspensie te houden. De kritieke schuifspanningsnelheid voor depositie is kleiner dan de kritieke schuifspanningsnelheid voor erosie. Voor zandig sediment is dit verschil gering, maar voor slib kunnen ten gevolge van consolidatie na depositie de verschillen aanzienlijk zijn (Postma, 1967).

Experimenten hebben aangetoond dat resuspensie en depositie tegelijkertijd plaatsvinden (Nichols and Biggs, 1985). Een erosiefase wordt gekenmerkt doordat gedurende die periode de omvang van de resuspensie groter is dan de depositie. Voor een sedimentatiefase geldt het omgekeerde.

2.3 Zandtransporten

2.3.1 Bodem- en suspensietransporten

Zand kan op twee manieren door het water worden getransporteerd: 1) rollend en salterend als bodemtransport en 2) "zwevend" in suspensie. Met toenemende stroomenergie wordt zand eerst rollend, dan salterend en uiteindelijk in suspensie verplaatst.

Het overgrote deel van het transport in de Westerschelde vindt plaats in de waterkolom in suspensie, omdat het transporterend vermogen van de stroming relatief groot is ten opzichte van de valsnelheid van het aanwezige sediment. Volgens Officer (1981) is suspensief transport overigens in de meeste estuaria belangrijker dan bodemtransport. De grootte van het suspensietransport is gerelateerd aan de derde tot vijfde macht van de verticaal gemiddelde stroomsnelheid.

Afhankelijk van het soort transport varieert de afgelegde weg van een zanddeeltje tijdens een vloed- of eb fase aanzienlijk. De gemiddelde getijweg (voor water) in de Westerschelde bedraagt bij een gemiddeld springtij in het oostelijk deel 10 à 15 km. De gemiddelde afgelegde weg per eb- of vloedfase voor zand in suspensie wordt geschat op ten hoogste enkele km's. Voor het bodemtransport is dit veel minder. Van den Berg (1986) heeft voor de Oosterschelde een goede overeenkomst gevonden tussen de verplaatsing van duinen en het bodemtransport. Dat impliceert dat zandkorrels van de bodemtransportpopulatie gemiddeld evenveel verplaatsen als de duinverplaatsing, dus hoogstens enkele tientallen meters per getij.

2.3.2 Temporele variaties

Tijdens een getij is sprake van achtereenvolgende stroomversnellingen en -vertragingen en daarmee veranderingen van de transportcapaciteit. Na een stroomkentering neemt zowel tijdens eb als vloed de stroomsnelheid toe om vervolgens weer af te nemen. De suspensieconcentraties reageren met een zekere vertraging op deze veranderingen in stroomsnelheid en dus ook transportcapaciteit. Voor fijn tot matig grof zand (50 tot 300 micron) bedraagt die vertraging 0 tot 60 minuten (Van Rijn, 1989). Hierdoor is de concentratieverticaal van een versnellende stroming onderverzadigd: het momentane zandtransport is kleiner dan de transportcapaciteit. Tijdens stroomvertraging is de verticaal oververzadigd: het momentane zandtransport is groter dan de transportcapaciteit. Dit verschijnsel is weergegeven in Fig 2.3 (Nichols, 1985) en is onder meer waargenomen bij sedimentmetingen in de Westerschelde (Van den Berg, 1987; Fetsweis, et al., 1994).

2.3.3 Ruimtelijke variaties

In het estuarium vinden daarnaast ook ruimtelijk stroomversnellingen en -vertraging plaats die veroorzaakt worden door profielveranderingen. In een krappe geul, met een relatief klein doorstrooprofiel, is bij

hetzelfde getijvolume de stroomsnelheid groter dan in een ruime geul, met een relatief groot doorstroomprofiel. Het vermogen om zand te transporteren is in een krappe geul, bij hetzelfde debiet, groter dan in een ruime geul. In overgangsgebieden van relatief krappe naar relatief ruime geulen neemt de transportcapaciteit af, waardoor de stroming oververzadigd wordt en zand zal worden afgezet. Bij een overgang van een relatief ruime naar een relatief krappe geul, neemt de transportcapaciteit juist toe, waardoor de stroming onderverzadigd wordt en zand zal worden geërodeerd.

2.4 Gemeten en berekende zandtransporten in de Westerschelde

Het zandtransport vindt vooral plaats tijdens springtij. Uit metingen in het oostelijk deel van de Westerschelde in 1990 blijkt dat tijdens een behoorlijk springtij 10 à 20 keer meer zand werd getransporteerd dan het voorgaande doottij (Kruyt, 1992). De diepe geulen zijn meestal de belangrijkste transporteurs, het gevolg van een combinatie van hoge stroomsnelheden en een grote doorsnede (Allersma, 1992; Kruyt, 1992).

Voor verschillende geulen en dwarsdoorsnedes in de Westerschelde is het totaal transport bepaald aan de hand van stroom- en zandconcentratiemetingen (Allersma, 1992; Kruyt, 1992). Ook zijn met sedimenttransportformules zandtransporten berekend uit gemeten stroomverticalen (Storm en de Ruig, 1990; Kruyt, 1992). Het totale zandtransport is gedefinieerd als de integraal van de momentane zandtransporten, waarbij de eb- en vloedtransporten zijn gesommeerd (absoluut). Dit is een maat voor de grootte van de transporten, en is dus niet een resulterend zandtransport.

De totaaltransporten zoals weergegeven in Tabel 2.1 zijn alleen indicatief, gezien de verschillen in berekeningswijze en de verschillende getijomstandigheden waaronder de metingen zijn verricht. Uit dit overzicht blijkt wel dat door dwarsraaien in de Westerschelde, per getij (eb + vloed) enkele 10.000 tonnen zand worden getransporteerd. Berekend over een heel jaar zijn dit enkele tientallen miljoenen m³ zand! Hoewel de spreiding in de gegevens groot is, kan toch een toename van de totale zandtransporten worden waargenomen van het oostelijk naar het westelijk deel van de Westerschelde. Dit is uiteraard het gevolg van de toename van de getijvolumina (eb+vloed) van oost naar west, van 200 Mm³ bij de Belgisch-Nederlandse grens tot meer dan 2000 Mm³ in de monding.

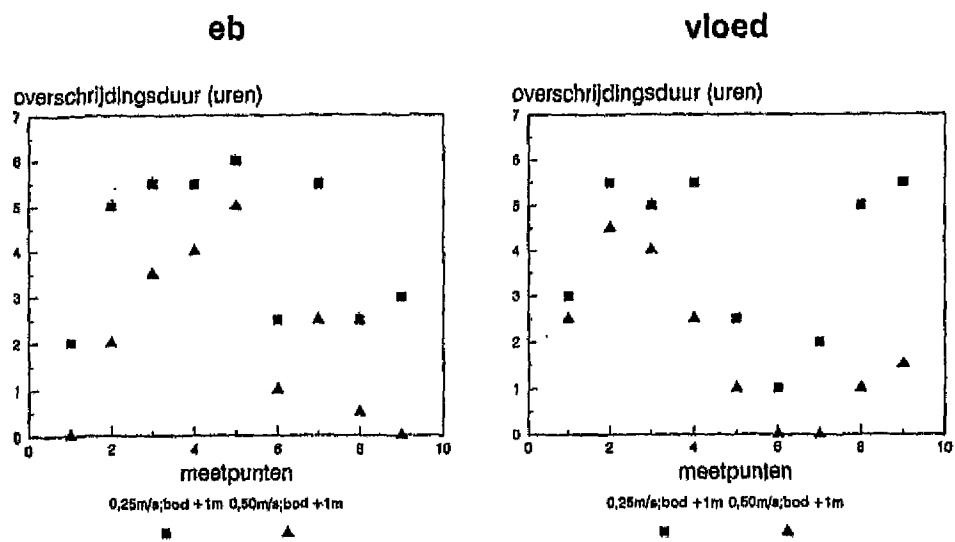
De verhouding tussen berekende en gemeten zandtransporten in de Overloop van Valkenisse varieert tussen een factor ½ tot 2 (Fig. 2.5). Dit geldt vooral voor het moment rond maximum transport. Naast het feit dat de zandtransportformules nog niet perfect zijn, is een deel van deze afwijking het gevolg van meetfouten.

Een belangrijke foutenbron in de zandtransportmetingen zoals deze in de Westerschelde wordt uitgevoerd is de ijking van de zandtransportmeter (AZTM). Deze wordt sterk beïnvloed door de range aan concentraties die op een meetdag is verzameld. De ijklijn kan voor hetzelfde instrument daardoor van dag tot dag veranderen. Volgens Jeuken (1992) kan ook de wijze waarop het zandtransport is berekend nog verbeteren, met name de extrapolaties aan het oppervlak en bij de bodem. Daarnaast moet worden afgewogen of de laterale variaties in een complex gebied als de Westerschelde voldoende kunnen worden bepaald met het beperkt aantal gemeten transportverticalen (meestal 4 tot 5 per dwarsraai).

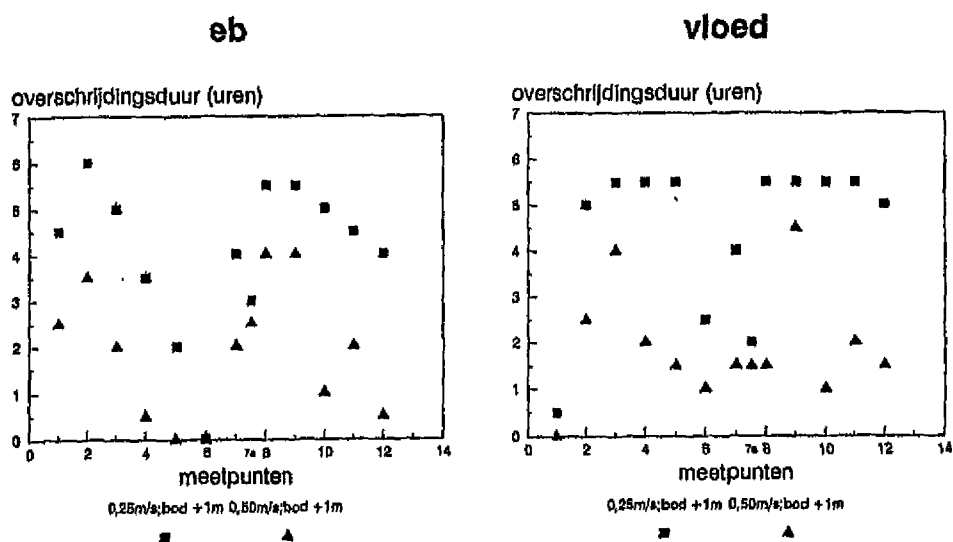
Tabel 2.1 Globale totaaltransporten voor zand per getij (eb+vloed) in verschillende dwarsraaien van de Westerschelde (Fig. 2.4) [in 1000 ton] (droge stof 1250 kg/m³) (Korstanje, 1984; WWW, 1989; Storm en de Ruig, 1990; Allersma, 1992; Kruyt, 1992).

dwarsraai	referentie	totaaltransport* (1000 ton eb+vloed)	
Vaarwater boven Bath	Korstanje	5	
debietraai 2	afgeleid uit Kruyt	10	
debietraai 3	afgeleid uit Kruyt	20	
debietraai 3	Storm en de Ruig	14	
Zuidergat	Korstanje	15	
Zuidergat	WWW	3 - 22,5 (doodtij-springtij)	
Zuidergat	Allersma	42	
Schaar van Waarde	Korstanje	12	
debietraai 5	Allersma	85	
debietraai 5	Storm en de Ruig	16	
debietraai 5a	afgeleid uit Kruyt	30	
Gat van Ossensisse	Korstanje	22	
debietraai 6	afgeleid uit Kruyt	40	
Pas van Terneuzen	Korstanje	12	
debietraai 7	afgeleid uit Kruyt	125	* totaaltransporten geven alleen globale indruk; deze zijn op verschillende wijze berekend voor verschillende getijomstandigheden
debietraai 9	afgeleid uit Kruyt	50	
debietraai 10	afgeleid uit Kruyt	40	
debietraai 11	afgeleid uit Kruyt	25	

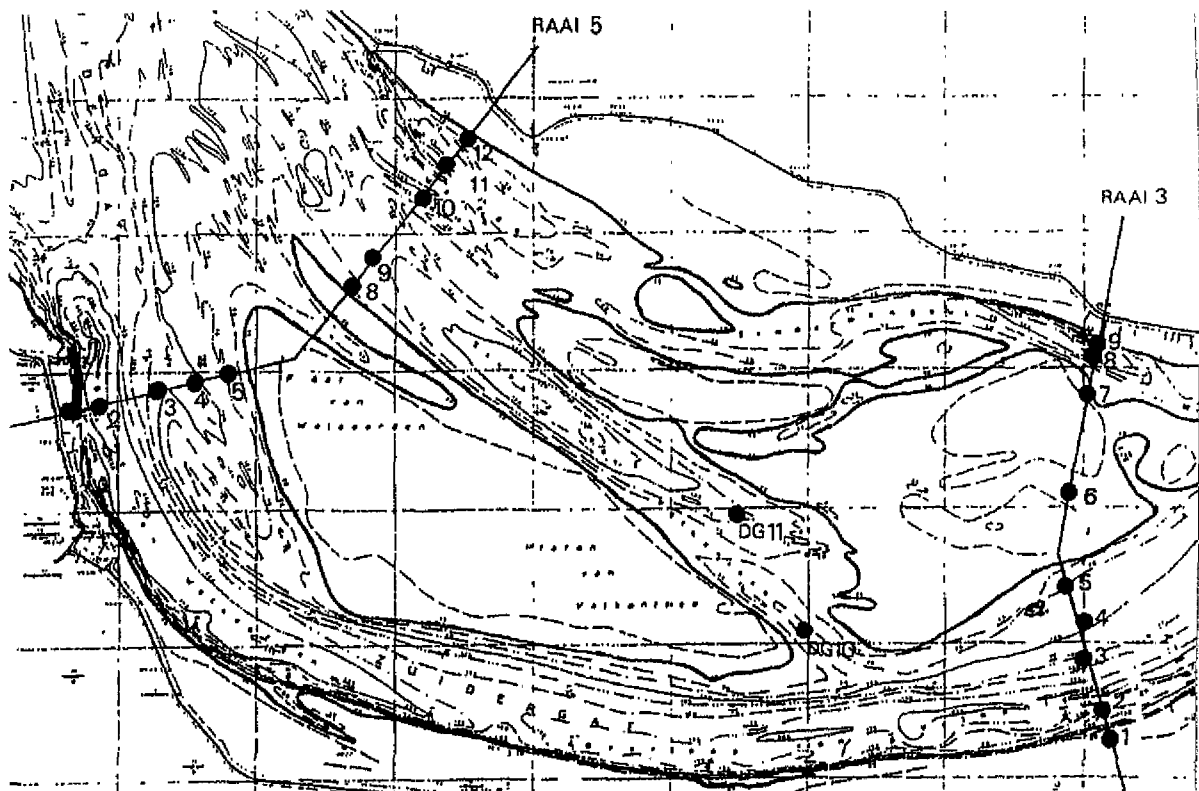
debietraai 3; springtij 5 september 1990



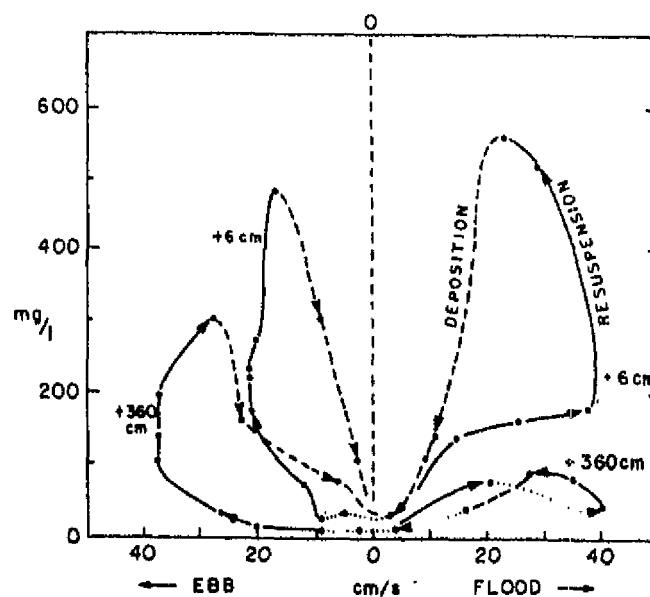
debietraai 5a; springtij 6 september 1990



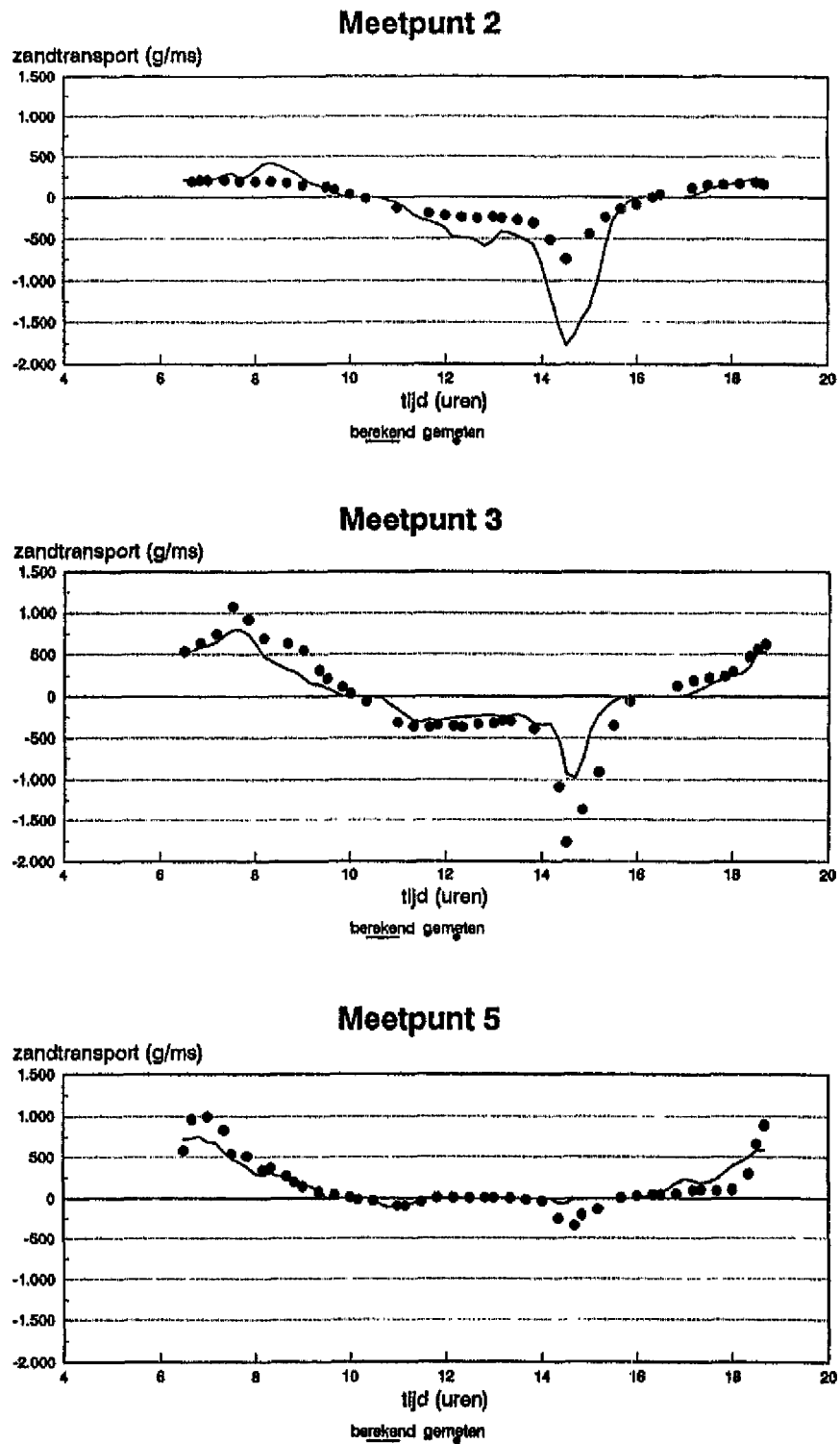
Figuur 2.1 Overschrijdingsduren van 0,25 en 0,5 m/s voor debietraaien 3 en 5a; najaar 1990.



Figuur 2.2 Ligging debietraaien 3 en 5a en meetlocaties.



Figuur 2.3 Vertragingseffecten geïllustreerd door variaties in suspensieconcentraties als een functie van de getijstrooming gedurende één getijcyclus: dichte lijnen resuspensiefase; onderbroken lijnen afzettingsfase; stippellijnen overgang (Nichols, 1985).



Figuur 2.5 Berekende en gemeten zandtransporten voor metingen in de Overloop van Valkenisse van 5 september 1990.

3 Zandtransportpaden in de Westerschelde

3.1 Residuele zandtransporten afgeleid uit zandbalansen

Met behulp van gedigitaliseerde en in DIGIBEELD geïnterpoleerde bodemschematisaties zijn zandbalansen gemaakt van de Westerschelde voor de periode vanaf 1955 (Uit den Bogaard, 1995). De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van de indeling van de vaklodingen in de Westerschelde (Vak 1 t/m 6) (Fig. 3.1). Er ontstaat daardoor alleen een één-dimensionaal beeld van de zandbalans van de Westerschelde. Er is geen onderscheid aangebracht tussen hoofd- en nevengeulen en platen zoals uitgevoerd door Van den Berg et al. (1991) en Huijs (1996).

De natuurlijke zanduitwisselingen tussen de vakken vinden vrijwel altijd plaats van west naar oost (Fig. 3.2). De grootte van dit residuele zandtransport varieert sterk, zowel ruimtelijk als temporeel, waarbij ook de invloed van de nauwkeurigheid een rol kan spelen. De uitwisseling tussen vakken bedraagt meestal 0,5 tot 1 Mm³/jaar, met een uitschieter tot 4,5 Mm³/jaar. De import ter hoogte van de monding van de Westerschelde was erg groot in de periode van 1968 tot en met 1974, 4 tot 7 miljoen m³ per jaar. Ervoor en erna was dit minder dan 2 Mm³/jaar.

In de periode van 1955 tot en met 1970 neemt de grootte van het oostwaarts gerichte residuele zandtransport globaal af van west naar oost. Na 1970 ligt het zwaartepunt van het residuele zandtransport juist in het oostelijk deel van de Westerschelde. Tussen sommige vakken is duidelijk sprake van een retourstroom die het kunstmatig zandtransport van oost naar west door het baggeren en storten compenseert. Dit is duidelijk het geval tussen Vak 1 en Vak 2 en in mindere mate tussen Vak 2 en Vak 3. Omdat de getijvolumina en doorstroomprofielen van west naar oost afnemen, wijst een residueel zandtransport van 10 Mm³ van Vak 2 naar Vak 1 op een relatief sterker transport dan diezelfde hoeveelheid bij de monding van de Westerschelde.

De uitwisseling tussen de vakken is in deze één-dimensionale benadering het gecombineerde gevolg van eb- en vloedtransporten in afzonderlijke geulen of geuldelen.

Uit de resultaten van de zandbalans blijkt dat de residuele zandtransporten tussen de vakken in het oostelijk deel worden gedomineerd door het vaargeulonderhoud en de zandwinning. De residuele zandtransporten tussen de vakken in het midden- en westelijk deel, en daarmee ook de import of export van het estuarium ter hoogte van Vlissingen, lijken meer gestuurd door de natuurlijke morfologische ontwikkelingen, zoals de functiewisseling tussen het Middelgat en de Overloop van Hansweert.

3.2 Transportpaden volgens de McLaren trendanalyse

McLaren heeft een methode ontwikkeld waarbij de richting van het residuele sedimenttransport wordt bepaald door het op statistische basis vergelijken van korrelgrootteverdelingen van bodemonsters (McLaren and Bowles, 1985). In deze semi-kwantitatieve methode wordt gebruik gemaakt van trends in de verandering van de gemiddelde korrelgrootte, de scheefheid en de sortering van de korrelgrootteverdeling in de richting van het netto transport. In het najaar van 1992 en 1993 zijn in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde op een grid van 500*500 m bodemonsters genomen waaruit korrelgrootteverdelingen zijn bepaald. Aan de hand van deze gegevens zijn kaarten met transportpaden geconstrueerd voor het westelijk deel van de Westerschelde (Fig. 3.3), het oostelijk deel van de Westerschelde (Fig. 3.4) en voor de Beneden Zeeschelde (Fig. 3.5) (McLaren en Powys, 1993 en 1994).

Van den Berg (1994) heeft twijfels geuit ten opzichte van de toepasbaarheid van de McLaren methode in de Westerschelde en wel op grond van de volgende overwegingen:

- a) het is opmerkelijk dat in een complex en dynamisch systeem als het Schelde estuarium eenduidige transportpaden kunnen worden afgeleid uit korrelgroottegegevens, zeker gezien het feit dat vaak meerdere selectiemechanismen een rol spelen,
- b) de analysemethode sluit niet goed aan bij het proces dat wordt geanalyseerd (geldt vooral voor slib en
- c) de methodiek is subjectief (het resultaat is sterk afhankelijk van de onderzoeker).

Ondanks deze kanttekeningen moet worden vastgesteld dat de McLaren methode, naast de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde, reeds in een aantal estuaria en kustzones met redelijk succes is toegepast. Voor de Eems (Van Heuvel, 1991; Van de Kreeke en Robaczewska, 1993), de Severn (McLaren et al., 1993) en de Humber (NRA, 1992) bleken de McLaren transportpaden overeen te stemmen met resultaten van numerieke waterbewegingsmodellen (Euleriaanse residuele stroomsnelheid). Een vergelijkbare korrelgrootte-trendanalyse is door Gao et al. (1994) uitgevoerd voor een gebied op het continentale plat, met als verificatie het patroon van de bodemribbels en stroomsnelheidsgegevens. Een meer objectieve evaluatie van de McLaren methodiek is vooralsnog niet mogelijk, omdat kwantitatieve kennis van transportpaden ontbreekt. Het McLaren resultaat met de transportpaden voor zand of slib dient derhalve in samenhang met andere methodieken en inzichten te worden gebruikt om het inzicht in de netto transportrichtingen te vergroten.

Uit deze analyse van McLaren bleek dat het resulterende sedimenttransport in het Schelde estuarium plaatsvindt via een aantal grotere en kleinere cellen. Deze "transport environments" beginnen meestal in een geul en eindigen op een drempel, plaat of schor (Saeftinge). Soortgelijke patronen zijn reeds door Van Veen (1950) beschreven en aangeduid als "zandneren". McLaren stelt dat het geheel aan eb- en vloedtransporten, met vaak tegengestelde richtingen aan weerszijden van platen, een coherent patroon laat zien. De transportpaden zoals opgesteld door McLaren en Powys (1993 en 1994) komen redelijk overeen met de aanwezigheid van eb- of vloedgedomineerde geulen, zoals afgeleid uit metingen, resultaten van waterbewegingmodellering, veldwaarnemingen en de bathymetrie. Er zijn echter een aantal gebieden waar dit niet het geval is: de Pas van terneuzen, de Everingen, de Overloop van Hansweert, de Plaat van Ossenis, het Middelgat en de oostelijke uitloop van de Schaar van Valkenisse (Fig. 3.3 en 3.4). Er is geen verklaring waarom deze gebieden afwijken, terwijl een groot deel van de kaart goed overeenstemt met andere bevindingen. Hierbij moet niet worden vergeten dat McLaren alleen transportrichtingen geeft en geen informatie geeft over de grootte van het transport.

3.3 Reststromen afgeleid uit een waterbewegingsmodel

Uit een 2 D waterbewegingsmodel voor de Westerschelde (DETWES) zijn Euleriaanse residuele stroomsnelheden bepaald voor een volledig getij (eb en vloed) voor een gemiddeld springtij (Fig. 3.6 en 3.7). DETWES is een tweedimensionaal, verticaal geïntegreerd waterbewegingsmodel, gebaseerd op het programmapakket WAQUA met een maaswijdte van 100 m (Van der Male, 1993).

De resultaten van DETWES geven indirect een beeld van de residuele sedimenttransporten als wordt verondersteld dat de richting van de reststroom en het residueel zandtransport samenvallen in die gebieden waar de reststroom groot is. Met andere woorden: een vloedgedomineerd residueel zandtransport is waarschijnlijk in die gebieden waar het waterbewegingsmodel een groot vloedoverschot berekent.

Door verschillen in het verloop van de eb- en vloedstroomsnelheden, bijvoorbeeld getij-asymmetrie, kan toch een aanzienlijk residueel zandtransport plaatsvinden in gebieden zonder eb- of vloedverschot.

Een directere benadering is een combinatie van de resultaten van het waterbewegingsmodel met een zandtransportmodel. Soortgelijke combinaties zijn in andere estuaria reeds met succes uitgevoerd, zoals bijvoorbeeld in de Humber (Falconer & Owens, 1990).

De Euleriaanse residuele stroomsnelheden zijn relatief groot in de geulen en rondom drempelgebieden. In het intergetijdegebied zijn de residuele stroomsnelheden veelal kleiner met grotere variaties in stroomrichting. Uit het patroon van reststromen kunnen een aantal duidelijke horizontale circulatiecellen worden waargenomen: bij de drempels van Zandvliet, Bath, Valkenisse en Hansweert en in de Everingen en Pas van Terneuzen. De verticaal gemiddelde Euleriaanse reststromen bedragen daar ca. 0,1 tot 0,2 m/s, tijdens omstandigheden tussen een gemiddeld tij en springtij in.

3.4 Transportrichtingen uit asymmetrie zandgolven

De asymmetrie van zandgolven, bodemvormen met een golflengte groter dan enkele meters, is door verschillende onderzoekers gebruikt als indicator voor residuele zandtransporten (de Vries Klein, 1970; Wright et.al, 1975; Kjerfve, 1978; Goedheer en Misdorp, 1985; Black, 1989; Goa et al., 1994).

In 1985, 1986 en 1990 zijn in het oostelijk deel van de Westerschelde side-looking sonar-raaien gevaren bij verschillende getijomstandigheden. Hiermee kunnen over een breedte van ca. 50 m sedimentaire structuren op de geulbodem worden waargenomen. De resultaten zijn voor 1985, 1986 in Buxc en Tobias (1989) en voor 1990 in Ruessink (1991) beschreven.

Vlakke gebieden in geulen zijn alleen waargenomen op drempels en aan steile randen van platen of slikken. Zandgolven (meestal langer dan 5 m) komen dus voor in overgrote deel van de geulen. Dit stemt overeen met de waarneming dat in de geulen gedurende meerdere uren zowel tijdens de eb als de vloed de erosiesnelheid van het zand wordt overschreden. Langs de eroderende buitenbocht van het Zuidergat zijn duidelijk bodemzandgolven waarneembaar direct op een "hard" substraat (Holocene afzettingen; klei/zand/veen). Er zijn geen grote verschillen waargenomen tussen de doottij- en springtijopname, hetgeen aangeeft dat de vormen tijdens doottij weinig veranderen. Zandgolven met een vloed-asymmetrie zijn over het algemeen hoger dan zandgolven met een eb-asymmetrie.

Rondom sommige drempels is een karakteristieke opeenvolging van ribbelvormen waargenomen: naar de drempels toe worden de zandgolven langer en lager om op de drempels vaak helemaal te verdwijnen. De asymmetrie van de zandgolven is altijd gericht in de richting van de drempels. Ten zuidoosten van de Drempel van Valkenisse zijn de zandgolven lang (50 tot 100 m) en hoog (1 tot 2 m) duidend op een sterk zandtransport vanaf het Konijnenschor (stortlocatie) naar de drempel (baggerlocatie). Dit is een goede aanwijzing voor de aanwezigheid van de retourstroom van sediment.

De afgeleide residuele zandtransportrichtingen zijn weergegeven op de bathymetrie van 1992 die, met uitzondering van de uitloop van de Schaar van Valkenisse, sterke gelijkenis vertoont met de bathymetrie van 1990 (Fig. 3.8). Voor het droogvallende deel van het intergetijdegebied zijn ook de waarnemingen uit luchtfoto's (Asselman, 1991) toegevoegd.

In het Zuidergat is ten westen van Baalhoek de eb-asymmetrie en ten oosten een vloed-asymmetrie aangetroffen. In de Schaar van Waarde is een vloed-asymmetrie en in de Schaar van Valkenisse is een eb-asymmetrie aangetroffen. In de smalle en bochtige geulen zoals de Zimmermangeul en de kortsluitgeul tussen de Zimmermangeul en de Schaar van Waarde, is opeenvolgend zowel eb- als vloedasymmetrie waargenomen, als gevolg van bochteffecten. De zandgolven in het droogvallende deel van het intergetijdegebied vertonen meestal een vloed-asymmetrie.

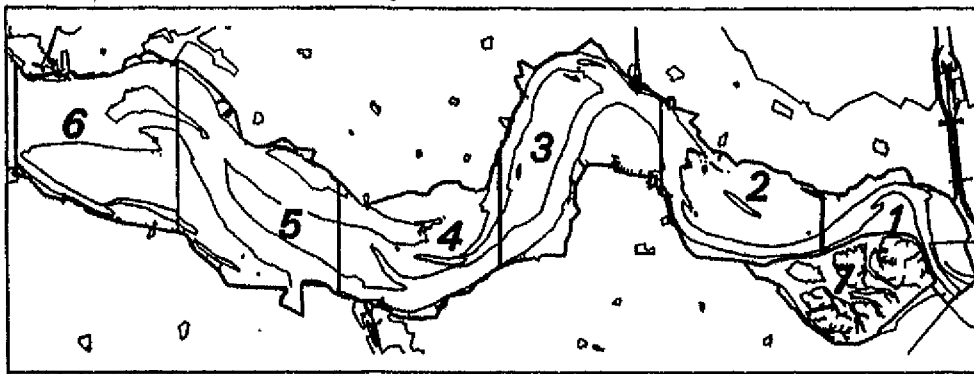
Geconcludeerd wordt dat de richting van de asymmetrie van de zandgolven komt overeen met het lokale eb- of vloedkarakter van de geul en daarmee dus ook met het patroon van residuele reststromen.

3.5 Synthese transportpaden

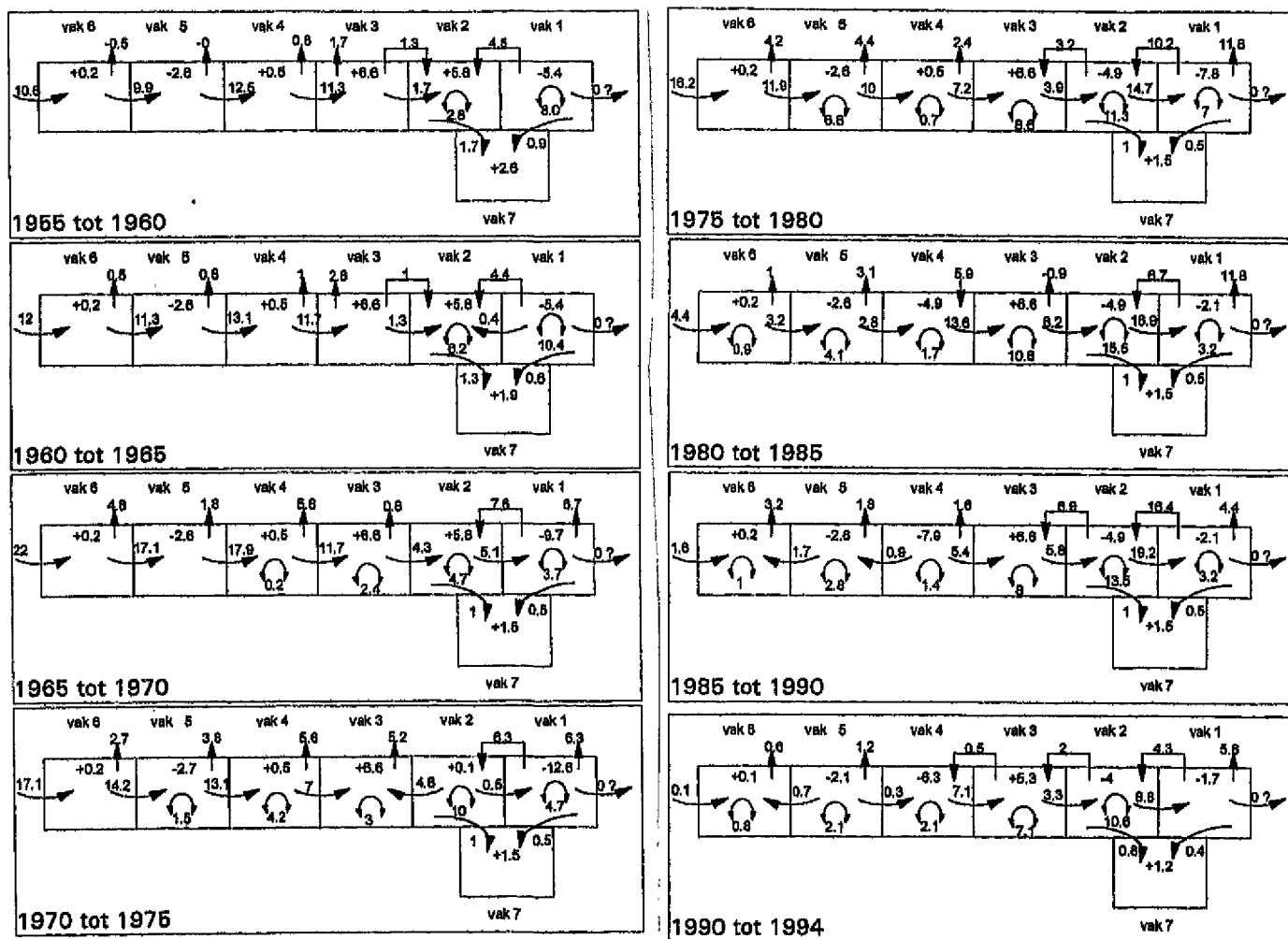
De globale richting van het resttransport van zand kan kwantitatief uit de huidige zandbalans worden afgeleid, maar dan wel gemiddeld voor het hele lodingsvak. Ruimtelijk meer gedifferentieerde informatie kan worden verkregen uit de korrelgrootte trendanalyse van McLaren, uit het patroon van Euleriaanse reststromen (water) berekend met een numerieke waterbewegingsmodel (DETWES) en uit waarnemingen van ribbelvormen door middel van side-looking sonar en luchtfotoïnterpretaties.

Als de resultaten van deze verschillende methodieken onderling worden vergeleken blijkt dat het patroon van residuele zandtransporten in de eb- en vloedgedomineerde geulen en geuldelen vaak overeenkomt. De vorm van de geulen zoals reeds door Van Veen ingedeeld in eb- en vloedscharen blijkt een betrouwbare aanwijzing te zijn voor de richting van het residuele zandtransport. Het zegt evenwel niets over de grootte van het zandtransport. De geulen (en geulranden) zijn de zandtransportaders van het estuarium. Door de eb- en vloedgedomineerde geulen en geuldelen worden grote en minder grote circulatie cellen of zandneren aangedreven.

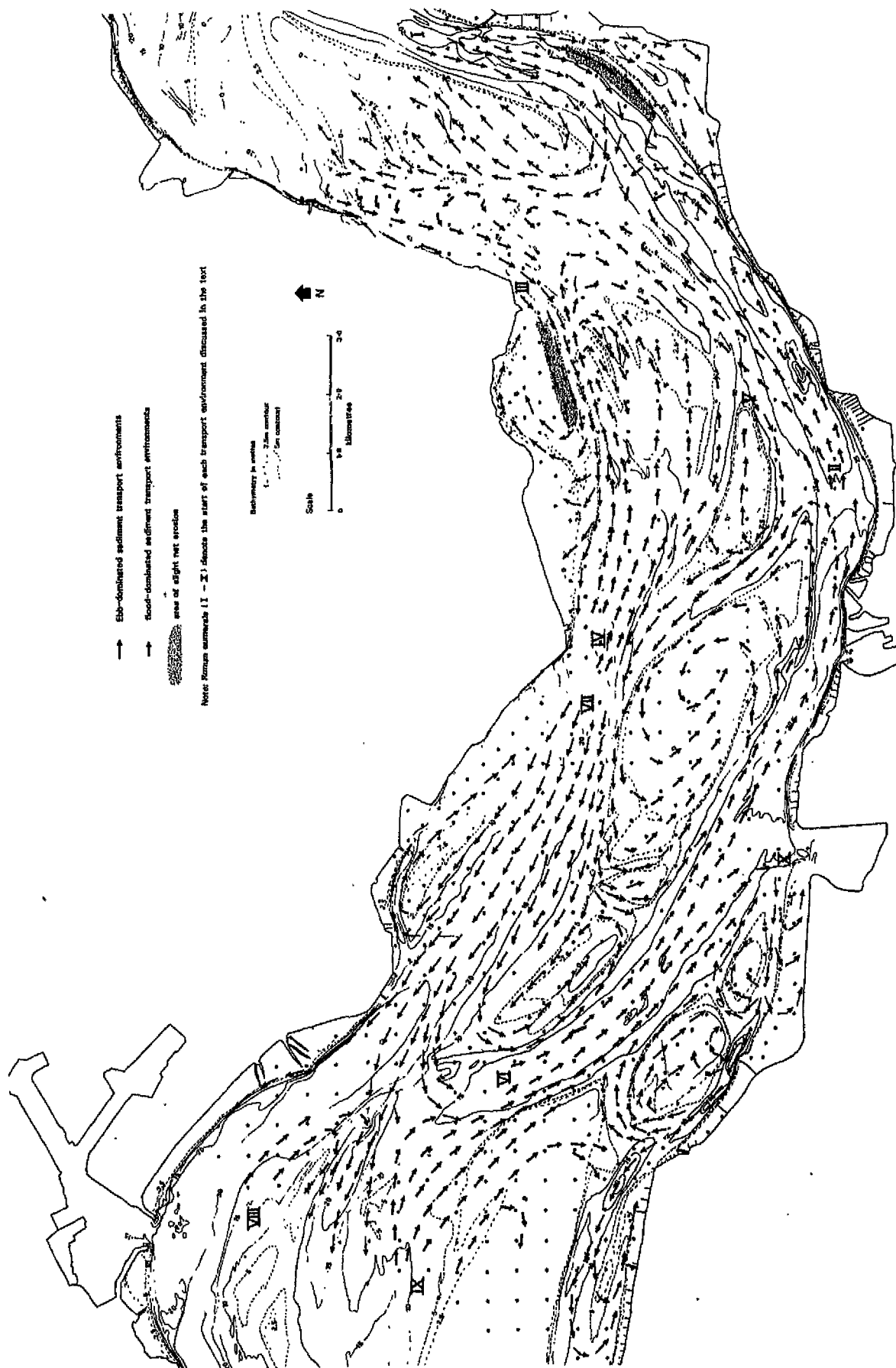
De transportpaden beginnen meestal in een geul en eindigen op een (verdiepte) drempel, plaat of schor. De transportpaden draaien vaak om platen heen. De drempels lijken als knooppunten van hoofd- en nevengeulen een strategische positie in te nemen ten aanzien van het residuele zandtransport in het estuarium. Hoge platen en schorren hebben alleen een bergende functie voor het zand en zijn onbelangrijk voor het doorgaande zandtransport. De vorm van de geulen zoals reeds door Van Veen ingedeeld in eb- en vloedscharen blijkt een betrouwbare aanwijzing te zijn voor de richting van het residuele zandtransport. Het vertrouwen in de bathymetrie als indicator voor het residuele zandtransport is hierdoor versterkt.



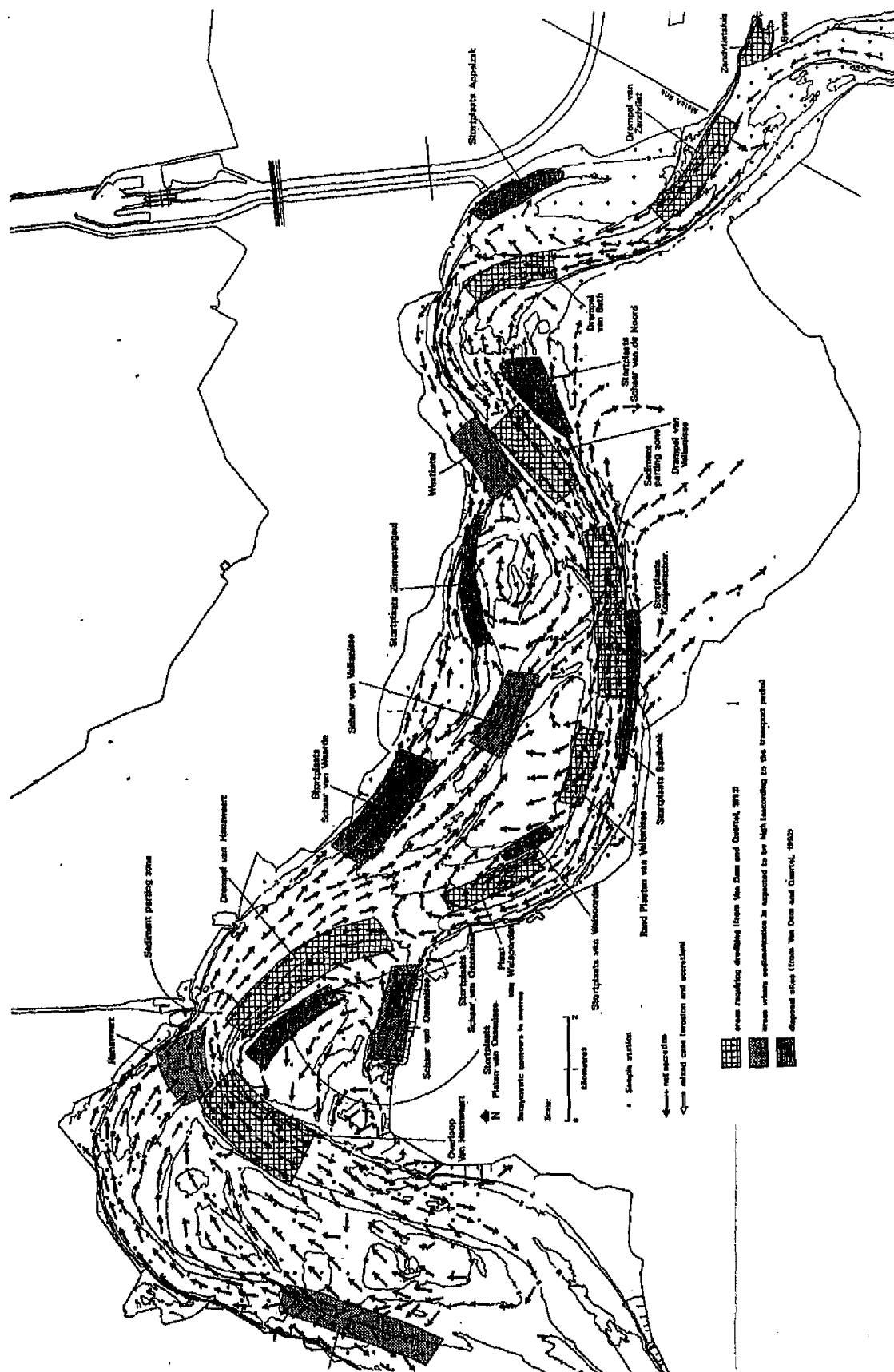
Figuur 3.1 Vakindeling Zandbalans Westerschelde (Uit den Bogaard, 1995).



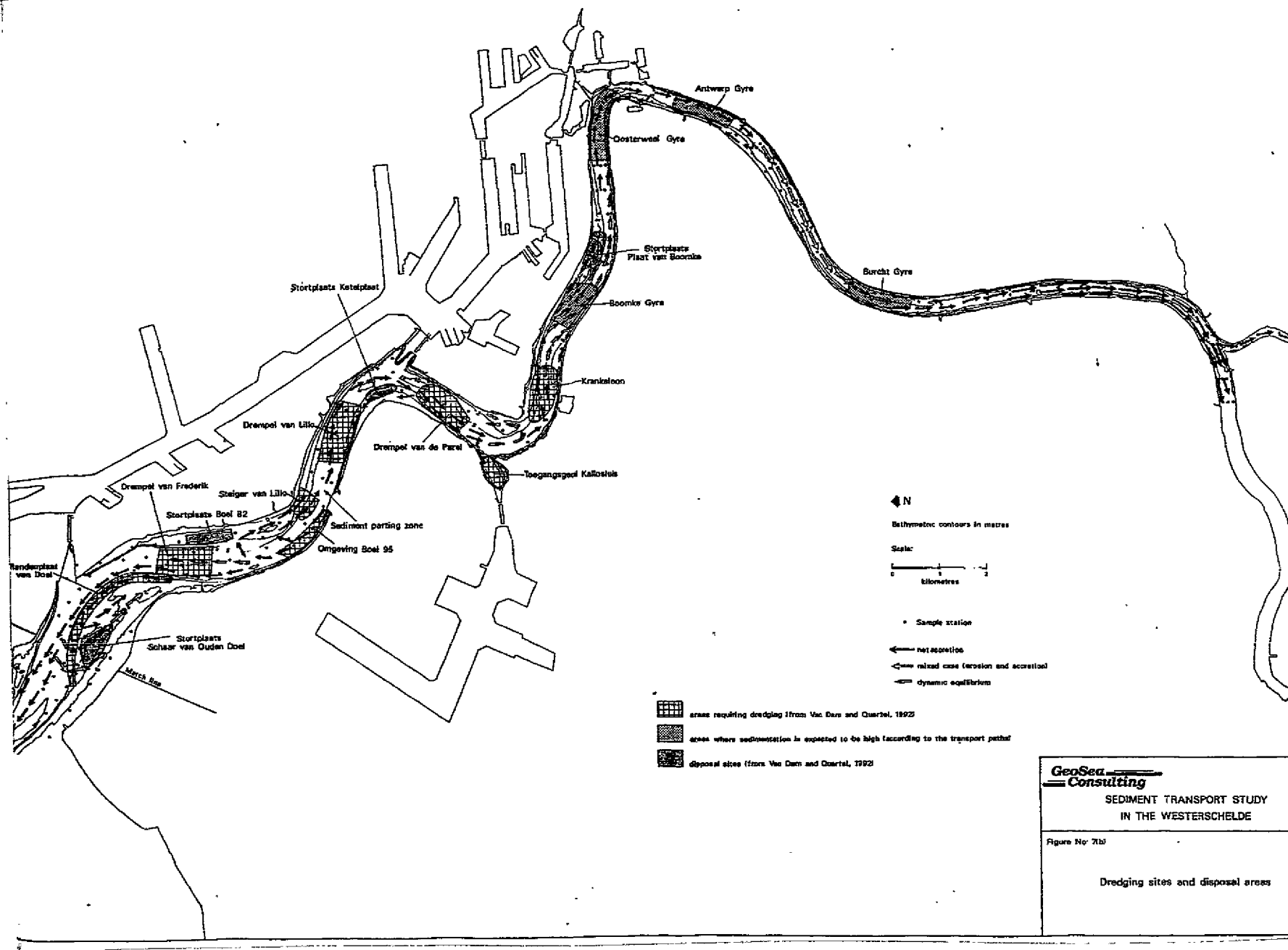
Figuur 3.2 Vijfjaarlijkse resultaten zandbalans Westerschelde 1955-1990 volgens trendlijnen (Uit den Bogaard, 1995).



Figuur 3.3 Transportpaden voor het residuele zandtransport in het westelijk deel van de Westerschelde bepaald volgens de McLaren methode (McLaren en Powys, 1993).

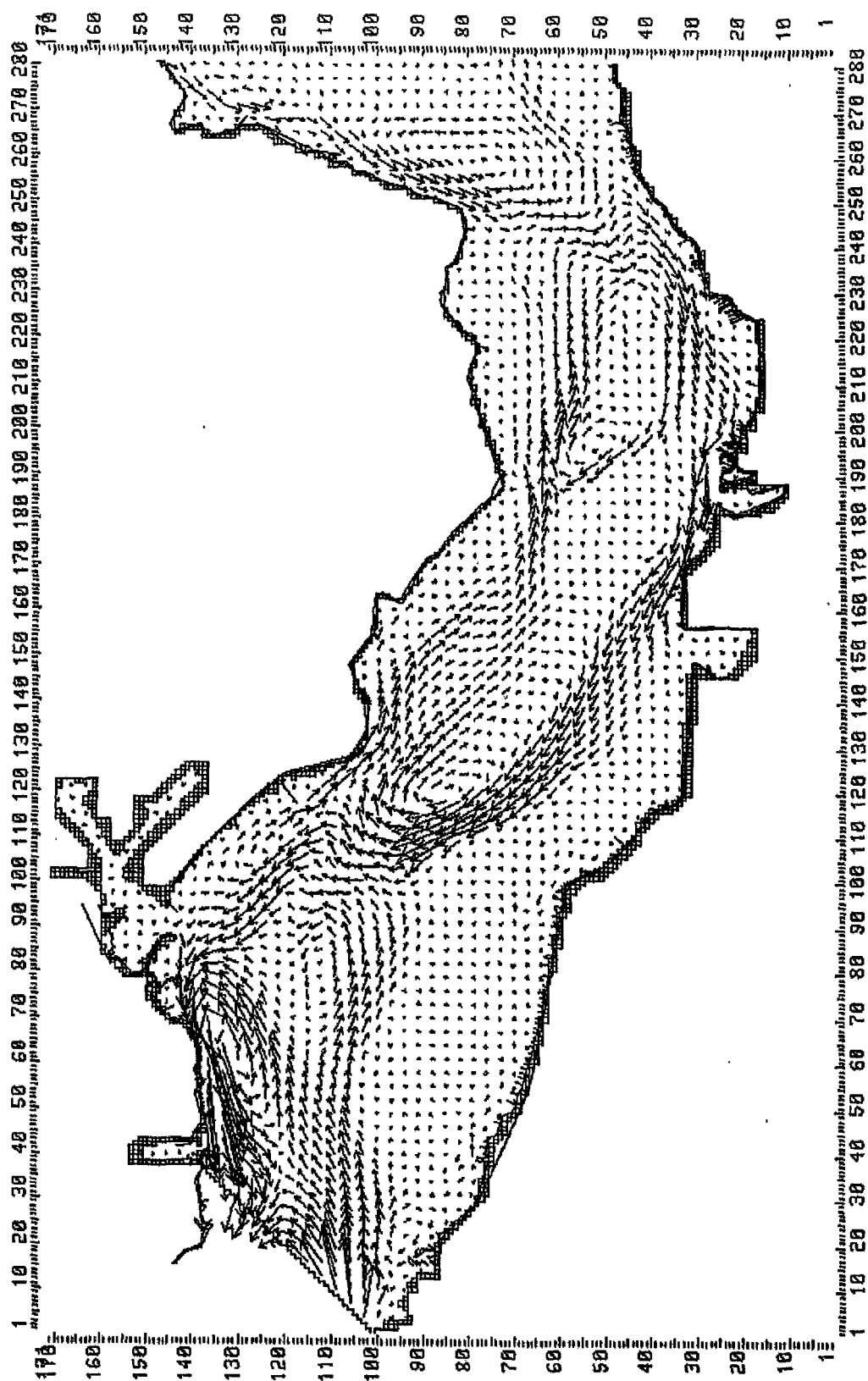


Figuur 3.4 Transportpaden voor het residuele zandtransport in het oostelijk deel van de Westerschelde bepaald volgens de McLaren methode (McLaren en Powys, 1994).

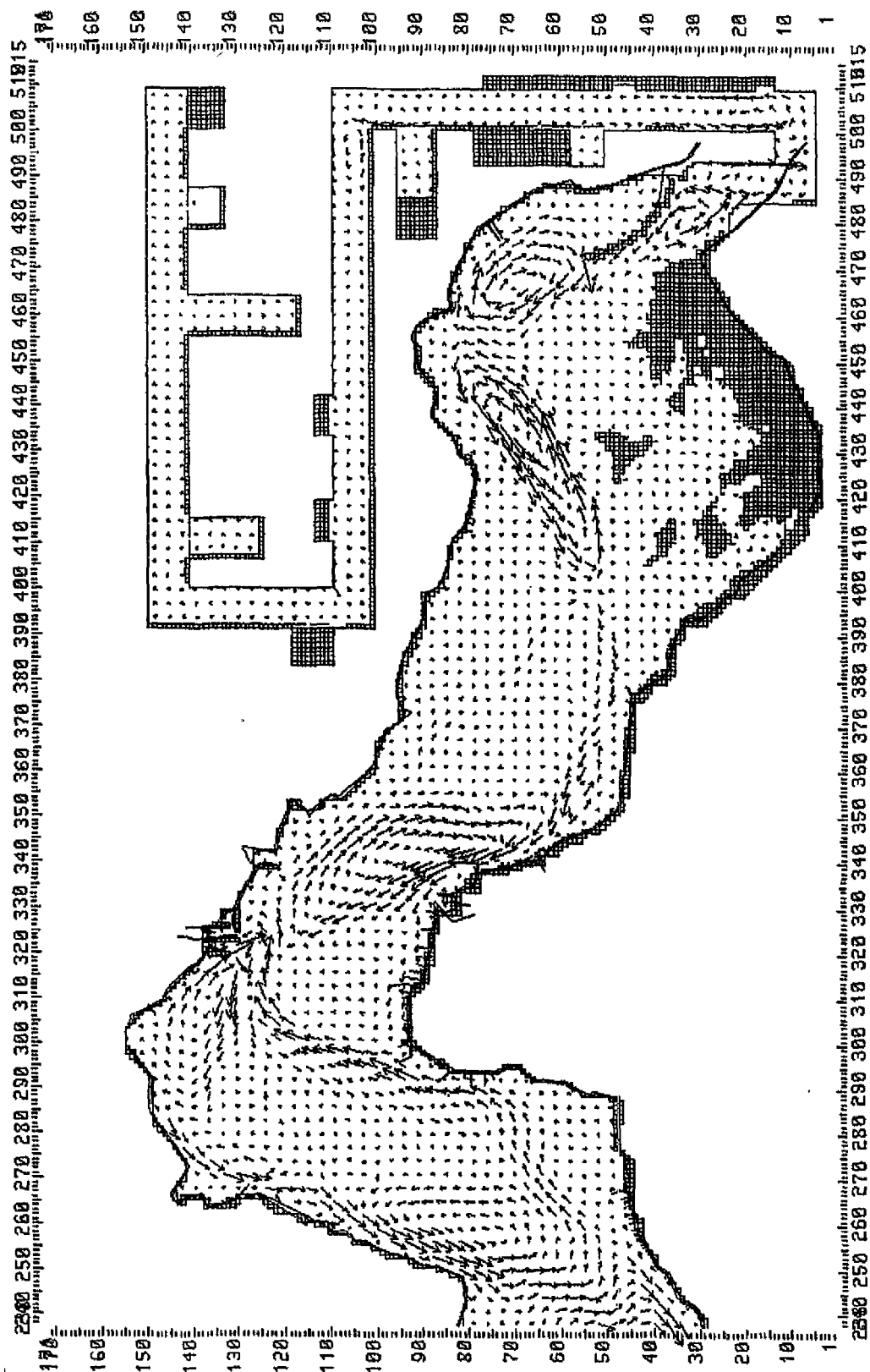


Figuur 3.5

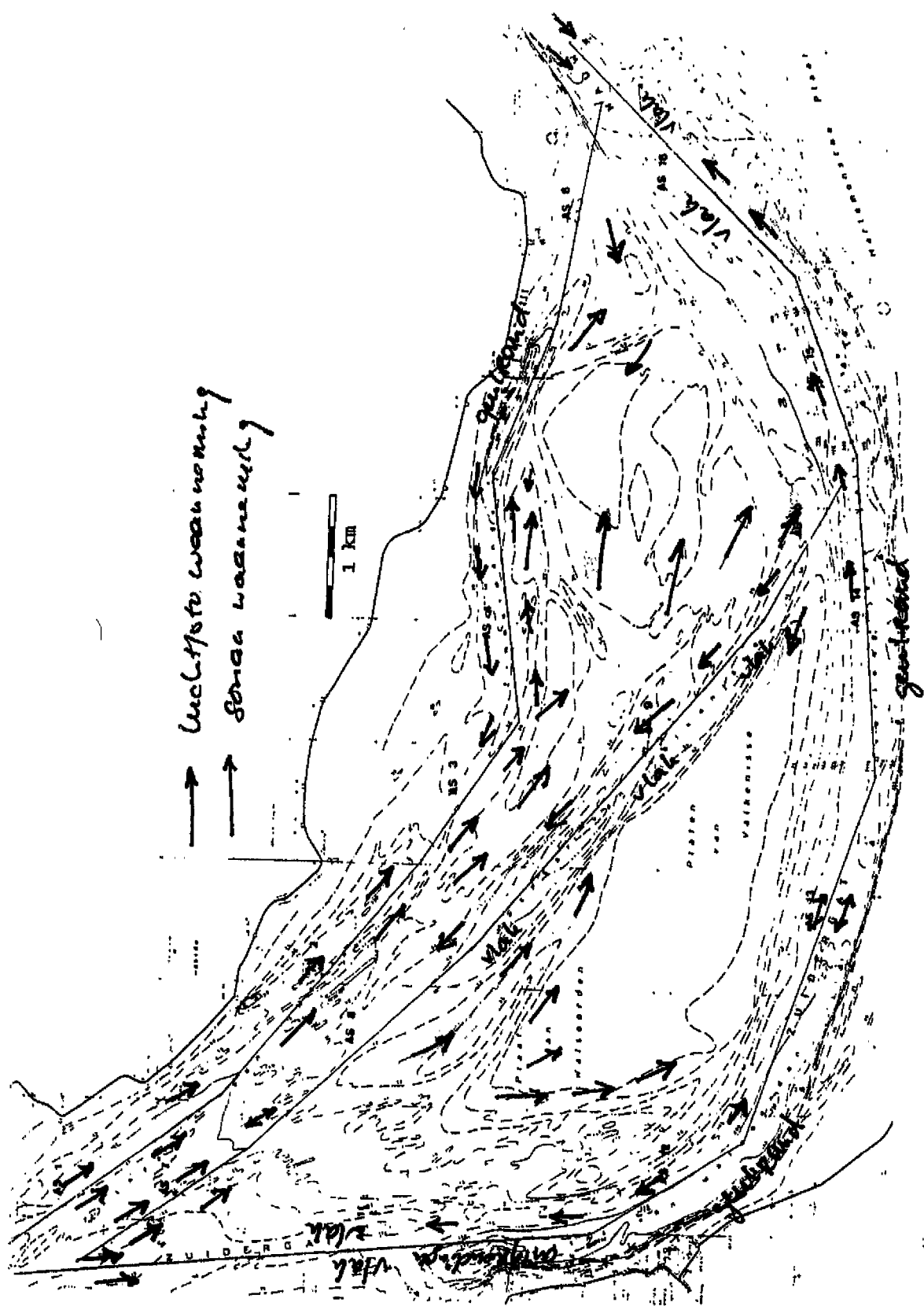
Transportpaden voor het residuële zandtransport in de Beneden Zeeschelde bepaald volgens de McLaren methode (McLaren en Powys, 1994).



Figuur 3.6 Euleriaanse resstromen (water) voor een gemiddeld getij in het westelijk deel van de Westerschelde berekend met het numerieke waterbewegingsmodel DETWES; $2\frac{1}{2}$ grids $\equiv 1 \text{ m}^2/\text{s}$ (Van der Male, 1993).



Figuur 3.7 Euleriaanse resstromen (water) voor een gemiddeld getij in het oostelijk deel van de Westerschelde berekend met het numerieke waterbewegingsmodel DETWES; $2\frac{1}{2}$ grids = $1 \text{ m}^2/\text{s}$ (Van der Male, 1993).



Figuur 3.8 Residuele zandtransportpaden in het oostelijk deel van de Westerschelde afgeleid uit sonarwaarnemingen (Ruessink, 1991) en luchtfotoïnterpretaties (Asselman, 1991).

4 Mechanismen voor residuele zandtransporten in estuaria

4.1 Inleiding

Residuele zandtransporten worden aangedreven door verscheidene mechanismen die zowel in ruimte als in tijd qua intensiteit variëren. De mechanismen die al voor vele estuaria zijn beschreven zijn de getij-asymmetrie, dichtheidsstromingen en "scour lag" en "settling lag". De invloed van het ruimtelijk stroombeeld bestaande uit eb- en vloedscharen is reeds op kwalitatieve wijze door Van Veen (1950). In dit rapport wordt dit aangeduid door de term Getijgedreven Residuele Strooming. Daarnaast kunnen in delen van het estuarium residuele sedimenttransporten worden aangedreven als gevolg van variaties in transporterend vermogen van de strooming bij grote veranderingen van het geulprofiel. Golfwerking kan tijdens stormen in ondiepe gebieden de grootte van het residueel transport beïnvloeden. Als sprake is van sterke ruimtelijke gradiënten in stroomsnelheden en suspensiegehaltes kunnen door dispersie lokaal residuele transporten worden aangedreven. Het algemene patroon van resttransporten in de Westerschelde wordt daar echter nauwelijks door beïnvloed. Dit mechanisme wordt daarom binnen deze analyse niet nader behandeld.

4.2 Residueel zandtransport door asymmetrie in de waterbeweging

4.2.1 Getij-asymmetrie

Een progressieve getijgolf in ondiep water vervormt door bodemwrijving, door veranderingen in de geometrie van het bekken (convergenties/divergenties) en door reflecties van de getijgolf (Nichols and Biggs, 1985). Binnen een estuarium kunnen daarnaast vervormingen van de getijgolf optreden als gevolg van de interactie tussen het getij en de komberging en daarmee de vorm van het intergetijdegebied. In een estuarium met relatief ondiepe geulen zal de voortschrijding van het laagwater worden vertraagd waardoor de vloeduur wordt verkort, ofwel het getij wordt a-symmetrisch. In een estuarium met uitgebreide intergetijdegebieden, en dus relatief grote komberging, zal juist het hoogwater vertragen waardoor de ebduur wordt verkort (Speer and Aubrey, 1985; Friedrichs and Aubrey, 1988; Fry en Aubrey, 1990). Het zijn deze vervormingen in het verticale getij die het verloop van de stroomsnelheid in gedurende eb en vloed en daarmee ook het residueel sedimenttransport bepalen (Fig. 4.1).

Boon en Byrne (1981) en Dronkers (1984 en 1986) veronderstellen dat een inletsysteem waarvan het intergetijdegebied reeds sterk is opgehoogd zal tenderen naar een ebdominant zandtransport en omgekeerd. Friedrichs et al. (1992) hebben aangetoond dat de richting en de grootte van de vervorming van het horizontale getij als gevolg van getij-asymmetrie binnen het estuarium, zowel in lengte- als dwarsrichting kan variëren (Fig 4.2). De ondiepe geulen en het intergetijdegebied zijn over het algemeen vloeddominant met betrekking tot water- en sedimenttransport terwijl de diepere geulen tenderen naar ebdominanties. Het zou interessant zijn om de amplitudes en fasen van de zowel de horizontale als de verticale getijcomponenten (M_2 , M_4 en M_6) te berekenen voor enkele karakteristieke locaties in de Westerschelde. Vervolgens kan worden geanalyseerd in hoeverre deze onderling met elkaar samenhangen en hoe deze gerelateerd zijn aan de morfologie. Friedrichs en Aubrey (1988) hebben uit modelresultaten afgeleid op welke wijze de fasen en amplitudes van de horizontale getijcomponenten van het M_2 en M_4 het sedimenttransport bij de bodem beïnvloeden (Fig 4.3).

In de ondiepe Noordzee en de Westerschelde wordt de getijgolf asymmetrisch doordat de voortplantingssnelheid van de top van de getijgolf groter is dan van het dal (Dronkers, 1986). De vloeduur wordt korter dan de ebduur, waardoor tijdens vloed grotere gemiddelde en maximale stroomsnelheden optreden dan tijdens de eb. Een vrij globale maat voor de getij-asymmetrie is de verhouding tussen de ebduur en

de vloedduur. In de Westerschelde is de gemiddelde vloedduur bij Vlissingen, Bath, Antwerpen en Gent respectievelijk: 0.88, 0.85, 0.73, en 0.39 korter dan de gemiddelde ebduur, gemeten over de periode van 1971 tot 1980 (Claessens en Belmans, 1984). Dit wijst op een steeds sterkere asymmetrie van de getijgolf in landwaartse richting, met name in het smalle en relatief ondiepe Belgische deel van het estuarium (zie ook Fig. 4.5). Uit metingen blijkt dat de maximale vloodsnelheden voor alle dwarsdoorsneden in de Westerschelde bij vloed hoger zijn dan bij eb (Fig 4.4). De verschillen tussen de maximale stroomsnelheden bij eb en vloed zijn van 1933 tot 1975 aanzienlijk toegenomen, vooral door een toename van de maximale vloodsnelheden. Deze hogere vloodsnelheden zullen een overwegend vloedgedomineerd residueel zandtransport aandrijven.

Dronkers (1984) geeft aan dat door geomorfologische karakteristieken van het getijdebekken een verschil in hoog- en laagwaterkenteringsduur kan ontstaan, waardoor er eveneens een resttransport van sediment kan ontstaan. Dit laatste is alleen van belang voor sediment met relatief lage vloodsnelheden (slib).

4.2.2 *Getijgedreven Residuele Stroming (GRS)*

Als gevolg van de interactie tussen het horizontale getij en de geometrie ontstaan horizontale circulatiepatronen zoals eb- en vloodscharen, eb- en vloedgedomineerde geuldelen en stromingen rondom obstakels of intergetijdegebieden. Deze reststromen van water worden hier aangeduid als Getijgedreven Residuele Stroming (GRS). Dit is gedefinieerd als het residuele watertransport op een willekeurige lokatie in een estuarium als gevolg van het getij, gemiddeld over een doottij-springtij cyclus. Residuele stroming als gevolg van de rivierafvoer, meteorologische invloeden en dagelijkse en twee-wekelijkse ongelijkheden in het getij vallen hiermee weg. Dit betekent dat geïntegreerd over een dwarsprofiel van dijk tot dijk de GRS geheel wordt gecompenseerd; een vloedgedomineerd GRS wordt dus altijd binnen het dwarsprofiel gecompenseerd door een ebgedomineerd GRS.

De Getijgedreven Residuele Stroming is een factor 10 tot 100 kleiner dan de maximale stroomsnelheden. Toch is het GRS patroon door de "ruimtelijke consistentie" van groot belang voor het residuele zandtransport in een dwarssectie (zie ook Van der Kreeken en Robaczewska, 1993). GRS is door Fischer et al. (1979) gedefinieerd als tidal pumping. Deze definitie wekt echter de nodige verwarring, omdat tidal pumping door andere auteurs wordt aangeduid als: a) de *netto verplaatsing van sediment* als gevolg van het gecombineerde effect van variaties in stroomsnelheid, suspensieconcentraties en doorstroomoppervlak in de tijd (Dyer, 1988) en b) de reststroom in het estuarium als gevolg van variaties in het totale watervolume gedurende de doottij-springtij cyclus (Prandle, 1991).

Van Veen (1950) schrijft het ontstaan van eb- en vloodscharen vooral toe aan bochtwerkingen, ten gevolge van traagheidseffecten en Coriolis, en het feit dat de maximale vloodstroomsnelheid bij een hogere waterstand optreedt dan de maximale ebstroomsnelheid (Fig. 4.6). Kjerfve (1978) heeft in een ondiep, goed gemengd estuarium aangetoond dat de bodem topografie een goede indicator is voor de lange termijn netto circulatie, door een interactie tussen altemerende waterbeweging en de estuariene geometrie. Aan de hand van een numeriek waterbewegingsmodel is Ridderinkhof (1988) tot dezelfde conclusie gekomen voor de westelijke Waddenzee. De Jonge (1992) heeft uit een groot aantal stroommetingen een soortgelijke relatie tussen de vloed- en ebgedomineerde geulen aangetroffen in het Eems estuarium. Granat en Ludwick (1980) beschrijven de interactie tussen de bathymetrie en de stroming (bij de bodem) op een ondiepte in de mond van de Chesapeake Bay. De ondiepte zou het resultaat zijn van een "quasi-equilibrium" tussen de elkaar ontwijkende eb- en vloeddominante zandtransporten (Fig. 4.7). Volgens Peters en Sterling (1976) is de configuratie van eb- en vloodscharen in de Westerschelde mede bepaald door de vorm van de dijken (Fig. 4.8).

De residuele watertransporten worden aangetroffen in de in- en uitloop van een geulbocht, omdat daar de eb- en vloodstroom door de traagheid langs elkaar stromen. Een soortgelijk patroon is waargenomen in het

oostelijk deel van de Westerschelde (Jeuken, 1992). Als gevolg van de getij-asymmetrie treden de maximale vloodsnelheden op bij een hogere waterstand dan de maximale ebsnelheden. Voor het oostelijk deel van de Westerschelde is dit voor vloed en eb op respectievelijk NAP +2 m en NAP 0 tot -0,5 m (Jeuken, 1992). Door dit verschijnsel ontstaat binnen een dwarsprofiel een vloedoverschot in de ondiepe gebieden, hetgeen wordt gecompenseerd door een eboverschot in de diepere delen.

4.2.3 *Dichtheidsstroming*

De Schelde is een goed gemengd estuarium met dichtheidsverschillen tussen de bodem en het oppervlak die meestal kleiner zijn dan 2 kg/m^3 (Peters en Sterling, 1976). Alleen bij hoge rivierafvoeren wordt een gedeeltelijke stratificatie waargenomen. Er is een longitudinale dichtheidsgradiënt die een estuariene circulatie, de zogenaamde dichtheidsstroom aandrijft. Deze dichtheidsstroming beïnvloedt de vorm van de stroomverticalen: de stroomverticaal tijdens vloed wordt bij de bodem versterkt en aan het oppervlak verzwakt. Tijdens eb gebeurt het omgekeerde (Fig. 4.9). De dichtheidsstromingen zijn het sterkst ontwikkeld nabij het troebelheidsmaximum in de Beneden Zeeschelde en bedragen daar ca. 10 tot 20 cm/s. Zowel zee- waarts als landwaarts wordt de invloed van de dichtheidstroming op de stroomsnelheidsverticalen snel kleiner. Dit fenomeen is in de Westerschelde met name in de diepere geulen goed waarneembaar, ondanks de sterke verticale menging (Fig. 4.10) (Peters en Sterling, 1976; Jeuken, 1992; Fettweis et.al., 1994). De snelheidsgradiënt bij de bodem is daardoor tijdens vloed groter dan tijdens eb, zodat bij dezelfde verticaal gemiddelde stroomsnelheid tijdens vloed de bodemschuifspanningssnelheid (U_s) groter is dan tijdens eb. Bij gelijke stroomsnelheid, waterdiepte en bodemruwheid heeft een stroomverticaal bij vloed een hogere sedimenttransportcapaciteit dan tijdens eb. Uit veldwaarnemingen is niet bekend of dit verschil in de opbouw van de stroomverticaal (en de verdeling van schuifspanning in de verticaal) het residuele zandtransport significant beïnvloedt. Maar als dit wel het geval is, dan zal het in de diepere geulen bijdragen tot een residuele zandtransport in vloedrichting, doordat:

- a) het netto vloeddominante watertransport bij de bodem samenvalt met de hogere suspensieconcentraties in de verticaal nabij de bodem (Dronkers, 1984) en
- b) tijdens vloed meer sediment in suspensie wordt gebracht door de grotere schuifspanningssnelheid.

4.3 Residueel zandtransport door asymmetrie in depositie- en resuspensieprocessen

4.3.1 *Settling lag en scour lag*

Door Straaten en Keunen (1958) en Postma (1967) is een kwalitatief concept ontwikkeld dat landwaarts sediment transport verklaart in ondiepe gebieden waarbij de stroming in landwaartse richting afneemt (Fig. 4.11). Het transport is het gevolg van een asymmetrie in depositie- en resuspensieprocessen, gedefinieerd als "settling lag" en "scour lag". *Settling lag* is de gemiddelde tijd, en in een bewegende watermassa dus ook een afstand, die een sedimentpartikel nodig heeft om de bodem te bereiken als de vertraagde stroom deze niet meer in suspensie kan houden. Het sediment wordt daardoor meer stroomopwaarts van de locatie afgezet dan de locatie waar de kritische stroomsnelheid voor beweging wordt overschreden, doordat het uitzakkende deeltje nog wordt verplaatst door de bewegende watermassa. *Scour lag* is het gevolg van verschil in stroomsnelheid dat nodig is om sediment in suspensie te krijgen vergeleken met de stroomsnelheid waarbij sediment wordt afgezet. Dit tijds- en dus ook plaatsverschil wat hierdoor ontstaat wordt de *scour lag* genoemd. Scour en settling lag zijn van belang voor het residuele sedimenttransport in situaties met een in landwaartse richting afnemend getijamplitude voor sediment met relatief lage valsnelheden en cohesieve eigenschappen. Voor het residuele zandtransport in de Westerschelde wordt derhalve verondersteld dat deze mechanismen van ondergeschikt belang zijn.

4.3.2 Onder- en oververzadiging

Zoals reeds beschreven in hoofdstuk 2 reageert het momentane zandtransport met een vertraging op veranderingen van de stroomsnelheid; bij een toename van de stroomsnelheid is sprake van een onderverzadigd sedimenttransport en omgekeerd. De afstand die de stroming nodig heeft om de suspensielaast aan te passen aan de nieuwe transportcapaciteit wordt aangeduid als de *aanpassingslengte* (zie bijvoorbeeld paragraaf 11.3 in Van Rijn, 1989). Door het verloop van het horizontale getij volgen op een lokatie onder- en oververzadiging van het sedimenttransport elkaar op. Echter, gesuperponeerd op deze gradiënten kunnen in bepaalde gebieden gemiddeld over een getijfase vertragingen of versnellingen optreden. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij sterke veranderingen van het geulprofiel. In die ruimtelijk consistente vertraging- of versnellingsgebieden is, gemiddeld over een getijfase, sprake van een respectievelijk oververzadigd- of onderverzadigde sedimenttransport.

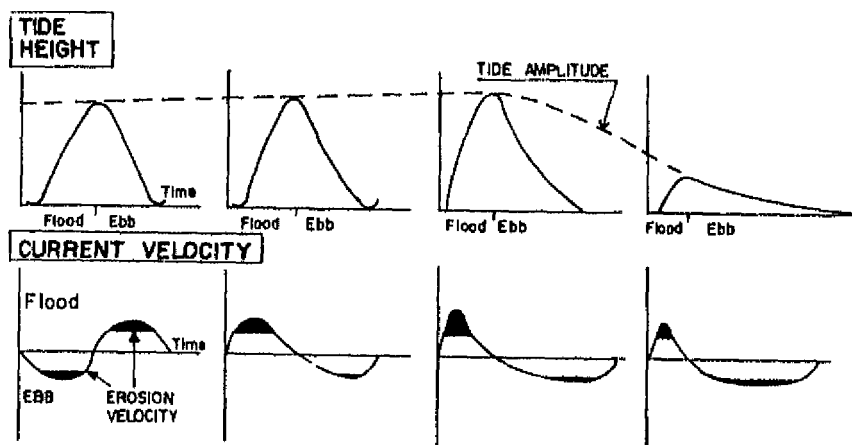
Het gevolg hiervan is dat er tijdens de fase met oververzadiging meer zand wordt getransporteerd in de ene richting dan dat er tijdens de daarop volgende onderverzadigde fase in de tegenovergestelde richting wordt getransporteerd. Dus ondanks een gegeven symmetrische verloop van de stroomsnelheid kan ten gevolge van onder- en oververzadigingen toch een netto zandtransport worden aangedreven. Dit sedimenttransport zorgt er feitelijk voor dat de verstoring, bijvoorbeeld een profielverruiming, wordt uitgevlakt en is daarmee een natuurlijk terugkoppelingsmechanisme.

In Fig. 4.12 is schematisch uitgebeeld hoe het suspensietransport verloopt van een geul in evenwicht naar een te ruime geul. De waterbeweging over eb en vloed is volkomen symmetrisch. Er wordt gesteld dat de waterkolom in de evenwichtsgeul is verzadigd, ofwel dat het werkelijke zandtransport gelijk is aan de transportcapaciteit. De stroomsnelheden tijdens de vloedperiode nemen af in de richting van de stroming, doordat hetzelfde debiet wordt verdeeld over steeds groter doorstroomoppervlak. Door de afname van de stroomsnelheden neemt ook de transportcapaciteit af in die richting. Analooq aan de temporele vertragingseffecten, reageert ook hier het momentane transport met een zekere vertraging op de verandering van de transportcapaciteit. De verticalen zijn derhalve gemiddeld over de vloedperiode *oververzadigd* en netto zal er sedimentatie optreden. Tijdens de ebperiode neemt de stroomsnelheid en daarmee ook de transportcapaciteit toe in de stromingsrichting. Hierdoor zijn de verticalen in de verstoorde zone gemiddeld over de ebperiode *onderverzadigd* en netto zal sediment worden geërodeerd. De grootte van het residuele zandtransport in de richting van de drempels door onder- en oververzadigingen lijkt te worden bepaald door de mate waarin de drempel en de aangrenzende geuldelen uit evenwicht zijn met de getijvolumina, ofwel de afwijking ten opzichte van hun evenwichtsligging. Een residueel zandtransport door onder- en oververzadigingen kan alleen optreden als deze afwijkingen of verstoringen zich binnen de getijweg voor het zandtransport bevinden.

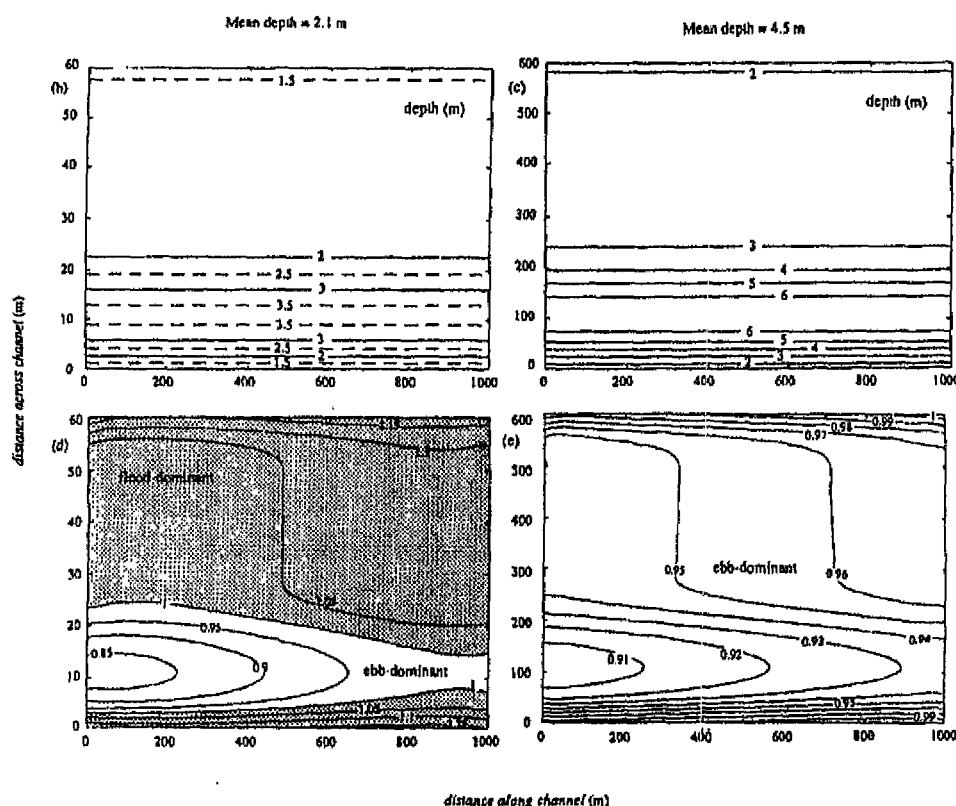
In de Westerschelde komen twee soorten afwijkingen van geuldoorsneden ten opzichte van de getijvolumina voor, namelijk die ten gevolge van morfologische ontwikkelingen en die door menselijk ingrijpen, zoals het vaargeulonderhoud. Het baggeren zoals dat nu in de Westerschelde wordt uitgevoerd is een vrijwel continue proces waarbij zand van de baggerlocaties (drempels) naar de stortlocaties wordt verplaatst. Het vaargeulonderhoud staat garant voor een minimale breedte en diepte van de vaargeul en heeft daardoor een statisch karakter. De gebaggerde drempels in het oostelijk deel van de Westerschelde worden op een aantal meters beneden hun evenwichtsdiepte onderhouden, de zogenaamde overdiepte. Hierdoor ontstaan redelijk abrupt ruime geulsecties in het lengteprofiel van het estuarium, met een verruiming in de orde van 10 tot 20%. Het stroombeeld wordt daardoor lokaal beïnvloed en residuele zandtransporten door onder- en oververzadigingen worden aangedreven. De veranderingen van de geuldoorsneden ten opzichte van het evenwichtsprofiel is voor deze kunstmatige situaties veel meer abrupte en groter in het geval van de meer geleidelijke morfologische ontwikkelingen. Het belang van onder- en oververzadigingen ten aanzien van het residuele zandtransport lijkt voor meer natuurlijke situaties dan ook minder belangrijk te zijn dan voor bijvoorbeeld gebaggerde drempelgebieden.

4.4 Residueel zandtransport door golfwerking

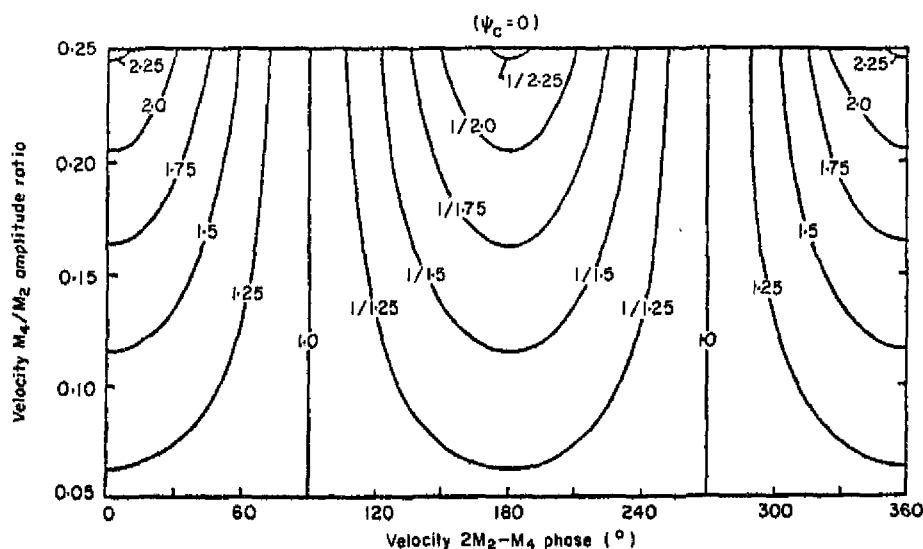
In ondiepe kustgebieden kan tijdens stormen de richting van het residuele sedimenttransport sterk veranderen. Dronkers (1984 en 1986) beschrijft dat voor een estuarien systeem met een relatief groot aandeel aan intergetijdegebieden, zoals bijvoorbeeld de Waddenzee, tijdens rustige weersomstandigheden een landwaarts en tijdens stormen een zeewaarts residueel transport van fijn sediment wordt opgewekt. Golfwerking beïnvloedt het (lokale) zandtransport op twee manieren: a) door het verhogen van suspensieconcentraties als gevolg van de extra turbulenties (resuspensie) en b) door een driftstroom in de richting van de golfvoortplanting. De Westerschelde is een relatief beschut bekken met een sterke getijstroom. Een substantieel residueel transport ten gevolge van golfwerking kan daarom alleen worden verwacht op te treden in de intergetijdegebieden tijdens stormen. Er zijn echter geen sedimenttransportmetingen bekend in de Westerschelde die dit verschijnsel bevestigen. Wel is bekend dat na een zware westerstorm, versterkte sedimentatie plaatsvindt aan de oostzijde van platen. Uit gedetailleerde hoogtemetingen op platen in de Ooster- en Westerschelde blijkt eveneens het effect van een zware storm, zoals in februari 1990 (Van der Weck, 1994; Ruitenbeek, 1995). Op de Galgenplaat (Oosterschelde) zijn wel langdurige sedimenttransportmetingen uitgevoerd, waaruit is gebleken dat tijdens stormen er naast grote totale ook grote netto transporten optreden, vooral bij waterdiepte's kleiner dan 1,2 m (Geomor, 1984).



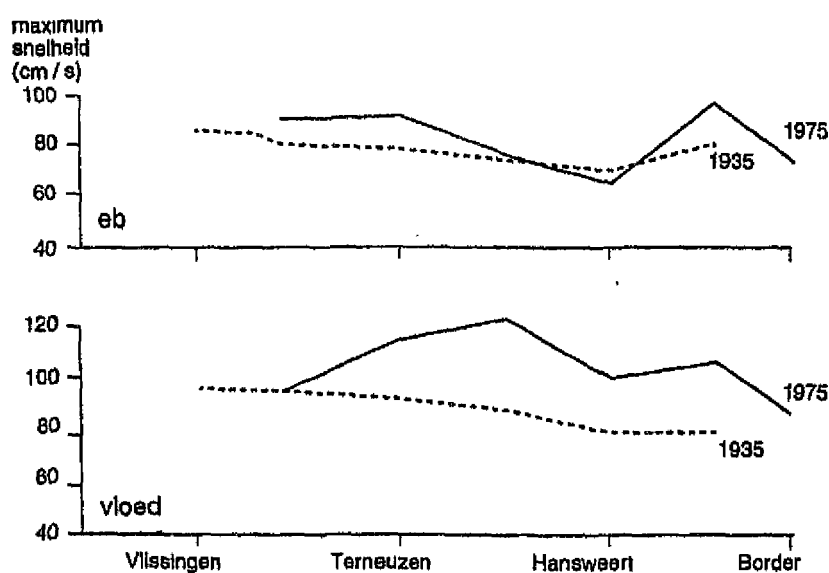
Figuur 4.1 Schematisch model van residueel transport en trapping aangedreven door het getij en de rivieraflow in een macrogetijde estuarium met een matig ontwikkelde dichtheidsstroming (Allen et al, 1980).



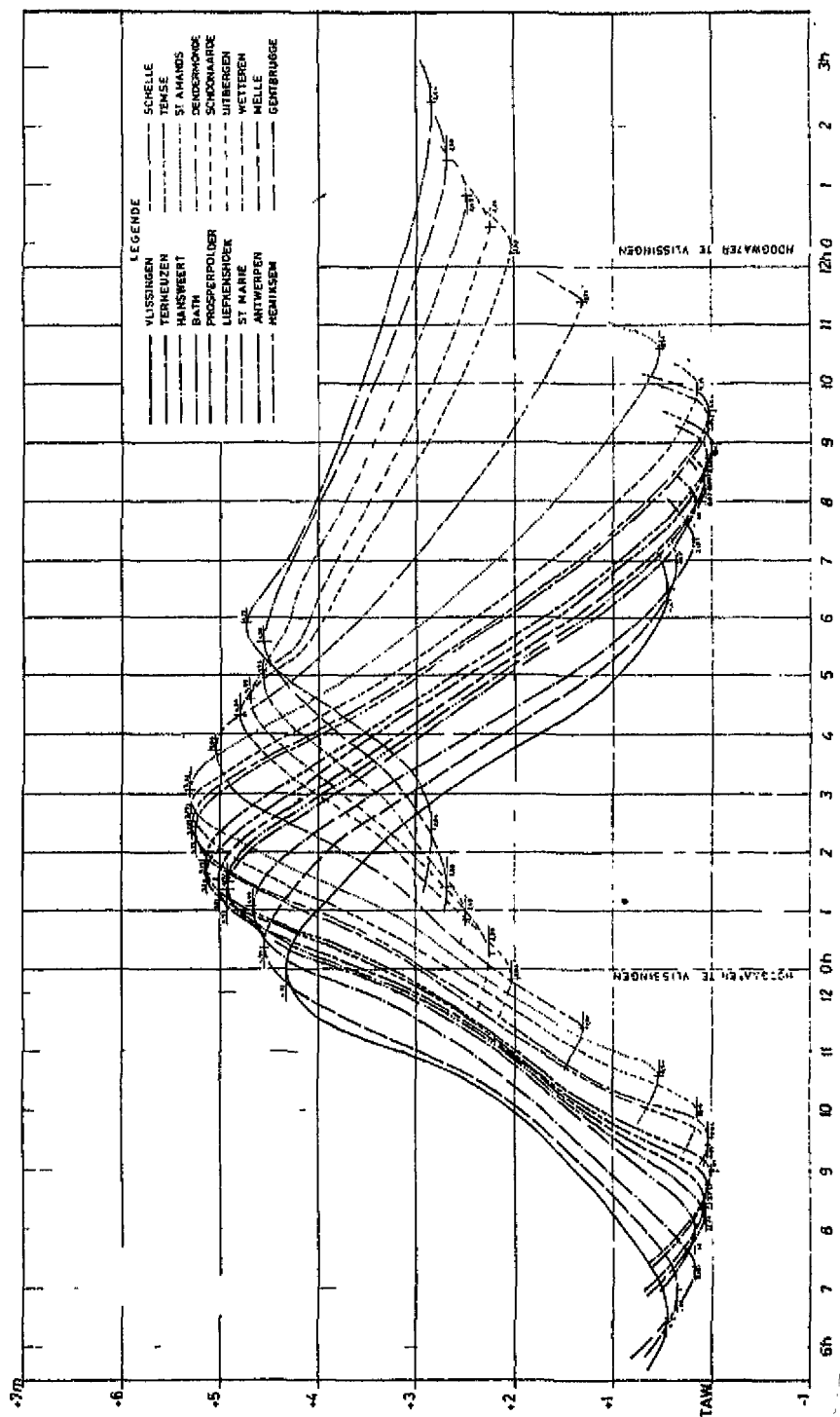
Figuur 4.2 De geometrie van twee schematisaties (b en c) met een diep en ondiep gedeelte (c is dieper dan b met name de geulsectie) en modelresultaten voor deze schematisaties (d en e) met de ratio van de verticaal-gemiddelde stroomsnelheden van maximum vloed en maximum eb (Friedrichs et al., 1992).



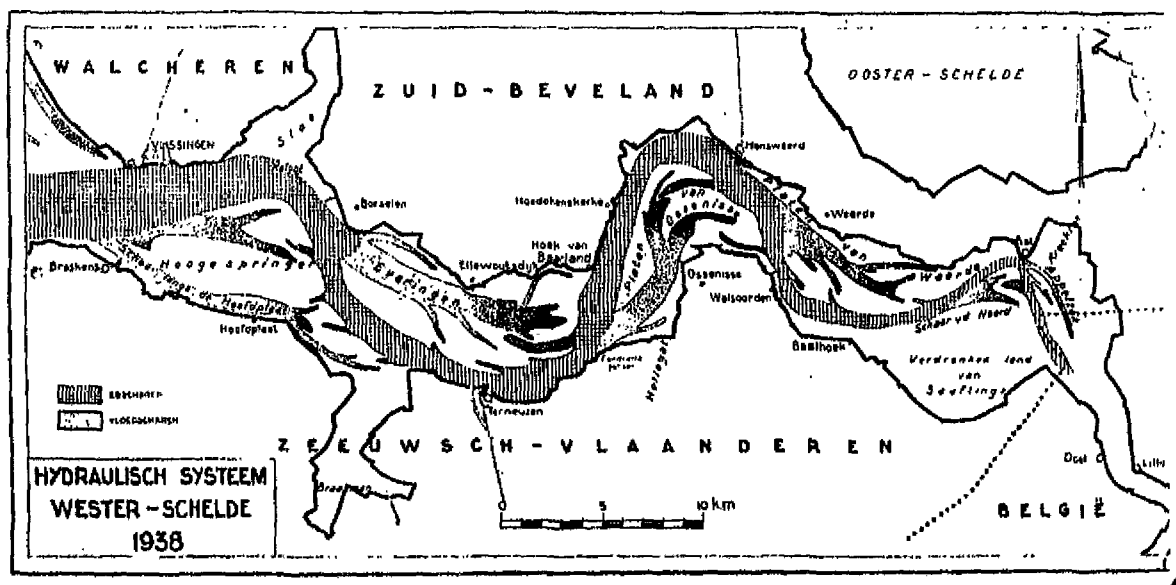
Figuur 4.3 Ratio van het sedimenttransport nabij de bodem voor vloed en eb (kritische erosiesnelheid = 0 m/s) als functie van de relatieve fase en amplitude van de M_2 en M_4 componenten van het horizontale getij (Friedrichs and Aubrey, 1988).



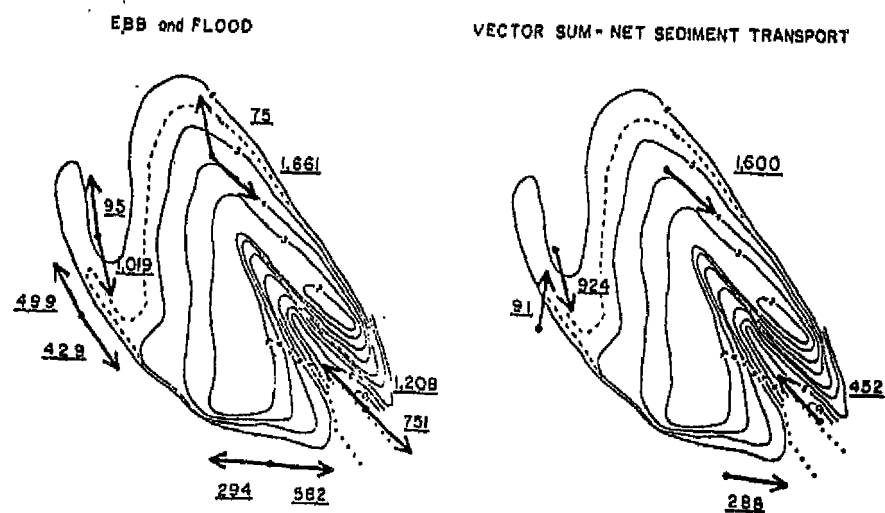
Figuur 4.4 Maximum eb- en vloodsnelheden in de Westerschelde in 1935 en 1975 (Pieters, 1993).



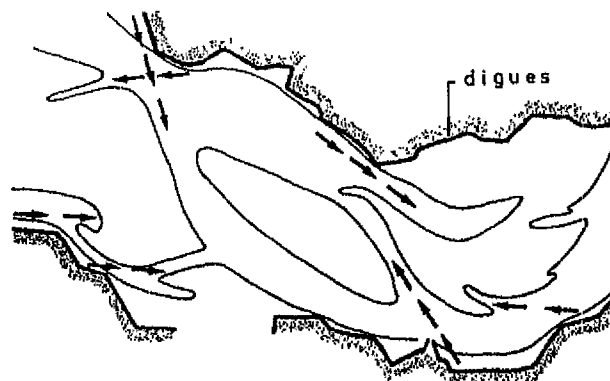
Figuur 4.5 Plaatselijke getijkrommen gemiddeld getij (1971-1980) in het Scheldeestuarium van Vlissingen tot Gentbrugge (Claessens en Belmans, 1984).



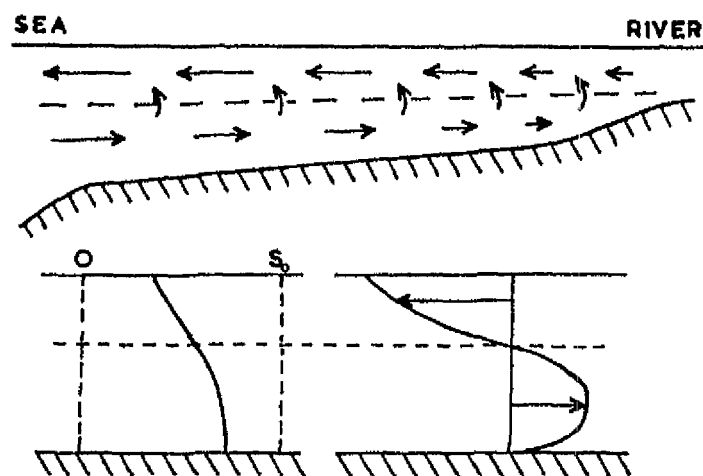
Figuur 4.6 Eb- en vloedscharen in de Westerschelde volgens Van Veen (1950).



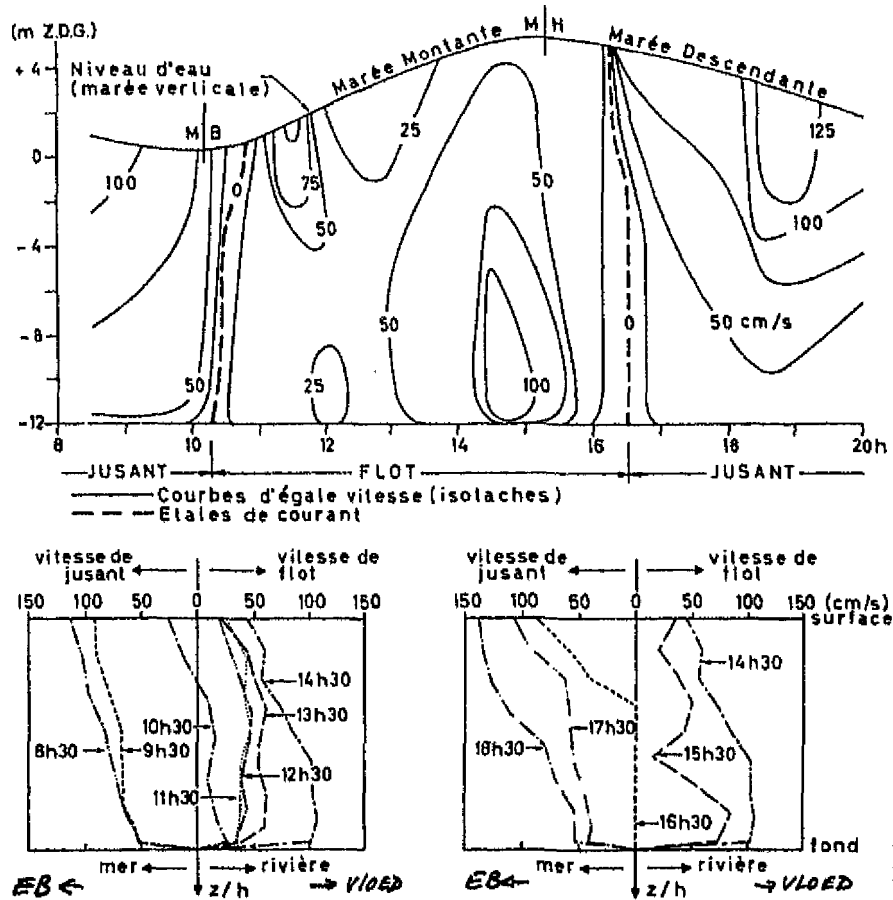
Figuur 4.7 Geïntegreerde effectieve "fluid power" (in ergs/cm^2 per getijcyclus) rondom een plaat (Granat and Ludwick, 1980).



Figuur 4.8 Invloed van dijkconfiguraties op het geulensysteem (Peters en Sterling, 1976).



Figuur 4.9 Gedeeltelijk gemengd estuarium met mengpatroon: boven longitudinale sectie estuarium; beneden- typische saliniteit- en stroomverticaal.



Figuur 4.10 Stroommetingen ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens (15 oktober 1970) (Peters en Sterling, 1976)

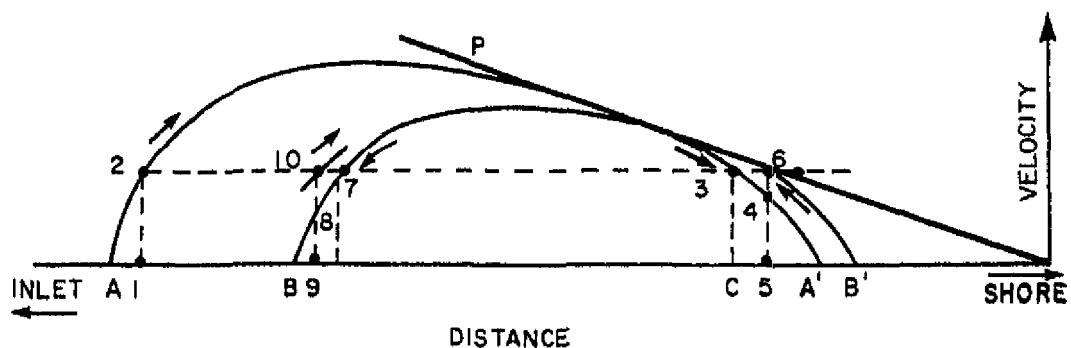
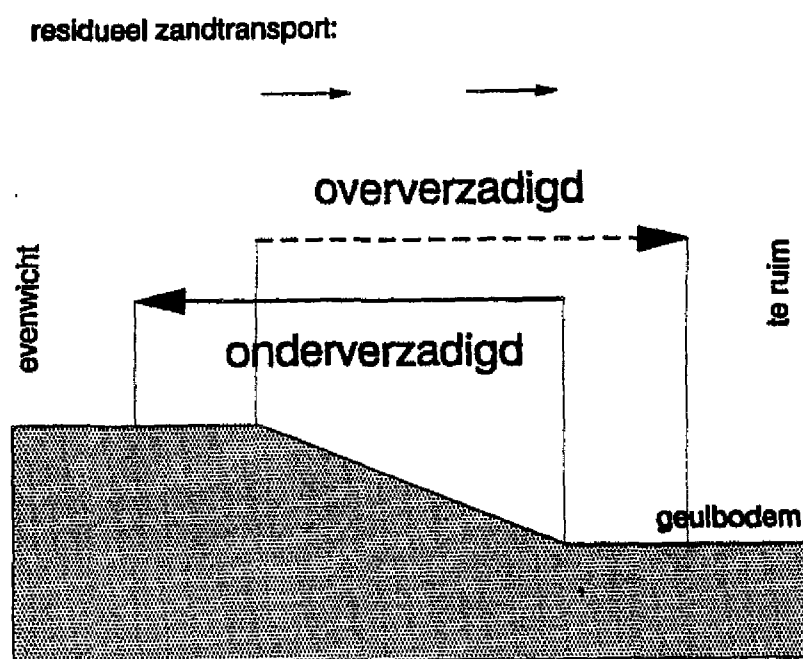


Figure 2-39. *Settling lag effect.* The diagram shows the velocities with which different water masses move with the tides at each point along a section through a tidal inlet (left) to the shore (right). Although the tide at fixed points is assumed to be symmetrical, the distance-velocity curves are asymmetrical. A water mass moves in and out along one such curve. The tangent (P) represents the maximum current velocity in each point and meets each curve at a point attained by the water mass at half tide. The curves apply only to idealized average conditions, and scour lag is neglected.

A particle at point 1 is taken into suspension by a flood current (water mass at A) of increasing velocity and starts to settle toward the bottom at point C, when the current still has a velocity equal to 2. While settling, the particle is carried farther inland by the still flooding currents and reaches the bottom at point 5 while the water has a velocity at point 4.

Scour lag effect. After the turn of the tide, the particle cannot be eroded by the same water mass (AA') because this water parcel attains the required velocity later at a point beyond the particle toward the inlet. The sediment particle is therefore eroded by a more landward water mass (B') and is transported toward the inlet to point B. At 7, it starts to drop out of suspension and reaches the bottom at point 9. During one tidal cycle, the particle has therefore been transported landward from point 1 to 9. After a number of these landward transport cycles, the particle may reach a point where it cannot be entrained by subsequent ebb flow currents because of the landward decrease of the average velocity of the tidal current (after Postma, 1967, and Van Straaten and Kuenen, 1957).

Figuur 4.11 Settling lag en scour lag effect (in Nichols and Biggs, 1985).



Figuur 4.12 Schematische weergave van onder- en oververzadigde getijstroom in de aanloop naar een sterk verruimd geuldeel (bijvoorbeeld drempel).

5 Kwantificering zandtransportmechanismen in de Westerschelde

5.1 Inleiding

Het is zeer lastig om residuele sedimenttransporten in het estuarium te meten. Het residuele sedimenttransport is namelijk het verschil van twee grote termen, het eb- en vloedtransport, die slechts met een beperkte nauwkeurigheid kunnen worden bepaald. Daarnaast is het residuele sedimenttransport een zeer discontinu proces, zowel lateraal als temporeel. Laterale variaties treden voornamelijk op als gevolg van variaties in waterdiepte en stroomsnelheid over de dwarsdoorsnede. Temporele variaties treden op in verschillende tijdschalen; binnen een getij, gedurende de doottij-springtijcyclus, binnen een seizoen en van jaar tot jaar afhankelijk van extreme stormen of rivierafvoeren en over de 18,6 jarige cyclus in het getijamplitude (Kjerfve et al., 1981).

Het is echter nog moeilijker om aan de hand van metingen te analyseren in welke mate verschillende mechanismen bijdragen tot dat residuele transport. In de literatuur wordt meestal alleen op een kwalitatieve wijze beschreven hoe het transport van sediment plaats vindt in relatie tot de drijvende krachten of mechanismen. Van de Kreeke en Robaczewska (1993) hebben voor het Eems estuarium een relatie afgeleid tussen het bodemtransport en de verschillende componenten waaruit de getij-gemiddelde stroming is opgebouwd. De getij-asymmetrie verklaarde meestal minder dan 20% van het totale residuele sedimenttransport aan de bodem. De rest, en daarmee het overgrote deel, kwam op rekening van de reststroom (GRS) als gevolg van het getij en de rivierafvoer.

Dyer (1988) heeft in een review voor een aantal estuaria (Gironde, Thames, Tamar, Ghang Jiang en Susquehanna) berekeningen van het transport van fijn sediment (in suspensie) met elkaar vergeleken. Hij heeft het sedimenttransport daarbij in verschillende termen onderverdeeld:

- 1) advectioneel transport als gevolg van de Euleriaanse stroming en het effect van de "Stokes drift",
- 2) tidal pumping als gevolg van faseverschillen in stroomsnelheden, concentratie van suspensief materiaal en veranderingen in doorstroomoppervlak,
- 3) dichtheidsstromingen en
- 4) traagheidseffecten te vergelijken met settling en scour lag.

Een dusdanige analyse kan alleen worden uitgevoerd als over een dwarsprofiel in een voldoende aantal verticalen tegelijkertijd stroomsnelheid en suspensieconcentraties zijn gemeten. De resultaten van dat onderzoek zijn voor de analyse van zandtransporten minder relevant omdat ze vooral betrekking hebben op het residuele transport van slib in het troebelheidsmaximum.

Gezien de hier genoemde bezwaren is besloten de gemeten zandtransporten niet in deze analyse te betrekken. Voor de gevoeligheidsanalyse is gebruik gemaakt van de zandtransportformule van Engelund-Hansen. Deze resultaten worden alleen vergelijkenderwijs gebruikt, dus kwalitatief en relatief.

5.2 Getij-asymmetrie versus Getijgedreven Residuele Stroming

Met behulp van stroomsnelheidsmetingen in de Overloop van Valkenisse wordt getracht het aandeel van getij-asymmetrie en GRS aan het sedimenttransport af te leiden. Figuur 5.1 geeft een indruk van de de laterale en temporele variaties in de waterbeweging gedurende een volledige getijcyclus in deze hoofdgeul (Meetdienst Zeeland, 1991). Voor 4 meetlocaties over het dwarsprofiel (Fig. 5.3) zijn de verticaal gemiddelde stroomsnelheden, de watertransporten en de waterstand te Baalhoek weergegeven.

Het verloop van de waterstand in de tijd is duidelijk asymmetrisch; de vloeduur bedraagt 6 uur de ebduur $6\frac{1}{2}$ uur. De waterstandsvaling verloopt vrij regelmatig, de stijging van de waterstand daarentegen niet. In de eerste 4 uur van de vloedfase stijgen de waterstanden $2\frac{1}{2}$ m (0.63 m/uur) om vervolgens in $1\frac{1}{2}$ uur 2 m te stijgen (1.25 m/uur). De vertraging van de stroomkentering op de waterstandskentering tijdens laagwater bedraagt in de vier meetpunten een 30 tot 45 min. De stroomkentering tijdens hoogwater treedt in meetpunt 2 bijna een uur na de waterstandskentering op; in de meetpunten 3 en 4 bedraagt de vertraging een half uur en in meetpunt 5 treden ze vrijwel gelijktijdig op.

Tijdens eb is het stroombeeld in de meetpunten zeer eenvormig. De maximale stroomsnelheden treden op in meetpunten 3 en 4, ongeveer halverwege de ebfase. De verschillen in stroomsnelheden zijn het grootst tijdens de vloed. De stroomsnelheden tijdens vloed nemen gelijkmatig af van meetpunt 2 naar meetpunt 5 in de binnenbocht (gezien voor de vloedstroom). In meetpunt 4 en 5 nemen de stroomsnelheden na een eerste piek sterk af om vervolgens net voor het moment van hoogwater opnieuw toe te nemen. In meetpunt 5 is zelfs enige tijd sprake van een omkering van de stroom. Dit inzakken van de vloedstroom is het gevolg van ontstaan van een stroomneer aan de noordzijde van de geul, in de luwte van de Platen van Valkenisse. Tijdens hoogwater en maximum stroom wordt deze neer verbroken door het water dat uit de Schaar van Valkenisse de Overloop van Valkenisse in stroomt.

Uit het verloop van de watertransporten wordt duidelijk hoe belangrijk de diepe geuldelen (meetpunten 2 en 3) zijn voor het totale eb- en vloeddebieten door de geul. Het vloedoverschot in Mp 2, de buitenbocht voor de vloed, wordt geheel teniet gedaan door het eboverschot in het ondiepe deel van het geulprofiel (Mp 4 en 5). De totale geul vertoont daarmee, geheel volgens de verwachting een reststroom in ebrichting.

Aan de hand van de tijd-stroomsnelheid curves zijn met het zandtransportmodel van Engelund-Hansen momentane zandtransporten bepaald (Fig. 5.2). Voor de berekening van de effectieve bodemruwheid (k_s) zijn de aanbevelingen van Van den Berg (1987) gevolgd. Hierbij is rekening gehouden met variërende ruwheden tijdens eb en vloed. Er is uitgegaan van een onbeperkt aanbod van bodemsediment en met bocht- en vertragingseffecten is geen rekening gehouden.

Het verloop van het zandtransport in de tijd is sterker gepiekt dan het stroomsnelheidsverloop. Zeer opvallend is de grote piek in meetpunt 2 net voor hoogwater met een berekend momentaan zandtransport van $1,7$ kg/ms. Aan de zuidzijde van de Overloop van Valkenisse (meetpunt 2) is er een sterk residueel zandtransport in vloedrichting. In de resterende meetpunten overheerst het zandtransport bij eb en wel in toenemende mate van meetpunt 3 naar 5. Zeer opvallend is het enorme eboverschot in Mp 5, veroorzaakt door het vrijwel ontbreken van een transport in vloedrichting. Over de hele raai is grofweg sprake van een eboverschot in sedimenttransport. Er is niet gecorrigeerd voor de dagelijkse ongelijkheid. Op deze dag was de daling groter dan de stijging. Als dit wel was gebeurd, dan was het eboverschot kleiner uitgevallen.

Deze resultaten illustreren duidelijk het enorme belang van de Getijgedreven Residuele Strooming (GRS) voor zowel de reststroom als het residuele sedimenttransport in deze geuldoorsnede. De volgende stap is om het aandeel van GRS per meetpunt via kunstgrepen te neutraliseren om de relatieve invloed van de getij-asymmetrie aan te geven. In de geraadpleegde literatuur zijn geen "standaard methodieken" aangetroffen. Gekozen is voor twee verschillende benaderingen: a) een correctie via het tijd-stroomsnelheidsverloop en b) een correctie via de momentane concentratie.

correctie via het tijd-stroomsnelheidsverloop

Per meetpunt zijn de stroomsnelheden met een vaste factor aangepast zodanig dat het vloed- en ebvolume per meetlocatie aan elkaar gelijk zijn geworden; er is daarmee reststroom. Omdat naar rato van de tijd is gecorrigeerd, is de vorm van het tijd-stroomsnelheidsverloop niet veranderd. Met de aangepaste tijd-stroomsnelheid curves zijn via Engelund Hansen momentane zandtransporten bepaald (Fig. 5.4 a).

Zoals verwacht, blijven de grote verschillen in vorm en amplitude tussen de verschillende meet-

locaties blijven bestaan. Het effect op de eb- en vloedtsedimenttransporten is echter aanzienlijk. Het vloedgedomineerde zandtransport in meetlocatie 2 neemt af van 50% naar 6% van het totale transport. In meetlocatie 4 is het eboverschot afgenomen van 50% tot 6% en in meetpunt 5 is het enorme eboverschot van 90% omgeslagen in een licht vloedoverschot van 16%! Opvallend is dat in tegenstelling tot deze grote wijzigingen het eboverschot in meetlocatie 3 vrijwel niet is veranderd.

correctie via de momentane concentratie

Eerst is de reststroom naar rato verdeeld over het getij. Vervolgens is aan de hand van het niet-gecorrigeerde verloop van tijd-zandtransport, het zandtransport berekend in de reststroom. Het zandtransport in deze reststroom is in mindering gebracht op het momentane verticaal gemiddelde zandconcentratie zoals bepaald uit de ongecorrigeerde zandtransportberekening (Fig. 5.4 b).

De eb- of vloedoverschotten worden in al de meetlocaties kleiner. Het effect van deze correctie is echter veel geringer dan volgens de correctie via stroomsnelheden. Binnen het geulprofiel blijven zeer grote verschillen aanwezig. Als deze correctie een goed beeld geeft van het aandeel van de getij-asymmetrie, dan is deze extreem variabel op korte afstanden.

De correctie via de stroomsnelheid levert waarschijnlijk meer representatieve resultaten op dan de correctie via concentraties. Deze laatste methode onderschat de invloed van GRS omdat het een verandering van de stroomsnelheid niet volgens de derde macht doorwerkt. Een manco voor beide correctiemethodes is dat het GRS niet constant zal zijn gedurende eb en vloed. Het GRS wordt niet evenredig over een getij opgebouwd, maar zal vooral het gevolg zijn van faseverschillen rond maximum eb- en vloedstroom. Zo is bijvoorbeeld de centrifugale versnelling, die in sterke mate het uitbochten van de stroming en daarmee GRS bepaald, maximaal ontwikkeld rond het tijdstip van maximum stroom.

Resumerend kan worden gesteld dat binnen een geul aanzienlijke laterale verschillen optreden in totale en residuele zandtransporten. Het uit de waterbeweging berekende residuele zandtransport varieert over een dwarsraai binnen 1 km van een vloedgericht transport van 7,3 ton tot een ebtransport van 6,8 ton, respectievelijk 50% en 90% van het totale zandtransport ter plaatse. Deze variaties zijn het gecombineerde effect van getij-asymmetrie en Getijgedreven Residuele Stroming, met in dit geulprofiel een zeer belangrijke rol voor het GRS.

Het is interessant om het effect van de geulgeometrie te analyseren op de getijasymmetrie en het residuele zandtransport via de modelberekeningen zoals beschreven door Friedrichs et al. (1992). Dit kan worden aangevuld met een analyse van de ruimtelijke variatie van de getijcomponenten van zowel het horizontale als het verticale getij zoals berekend met waterbewegingsmodellen.

5.3 Onder- en oververzadigingen

Voor een geschematiseerde situatie (Fig. 5.5) worden de gevolgen getoond van een geulverruiming op de momentane en residuele zandtransporten. In deze gevoeligheidsanalyse wordt het getij voorgesteld als een perfecte sinus. Er is dus geen residueel water- en sedimenttransport als gevolg van de getij-asymmetrie of GRS (Fig. 5.6). Aan de linkerzijde is het geulprofiel in evenwicht met het getijvolume, analoog aan het empirisch verband tussen doorstroomoppervlak en getijvolume (Gerritsen en de Jong, 1983). Aan de rechterzijde is het doorstroomprofiel van de geul 10 of 20% te ruim, in Figuur 5.5 geïllustreerd als een verdieping. Hiertussen ligt een overgangsgebied waar de geul van B naar F lineair verruimt. De stroomsnelheid is omgekeerd evenredig gesteld met de verandering van het geulprofiel; 20% verruiming van het geulprofiel betekent een verlaging van stroomsnelheden met 20% (over het gehele getij). De vloed stroomt van links

naar rechts.

Het zandtransport is berekend aan de hand van Engelund Hansen, op basis van dezelfde uitgangspunten zoals in voorgaande paragraaf. De bodemruwheid varieert alleen gedurende het getij en is over het lengteprofiel verder constant verondersteld. De gemiddelde aanpassingsduur van de concentratieverticalen aan de veranderende stroomomstandigheden, de aanpassingslengte, is niet uit veldmetingen bekend. Uitgaande van een verticaal gemiddelde stroomsnelheid van 1 m/s, een Chezy van 60 m^{1/2}/s, een valsnelheid van 2 cm/s en een waterdiepte van 15 m, een aanpassingslengte van 500 tot 1000 m vastgesteld (Van Rijn, 1989). Dit komt neer op een aanpassingsduur van 8 tot 15 minuten. De aanpassingslengte is op de volgende wijze meegenomen in deze berekening: er is verondersteld dat de concentratieverticaal op een bepaalde lokatie (A t/m G) overeenkomt met de transportcapaciteit van een stroomverticaal van 0,5 of 1 km stroomopwaarts.

De gevoeligheid van het residuele zandtransport veroorzaakt door onder- en oververzadigingen, is onderzocht voor veranderingen in a) de grootte van de verstoring, b) de afstand waarover de verstoring plaatsvindt en c) de aanpassingslengte. Deze gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor een profielverruiming van 10 en 20%, aanpassingslengten van 500 en 1000 m en de verstoring over 2 en 4 km. Ter vergelijking: Blik en Ruijter (1994) geven aan dat de doorstroomprofielen ter hoogte van de gebaggerde drempels in de Westerschelde 10 tot 20% ruimer zijn dan het evenwichtsprofiel behorende bij het dominante getijvolume ter plaatse.

De resultaten zijn voor een aantal karakteristieke locaties in het geschematiseerde geulprofiel (A t/m G) samengevat in Figuur 5.7. Op de locaties A en G zijn zowel het eb- als vloedtransport volledig aangepast aan de lokale hydraulische omstandigheden, zodat daar geen sprake meer is van onder- of oververzadigingen en er geen residueel zandtransport plaatsvindt. Van B naar F treedt wel een residueel zandtransport op dat aangedreven wordt door het verschil in de oververzadiging van de vloedstroming en onderverzadiging van de ebstroom. Met de locaties C, D en E worden de kwartielen aangegeven. De grootte van het residuele transport is aangegeven als ratio van het totale (eb+vloed) transport van de geul in evenwicht ter plaatse van A. De grootte van het residuele zandtransport is positief gecorreleerd met de grootte van de verstoring en de aanpassingslengte en negatief met de afstand waarover die verstoring plaatsvindt. Met andere woorden, de grootte van het residuele zandtransport is positief gecorreleerd met de gradiënt van de verstoring (m² verandering doorstroomprofiel per km geullengte).

Dit is voor verschillende verruimingën gekwantificeerd bij een vaste aanpassingslengte (500m) en vaste afstand waarover de verstoring optreedt (2000m) (Fig. 5.8). De ratio van het residueel transport versus het transport in de geul verloopt bijna recht evenredig met de grootte van de verruiming; 20% verruiming betekent een residueel zandtransport orde 20% van het totaal transport voor de geul in evenwicht. Daarnaast bestaat er een vrijwel lineair verband tussen het residueel zandtransport richting drempel en het verschil in transportcapaciteiten tussen de geul en de drempel:

$$T_{\text{res}} \text{ drempel} = 0,3 (T_{\text{tot}} \text{ geul} - T_{\text{tot}} \text{ drempel})$$

Dit verband geldt voor verruimingën tot ongeveer 20%. Voor grotere verschillen in transportcapaciteiten neemt het residueel zandtransport meer dan evenredig toe.

Voor de grootte van het residueel transport is wel belang of het doorstroomprofiel van de geul in evenwicht is met het lokale getijvolume. In Figuur 5.9 is een berekening uitgevoerd waarbij de drempel 10% te ruim en het geulprofiel 10% te krap is. De transportcapaciteit in de geul is fors hoger dan in evenwicht: 38.800 tegen 24.100 kg/m. Het residueel transport richting drempel bedraagt in dat geval 7350 kg/m. Dit is

beduidend meer dan in een situatie met een verruiming van 0 tot 20% (4900 kg/m) terwijl het ten opzichte van het totaal transport wel overeenstemt.

Tot nu toe is voor de eenvoud een ééndimensionale benadering toegepast. In Figuur 5.9 is een semi-tweedimensionale weergave van een drempel gemaakt, met een linker- en rechterzijde van de geul. Voor een verruiming van 20% is het residueel transport berekend voor drie situaties: 1) zonder (GRS), 2) met GRS waarbij de stroomsnelheden aan weerszijden van de geul 5% groter dan wel kleiner zijn en en 3) met een GRS van 10%. Deze laatste zijn meer representatief voor de situatie rondom de verdiepte drempels in de Westerschelde (zie ook Tank, 1996). Alleen de invloed van de getij-asymmetrie is hierin niet verwerkt.

Hoewel het ruimtelijk patroon sterk door GRS wordt beïnvloed, valt op dat het residueel transport in de richting van de drempel, en daarmee de netto sedimentatie op de drempel, daar niet sterk op reageert.

Resumerend kan worden gesteld dat een ruimtelijke verstoring op de waterbeweging, bijvoorbeeld door een geulverruiming van 10 tot 20%, een residueel zandtransport wordt aangedreven in de richting van de verruiming met een grootte tot ca. 30% van het totale zandtransport voor een geul in evenwicht. Een residueel zandtransport door onder- en oververzadigingen kan alleen optreden als de profielverandering zich voordoet binnen de getijweg voor het zandtransport (Fig 5.11). Opgemerkt wordt dat in praktijk bij een vertragende stroming meer turbulenties worden opgewekt dan bij een versnellende stroming bij dezelfde veranderingen in stroomsnelheid. Een vertragende stroming kan daardoor meer sediment in suspensie houden en heeft daarmee een langere aanpassingslengte dan een versnellende stroom. Het mechanisme van onder- en oververzadiging zal hierdoor nog iets worden versterkt.

5.4 Maatgevende mechanismen voor de residuele zandtransporten in de Westerschelde

Het residuele zandtransport in een estuarium is het gecombineerde resultaat van een aantal mechanismen, zoals getij-asymmetrie, Getijgedreven Residuele Stroming (GRS), dichtheidsstromen, golfwerking, "scour lag", "settling lag" en door vertragingseffecten die leiden tot ruimtelijk gerelateerde onder- en oververzadigingen van het sedimenttransport.

getij-asymmetrie en Getijgedreven Residuele Stroming

Gezien de vorm van het verticale getij, namelijk een kortere duur van de vloedfase, zal in de Westerschelde een vloedgericht zandtransport worden bevorderd. De component ten gevolge van de getij-asymmetrie kan zowel grootte als richting variëren in het estuarium. Verondersteld wordt dat in relatief ondiepe gebieden een sterkere vloedgerichte component aanwezig is dan in de diepe geulen. Wellicht is in sommige diepe geulen zelfs sprake van een ebgerichte component. Dit kan worden geanalyseerd als de amplitudes en fasen van de verschillende getijcomponenten (M_2 , M_4 en M_6) van zowel het verticale als horizontale getij worden onderscheiden en in samenhang worden bestudeerd. Dan kan eveneens worden vastgesteld of de invloed van de getij-asymmetrie toeneemt naarmate de getijgolf dieper in het estuarium doordringt.

De richting en de grootte van het residuele sedimenttransport hangen sterk af van het patroon van de residuele waterbeweging, de Getijgedreven Residuele Stroming. In een aantal estuaria is een soortgelijk consistent patroon aangetroffen tussen de transportpaden en de Euleriaanse reststroom. Deze vertoont horizontale circulaties op verschillende schalen met name als gevolg van de interactie tussen de hydraulica en de morfologie. GRS is vooral sterk ontwikkeld in bocht-overgangen (drempels) en in eb- en vloedscharen.

Het locale belang van de getij-asymmetrie in de richting en de grootte van het residuele zandtransport in de Westerschelde is meestal ondergeschikt aan het belang van de GRS component ter plekke. Door GRS ontstaan allerlei circulerende patronen, vaak rondom platen en op drempels. GRS hoeft echter niet perse een sterk aandeel te hebben in het residuele zandtransport op de schaal van het estuarium. Een residueel zandtransport in vloedrichting kan bijvoorbeeld worden opgeheven daar een evengroot residueel zandtransport aan de andere zijde van de geul.

Getij-asymmetrie zorgt in de Westerschelde, gemiddeld over een dwarsprofiel, voor een relatief kleine component van het residuele zandtransport in vloedrichting. Echter, door zijn ruimtelijke en temporele consistentie is de getijasymmetrie voor de lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde wel uitermate groot belang.

dichtheidsstromingen, golfwerking en scour- en settling lag

Dichtheidsstromingen zijn alleen van belang in de buurt van het troebelheidsmaximum op de Zeeschelde, dus ter plaatse van de sterkste zoutgradiënt. In de rest van de Westerschelde zal het residueel zandtransport hoogstens licht in vloedrichting worden versterkt (of in ebrichting verzwakt) als gevolg van dichtheidsstromingen.

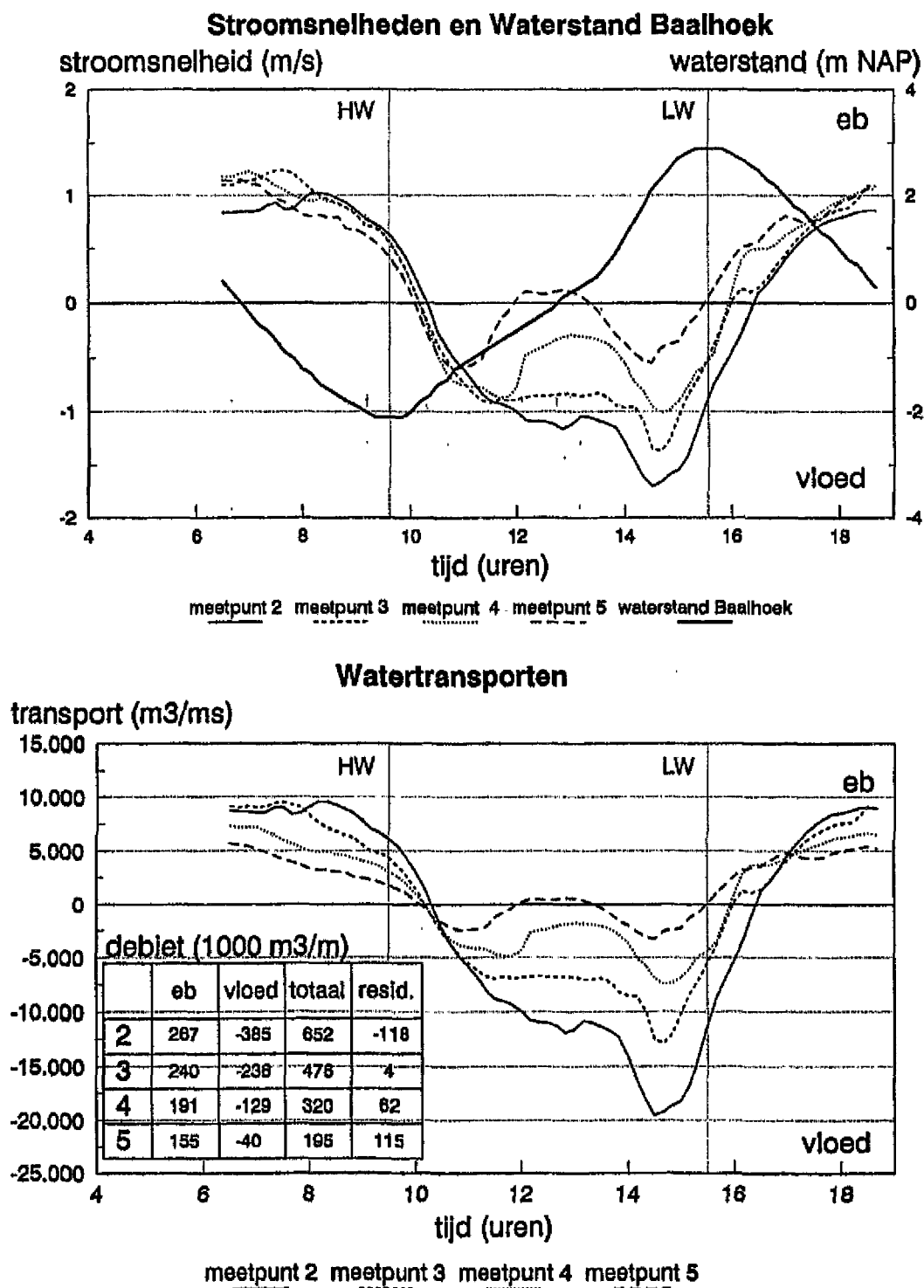
Golven kunnen tijdens zware stormen, dus zeer incidenteel, lokaal voor een significant zandtransport zorgen vanaf een plaat naar de windafwaarts gelegen geulrand. In de regel is dit een verplaatsing van west naar oost, dus een versterking van het transport in vloedrichting.

Transport ten gevolge van het scour en settling lag effect, zoals beschreven door Postma (1967), zijn bij zandig materiaal verwaarloosbaar en daardoor onbelangrijk voor het algemene patroon van residuele zandtransporten.

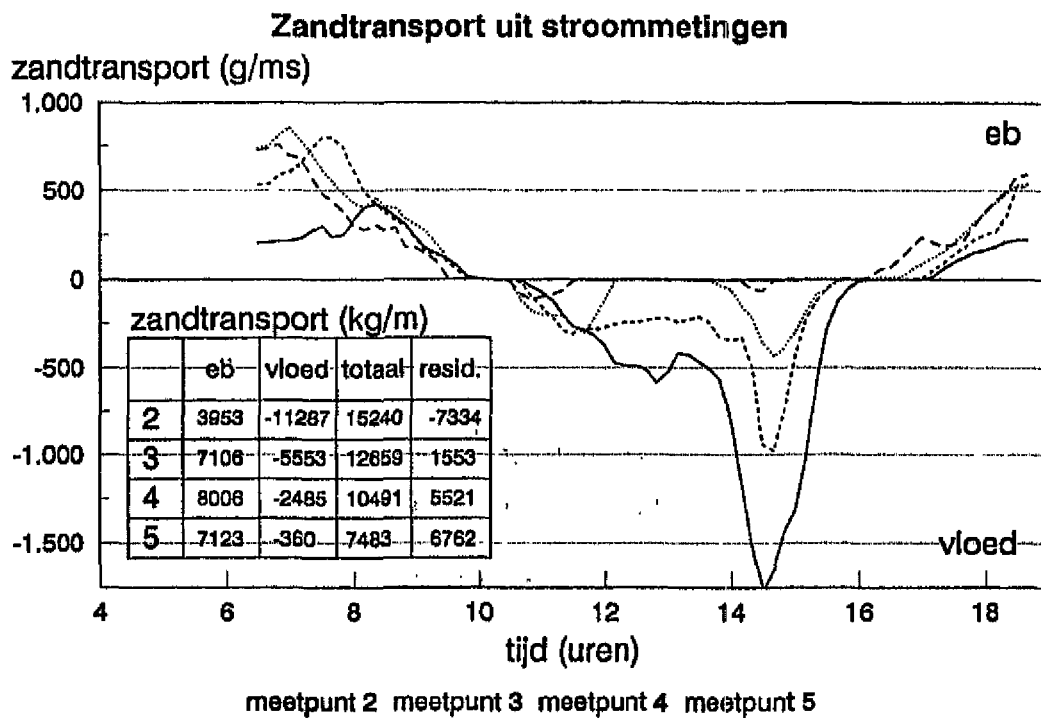
ruimtelijke onder- en oververzadigingen

Er is aangetoond dat ondanks een gegeven symmetrische verloop van de stroomsnelheid toch een residueel zandtransport kan worden aangedreven als gevolg van ruimtelijke vertragingseffecten die leiden tot onder- en oververzadigingen. Hierbij wordt netto zand getransporteerd van geuldelen met een relatief "krap" profiel naar geuldelen met een relatief "ruim" profiel. Dit residuele zandtransport zorgt er feitelijk voor dat een verstoring, bijvoorbeeld een profielverruiming, wordt uitgevlakt en is daarmee een natuurlijk terugkoppelingsmechanisme. De grootte van dit residuele zandtransport is evenredig met de mate waarin de drempel en de aangrenzende geuldelen uit evenwicht zijn met de getijvolumina (afwijking van evenwichtsligging), de afstand waarover deze verstoring zich uitbreidt en de snelheid van aanpassing van de concentratieverticalen met het veranderde stroombeeld (aanpassingslengte). De invloed van onder- en oververzadigingen ten aanzien van het residuele zandtransport lijkt voor natuurlijke "verstoringen" minder belangrijk te zijn dan voor kunstmatige verstoringen, zoals sterk ruimere of krappere onderhouden geuldelen. De reden hiervoor is dat de natuurlijke bronnen of putten ruimtelijk gezien geleidelijker verlopen dan verstoringen door baggeren of storten.

De bovenstaande mechanismen treden tegelijkertijd op in het estuarium. Ze kunnen lokaal een residueel zandtransport in een bepaalde richting versterken dan wel verzwakken. Getijgedreven Residuele Strooming en getij-asymmetrie spelen een dominerende rol ten aanzien van de residuele zandtransporten in de hele Westerschelde. Onder- en oververzadigingen kunnen in de directe omgeving van sterk verdiepte drempels en belangrijke stortlocaties de richting en de grootte van het residuele zandtransport sterk beïnvloeden. Aan de hand van een aantal case-studies zal in het volgende hoofdstuk worden getracht deze inzichten in praktijk te brengen.

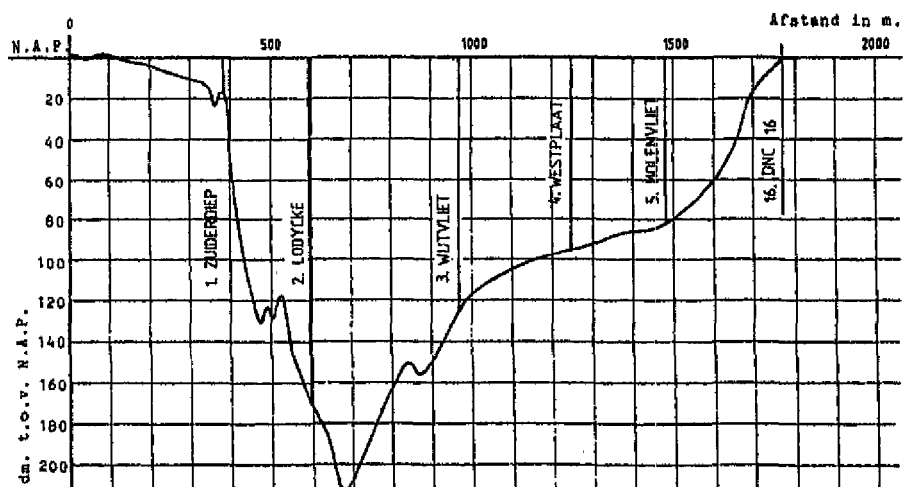


Figuur 5.1 Verticaal gemiddelde stroomsnelheden, watertransporten en debieten in 4 meetlocaties in de Overloop van Valkenisse met de gemeten waterstand bij Baalhoek; 5 september 1990.

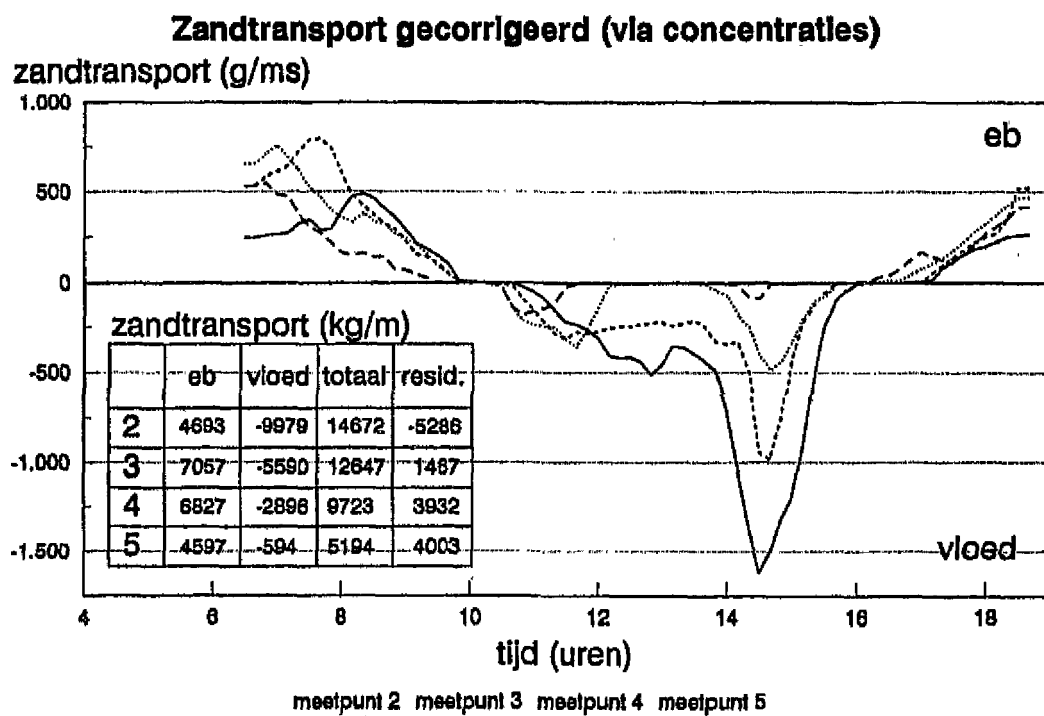
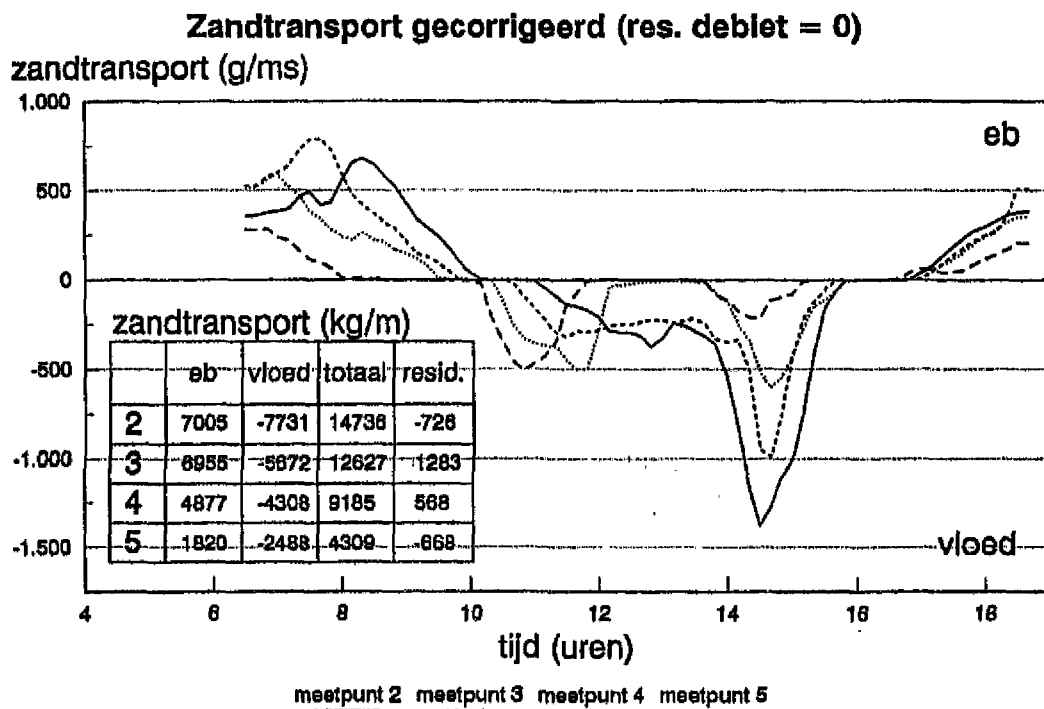


aan de hand van Englund-Hansen
onbeperkt zandaanbod

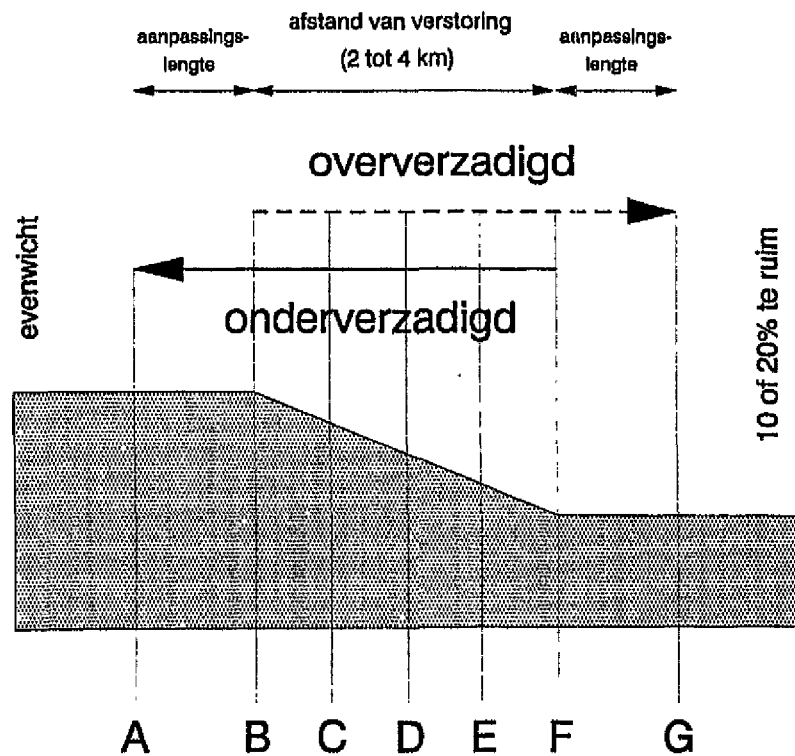
Figuur 5.2 Berekende zandtransporten in 4 meetlocaties in de Overloop van Valkenisse; 5 september 1990.



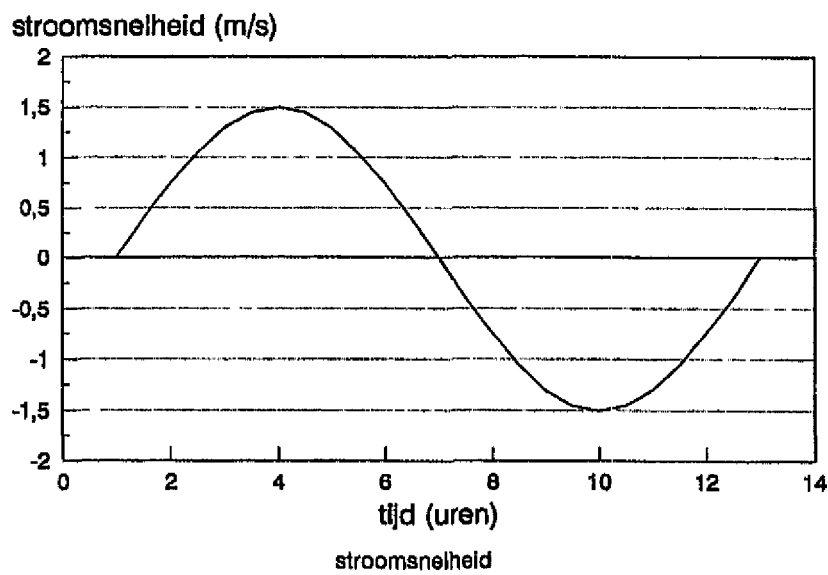
Figuur 5.3 Ligging meetverticalen binnen het dwarsprofiel in de Overloop van Valkenisse; 5 september 1990.



Figuur 5.4 *Berekende zandtransporten in 4 meetlocaties in de Overloop van Valkenisse; 5 september 1990: a) gecorrigeerde waterbeweging (residueel debiet=0) en b) gecorrigeerd via concentraties.*



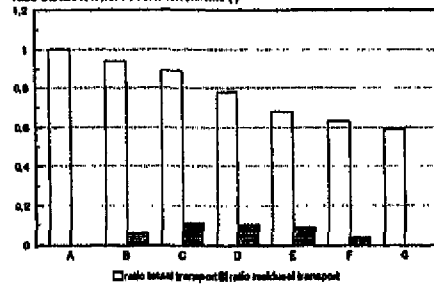
Figuur 5.5 Geschematiseerde situatie voor residueel transport door onder- en oververzadigingen (geulverruiming hier gellustreerd als een verdieping); aan de linkerzijde is het geulprofiel in evenwicht met de waterbeweging (getijvolumina), aan de rechterzijde is het doorstroomprofiel van de geul 10 of 20% te ruim.



Figuur 5.6 Geschematiseerde sinusvormige waterbeweging; zonder getijasymmetrie en GRS.

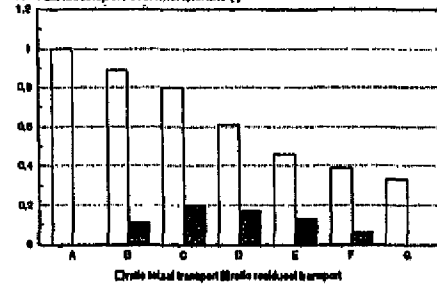
10% verruiming

aanpassingslengte 0,5 km; verstoring 2 km
ratio zandtransport evenwicht/lokaal (%)

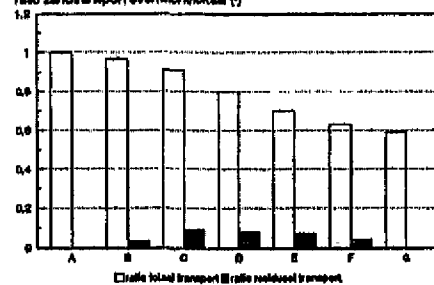


20% verruiming

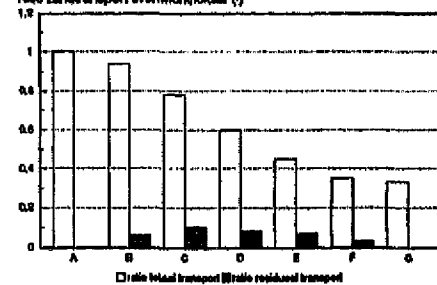
aanpassingslengte 0,5 km; verstoring 2 km
ratio zandtransport evenwicht/lokaal (%)



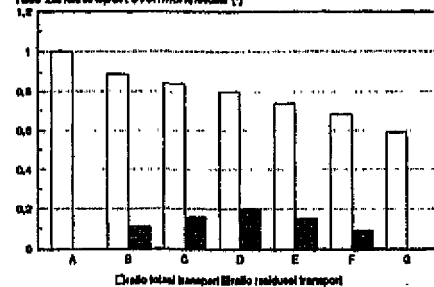
aanpassingslengte 0,5 km; verstoring 4 km
ratio zandtransport evenwicht/lokaal (%)



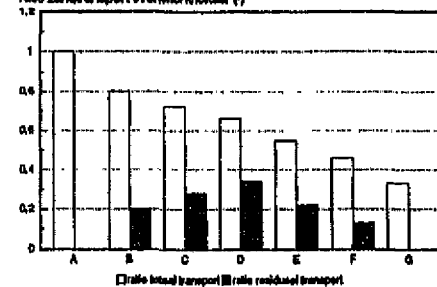
aanpassingslengte 0,5 km; verstoring 4 km
ratio zandtransport evenwicht/lokaal (%)



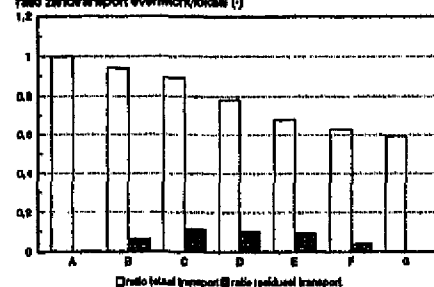
aanpassingslengte 1 km; verstoring 2 km
ratio zandtransport evenwicht/lokaal (%)



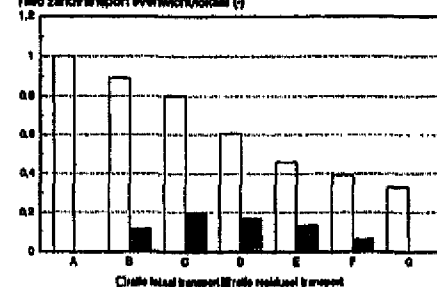
aanpassingslengte 1 km; verstoring 2 km
ratio zandtransport evenwicht/lokaal (%)



aanpassingslengte 1 km; verstoring 4 km
ratio zandtransport evenwicht/lokaal (%)

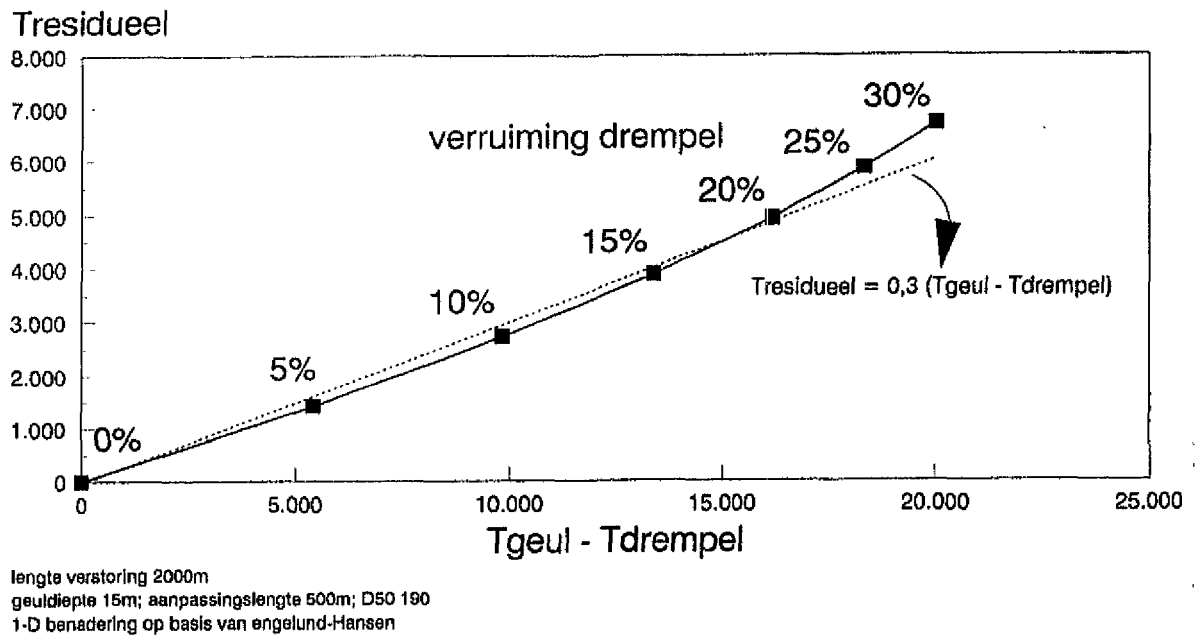


aanpassingslengte 1 km; verstoring 4 km
ratio zandtransport evenwicht/lokaal (%)

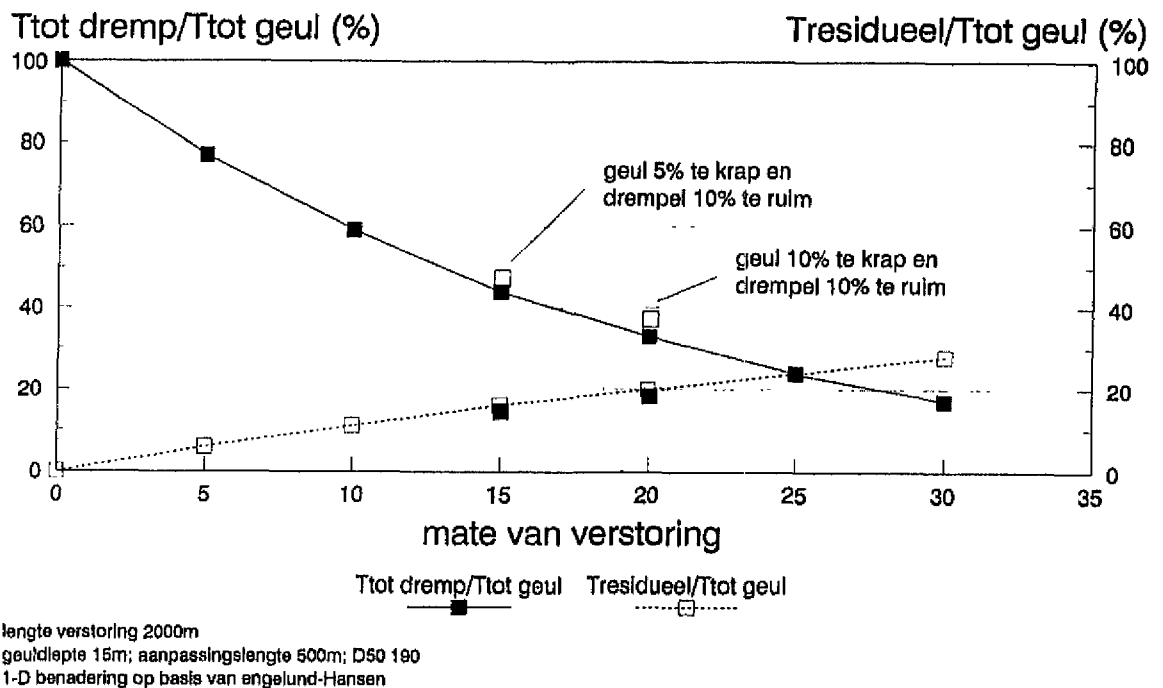


Figuur 5.7

Gevoeligheid van het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen ten aanzien van de grootte van de verstoring (10 en 20%), de afstand waarover de verstoring plaatsvindt (2 en 4 km) en de aanpassingslengte (0,5 en 1 km).

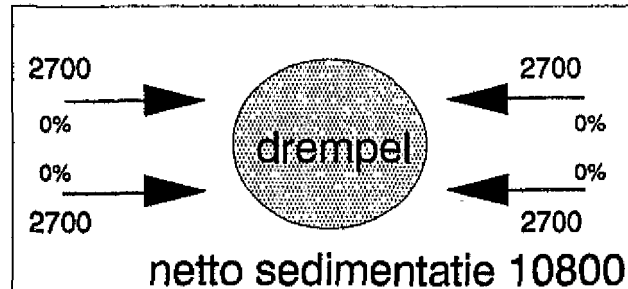


Figuur 5.8 Het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen versus het verschil in zandtransport tussen een geul en een verruimde geul (drempel) voor variërende grootten van de verstorling.

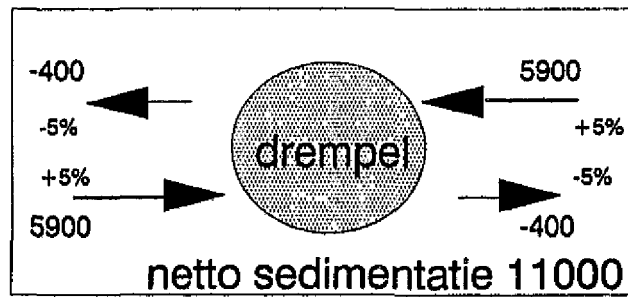


Figuur 5.9 Transport op drempel ten opzichte van Transport in geul en het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen versus de mate van verstorling (beiden procentueel uitgedrukt).

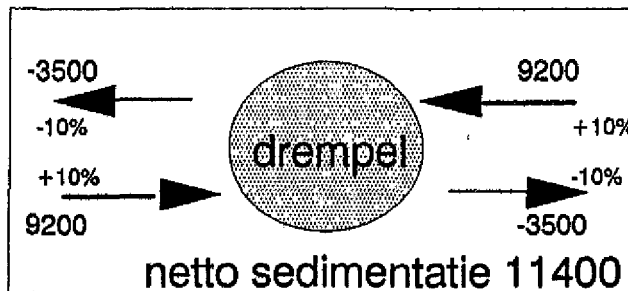
verruiming 20%; geen GRS (0%)



verruiming 20%; GRS 5%



verruiming 20%; GRS 10%



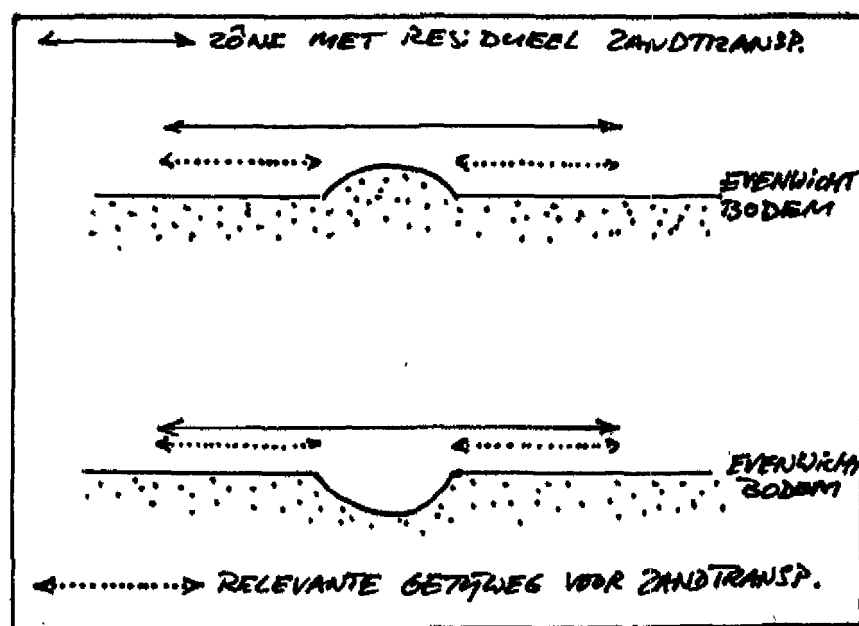
GRS getijgedreven residuele stroming

transporten in kg/m

Semi 2D weergave; berekend ahv Engelund-Hansen

geuldlepte 20%; aanpassingslengte 500m; D50 190micron

Figuur 5.10 Zandtransport naar een drempel door onder- en oververzadigingen en GRS.



Figuur 5.11 Het verband tussen de voor het zandtransport relevante getijweg en het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen.

6 Case studies Westerschelde

6.1 Retourstroming Stortplaats Konijnenschor naar de Drempel van Valkenisse en Bath

In de jaren 1988, 1989 en 1990 is gemiddeld $3,25 \text{ Mm}^3$ zand gebaggerd op de Drempels van Valkenisse en Bath. De drempels zijn hiermee belangrijke sedimentatiegebieden in het oostelijk deel van de Westerschelde. In diezelfde periode is $3,5 \text{ Mm}^3$ zand bij het Konijnenschor gestort, langs de buitenbocht van het Zuidergat vanaf Baalhoek tot aan de monding van de IJskelder. Uit de zandbalans (Uit den Bogaard, 1995) blijkt dat het kunstmatige zandtransport van oost naar west geheel wordt gecompenseerd door een retourstroom van west naar oost in de orde van ca. $3 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Als wordt aangenomen dat $3/4$ van dit zand afkomstig is van de stortlocatie bij het Konijnenschor, verreweg de belangrijkste zandbron in dit gebied, dan betekent dit een vloedgericht residueel zandtransport van gemiddeld 4000 ton per getij ofwel ca. 10 tot 30% van het totaal transport in de Overloop van Valkenisse (Tabel 2.1). Uit berekeningen en metingen van de waterbeweging, berekeningen van het zandtransport (Fig. 5.2 en 5.3) en waarnemingen van bodemvormen (Fig. 3.8) wordt het sterke vloedgedomineerde karakter van dit deel van het Zuidergat bevestigd.

De gemiddelde afstand vanaf deze stortplaats tot de Drempel van Valkenisse en Bath bedraagt respectievelijk 1 tot 4 km en 5 tot 8 km, gerekend langs de as van de vloedstroom. Dit zijn kleine afstanden ten opzichte van een geschatte getijweg voor zand in suspensie die enkele kilometers bedraagt! Gezien de kortere afstand zou verwacht kunnen worden dat het zand voornamelijk op de *Drempel van Valkenisse* zou moeten worden afgezet. Uit de zandbalans weten we echter dat een significante hoeveelheid van het zand de *Drempel van Bath* bereikt. Van welk transportpad maakt dat sediment gebruik?

Zowel uit de morfologie als uit modelresultaten weten dat de inloop van de Schaar van de Noord terk vloedgedomineerd is. Een deel van het zand dat via het vloedgedomineerde deel van het Zuidergat naar het oosten wordt getransporteerd wordt, voordat het verdiepte deel van de Drempel van Valkenisse wordt bereikt, afgebogen in de Schaar van de Noord. Het zand wordt vervolgens naar het noordwesten getransporteerd en over de vloodschaardrempel afgezet in de Bocht van Bath, de *Drempel van Bath* en de Pas van Rilland. Een groot deel aan het zand dat in de binnenbocht van de Bocht van Bath wordt afgezet, wordt daar al gebaggerd voordat het de drempel kan bereiken. Met dit baggerwerk blijft niet alleen de binnenbocht op zijn plaats, maar tevens wordt de noodzaak tot het baggeren in de vaargeul zo klein mogelijk gehouden.

6.2 Retourstroming Platen van Hulst naar de Drempel van Hansweert

De *Drempel van Hansweert* ligt op een lokatie waar de ebstroom uit het Zuidergat en de vloedstroom uit de Overloop van Hansweert en sterk uit elkaar lopen, ingeklemd tussen de Schaar van Ossenissee en de afsplitsing naar de Schaar van Waarde (Fig. 6.2). Ten westen van de drempel ligt de Plaat van Ossenissee, die de afgelopen jaren tot bijna NAP +2 m is opgehoogd. Grote delen van deze plaat spelen geen actieve rol meer ten aanzien van het zandtransport, uitgezonderd tijdens zware (wester)stormen.

De afgelopen jaren is jaarlijks ca. $2,5 \text{ Mm}^3$ zand gebaggerd op de drempel, met name op het noord-westelijke deel van de drempel langs de rand van de Plaat van Ossenissee. Net zoals bij de *Drempel van Bath* wordt ook hier het zand weggebaggerd voordat het de drempel in de vaargeul kan bereiken. De drempel is hiermee naast het Middelgat en de Schaar van Ossenissee een belangrijk sedimentatiegebied. Vanuit deze

gebieden wordt derhalve geen significante zandaanvoer naar de drempel verwacht. De inhouden van het Zuidergat, de Schaar van Waarde en het platengebied zijn de laatste jaren redelijk stabiel (Uit den Bogaard, 1995). Binnen deze gebieden zijn wel afwisselend zones aan te wijzen met sterke erosie of sedimentatie (Fig. 6.3). Dit zijn voornamelijk residuele zandtransporten over relatief korte afstanden, meestal als gevolg van geulmigraties. Een goed voorbeeld hiervan is de ontwikkeling van de Schaar van Walsoorden en het Zuidergat. De sedimentuitwisseling tussen de uitruimende Schaar van Walsoorden en het verondiepte Zuidergat is het gevolg van de verlegging van het zwaartepunt van de vloedstroming in oostelijke richting. Het zand dat door de vloed wordt geërodeerd in de Schaar van Walsoorden komt terecht in de te ruim geworden binnenbocht van het Zuidergat. Het overwegend ebgedomineerde transport zorgt ervoor dat het zand in noordelijke richting wordt getransporteerd. Uit verschilkaarten (Fig. 6.3) wordt geschat dat hierdoor van 1986 tot 1992 jaarlijks bijna 1 Mm³ zand is verplaatst.

Het stortgebied in de buitenbocht van de vaargeul langs de Platen van Hulst is de belangrijkste bron voor sediment in het middendeel van de Westerschelde. Jaarlijks wordt hier 2 tot 3 Mm³ zand gestort, en zoals blijkt uit de verschilkaarten, ook weer afgevoerd. Uit het residueel watertransport (Fig. 3.7) blijkt dat ter plaatse van deze stortlocatie een vloedgedomineerd watertransport optreedt. Naar het noorden toe wordt de linkeroever steeds sterker gedomineerd door de vloedstroom. Dit deel van de geul is hierdoor een cruciaal transportpad naar het noorden.

Een deel van het zand zal worden ingevangen in de Schaar van Ossensisse, een dynamisch complex van eb- en vloedgedomineerde scharen, waar van 1986 tot 1992 ca. 0,5 Mm³/jaar blijvend is afgezet. Het overgrote deel zal echter via de vloedgedomineerde binnenbocht van de hoofdgeul langs de noordzijde van de plaat naar de Drempel van Hansweert worden getransporteerd. Uit lodingen is bekend dat in de geul vanaf de noordelijke kop van de Plaat van Ossensisse naar het oosten toe extreem grote zandgolven voorkomen, met hoogtes van 2 tot 10 m en lengtes van 100 tot 150 m (De Looff, 1981). Deze zandgolven vertonen een uitgesproken asymmetrie in vloedrichting. Een andere aanwijzing voor een groot zandaanbod aan de noordzijde van de Plaat van Ossensisse zijn de veelvuldig optredende plaatvallen. Waarschijnlijk een gecombineerd effect van ophoging van de plaat (door zandaanvoer vanuit het westen) en een steile plaat-geulhelling ter plaatse van de dalen van de grote zandgolven.

6.3 Effect vergroting getijvolumina op aanzanding drempel

De baggerintensiteit op een drempel is gelijk aan de netto aanzanding ter plaatse. Deze wordt bepaald door de overdiepte van de drempel, de beschikbaarheid van sediment in de omgeving van de drempel en het vermogen van het systeem dit sediment naar de drempels te transporteren (Pieters, 1993). In de richting van een drempel zal de stroming (gemiddeld over het getij) vertragen door een verruiming van het doorstroomprofiel. Door onder- en oververzadigingen wordt hierdoor een residueel zandtransport aangedreven in de richting van de drempel, die positief gecorreleerd is met de gradiënt van de verstoring (m² verandering doorstroomprofiel per km geullengte), ofwel de mate waarin de drempel uit evenwicht is ten opzichte van de aangrenzende geuldelen.

Berekeningen met het waterbewegingsmodel (Fig. 6.4) laten zien dat de vloed in het oostelijk en de eb in het westelijk deel van de *Drempel van Valkenisse* domineren. Dit blijkt tevens uit de bimodale geulvorm op deze drempel, waarin een eb- en vloedbedding kunnen worden onderscheiden (Fig. 6.5).

Het doorstroomprofiel op deze drempel is zo groot dat aangenomen wordt dat dit zowel voor de eb- als de vloedstroming een vertragsingsgebied vormt. Dit is daarmee in potentie een sedimentatiegebied voor zowel eb als vloed. Maar omdat ten westen van deze drempel een belangrijke sedimentbron ligt, wordt verwacht dat het overgrote deel van het sediment door de vloedstroming is aangevoerd. Blik en Ruijter

(1994) concluderen aan de hand van een impulsbalans dat tijdens vloed sedimentatie optreedt op de Drempel van Valkenisse terwijl tijdens de eb erosie overheerst. Een uitgebreide studie (zie o.a. Tank, 1996) zal hopelijk meer inzicht bieden ten aanzien van het gedrag van deze complexe morfodynamische systemen.

In Oostwest studies is geopperd dat het baggerwerk kan verminderen door het vergroten van de getijvolumina door middel van een kombergingsvergroting. Voor een sterk geschematiseerde drempel is een kombergingsvergroting gesimuleerd en is het effect op het transport door onder- en oververzadigingen berekend. Er is gerekend met een perfect sinusoidaal getij, dus zonder een residueel zandtransport als gevolg van getij-asymmetrie of GRS. Het zandtransport is berekend analoog aan de berekeningen in Hoofdstuk 5.

In Fig. 6.6 is het effect weergegeven van een vergroting van het getijvolume met 10% op een drempel die 20% te ruim is ten opzichte van zijn evenwichtsligging. De geulbodem is initieel (A) in evenwicht met het getijvolume. Direct na vergroting van het getijvolumina (B) zullen de stroomsnelheden en dus ook de zandtransportcapaciteit in de geul sterker toenemen dan in de verdiepte drempel. Het residueel zandtransport richting drempel neemt in dit rekenvoorbeeld toe van 4900 (situatie A) tot 7350 kg/m (situatie B). Door zandonttrekkingen zullen de geulen geleidelijk verruimen tot een nieuwe evenwichtssituatie (C). De geul en sedimentuitwisselingen zijn in evenwicht met de grotere getijvolumina en het 10% te ruime drempelprofiel. Als het evenwichtsprincipe van het getijvolume en het doorstroomprofiel wordt gehanteerd, zal in de eindsituatie de stroomsnelheid in de geul op het oude niveau terugkomen (C1). De gradiënt in onder- en oververzadigingen is dan verminderd en daarmee ook het residuele zandtransport naar de drempels. De aanzandingssnelheid en daarmee het onderhoudsbaggerwerk is met 2700 kg/m. Alleen als de stroomsnelheden in de tussen de drempels gelegen geuldelen bijvend zijn verhoogd met 5% of meer, zal het residueel sedimenttransport even hoog blijven als voor toename van het getijvolume.

Dit geschematiseerde rekenvoorbeeld toont aan dat de intensiteit van het residuele sedimenttransport aanvankelijk zal toenemen na vergroting van het getijvolume over een drempel. Na verdieping van de tussen de drempels gelegen geuldelen zal dit residuele transport afnemen. Als de geuldelen het evenwichtsprofiel bereiken, bedraagt deze afname in het residueel transport als gevolg van onder- en oververzadigingen ca. 45% ten opzichte van de beginsituatie, vóór toename van het getijvolume.

Er resteren echter nog veel onzekerheden. Wat is bijvoorbeeld de invloed van een eventueel veranderende getij-asymmetrie en GRS? Vooralsnog lijkt het aannemelijk dat de stroomsnelheden in de geulen tot de oorspronkelijke waarden zullen afnemen, dit gezien de goede correlatie tussen getijvolumina en doorstroomprofielen (Gerritsen en de Jong, 1983; Blik, 1994). Echter nader onderzoek naar dit mogelijke aspect wordt sterk aanbevolen.

Rondom de *Drempel van Bath* is slechts beperkte ruimte voor migraties van de geulen. De buitenbochten van de geulen worden nu al sterk vastgehouden door oeverwerken en resistente klei- en veenlagen in de geulranden. In dit gebied is de kans klein dat de aanstroming van de drempel, de horizontale geulconfiguratie, significant zou wijzigen als gevolg van een toename in het getijvolume. Andere drempels in de Westerschelde kennen vaak grotere vrijheidsgraden, waardoor de kans op wijziging van de horizontale geulgeometrie groter is. Zo'n wijziging kan het gedrag van de drempel, en daarmee het aanzandingspatroon, aanzienlijk beïnvloeden.

6.4 Afname baggervolumina door vergroten afstand tussen bagger- en stortlocaties

In de huidige situatie liggen de bagger- en stortlocaties in het oostelijk deel van de Westerschelde op korte afstand van elkaar. De meest extreme situatie doet zich voor ter hoogte van het Konijnenschor/Marlemonse Plaat waar in de buitenbocht jaarlijks enkele miljoenen m^3 's worden gestort, terwijl aan de overkant van de geul, de binnenbocht zand wordt gebaggerd. Belangrijke drempels als de Drempel van Valkenisse en Bath bevinden zich op slechts enkele km's afstand van deze stortlocatie. De retourstroom van zand van stort- naar baggerlocatie is reeds lang onderkend (zie ook Pieters, et al., 1991). De baggeromvang is groot maar daar staat tegenover dat de gemiddelde vaarweg kort is en de prijs per m^3 verplaatste specie relatief laag is.

Als in een dynamisch systeem zoals een estuariene geul een verstoring wordt aangebracht, bijvoorbeeld als een sleuf wordt gegraven, dan zal deze geul worden opgevuld. Een ophoging zal geleidelijk worden verspreid en verdwijnen. Dit feedback mechanisme werkt vooral via een residueel zandtransport door onder- en oververzadigingen. Dit residuele zandtransport is positief gecorreleerd met de grootte van de gradiënt van de verstoring. De invloedssfeer van zo'n verstoring is in ieder geval beperkt tot het gebied binnen de maximale getijweg voor het zandtransport ter plaatse. Omdat het zandtransport in de Westerschelde voornamelijk suspensief is, wordt geschat dat deze ca. 3/4 bedraagt van de getijweg van water. Dit komt neer op een afstand van 7 tot 10 km. In de praktijk zal een verstoring, zeker als deze in stand gehouden wordt, zich geleidelijk uitbreiden over een groter gebied. Het gebied waar het residuele zandtransporten wordt beïnvloed door die verstoring breidt daarmee eveneens uit. Als een bagger- en stortlocatie binnen een geul op een aantal km's van elkaar liggen, dus binnen de relevante getijweg voor het zandtransport, dan zullen beide verstoringen elkaar versterken. de intensiteit van de retourstroming als gevolg van onder- en oververzadigingen versterken.

In Figuur 6.7 is een één-dimensionale situatie weergegeven, met een symmetrisch tijdsstroomsnelheidsverloop. Getij-asymmetrie en GRS hebben beide geen invloed op het residuele zandtransport. Als de bagger- en stortlocaties ver uit elkaar zijn gelegen, dus buiten de invloedssfeer van de relevante getijweg, dan zal aanvankelijk helemaal geen zanduitwisseling plaatsvinden. Als de "kuil" door baggeren wordt onderhouden, zal deze zich naar beide zijden uitbreiden, door het principe van onder- en oververzadigingen. De aanvoer van zand neemt af en dus ook de aanzandingsnelheid. Dit komt doordat de gradiënt in onder- en oververzadiging langs de overgangen van de kuil kleiner wordt. Dit principe werkt omgekeerd ook voor de "berg". In theorie zullen de "berg" en de "kuil" op termijn in elkaars invloedssfeer komen. De snelheid waarmee dit gebeurt zal afnemen om twee redenen: a) de gradient in onder- en oververzadigingen neemt af en b) om de "kuil" of "berg" uit te kunnen breiden is steeds meer sediment nodig. Toch zal in dit theoretische voorbeeld uiteindelijk de situatie ontstaan dat zand vanuit de "berg" naar de "kuil" wordt getransporteerd. Uiteindelijk stelt een evenwicht zich in als waarbij het kunstmatig transport gelijk is geworden aan het residuele zandtransport door onder- en oververzadigingen. Dit transport in "evenwichtssituatie" is omgekeerd evenredig aan de afstand tussen de bagger- en stortlocatie.

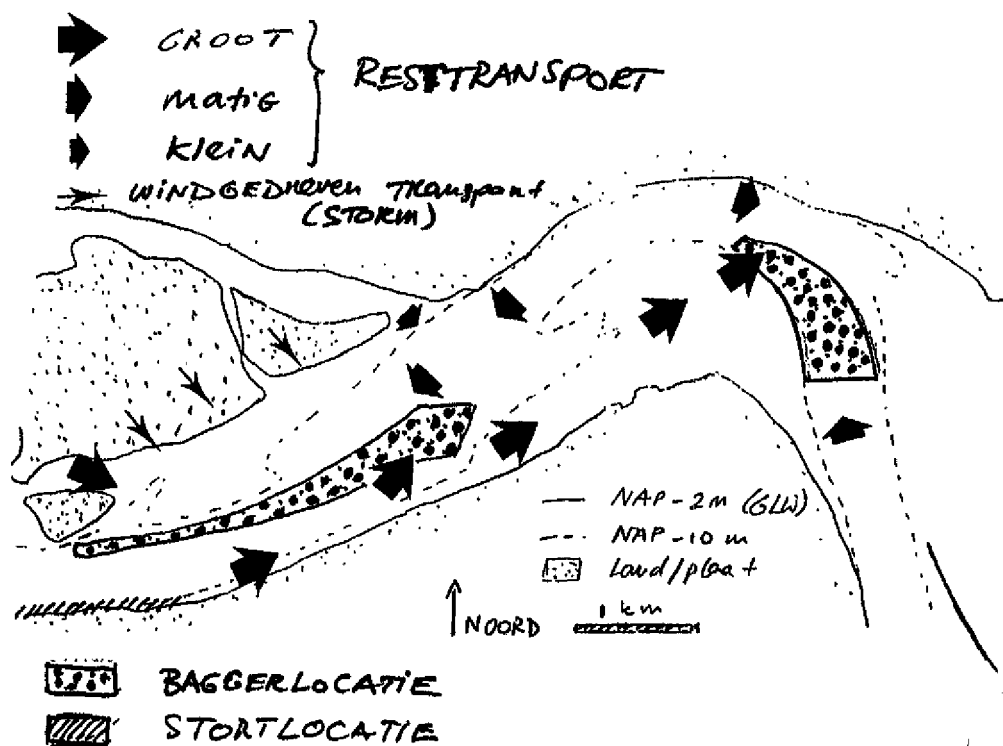
Het is uiteraard niet zo dat in de Westerschelde de "kuilen" en "bergen" zich blijven uitbreiden bij onveranderd onderhoudsbaggerwerk. In de Westerschelde is niet sprake van een één-dimensionale situatie zoals in het getoonde voorbeeld. Het zandtransport kan via verschillende transportpaden zowel bovenstrooms als benedenstrooms worden verplaatst. Getij-asymmetrie en GRS spelen hierbij zoals getoond in Hoofdstuk 5 een doorslaggevende rol in de Westerschelde. Behalve de kunstmatig onderhouden bronnen en sinks, zijn er in het estuarium een groot aantal natuurlijke sedimentatie- en erosiegebieden van uiteenlopend belang. Deze natuurlijke bronnen en sinks kunnen in aanzienlijke mate het retourtransport van stort- naar baggerlocatie versterken dan wel verzwakken.

Bij uitvoering van het verruimingsprogramma '48/'43 is besloten de stortlocaties in het oostelijk deel zoveel mogelijk te ontzien. Dit betekent dat er een zeer groot kunstmatig transport van meer dan 10 miljoen m³ per jaar zal worden onderhouden van oost naar west. Belangrijke stortlocaties worden dan het Gat van Ossensisse, de Everingen en de Ebschaar van de Spijkerplaat.

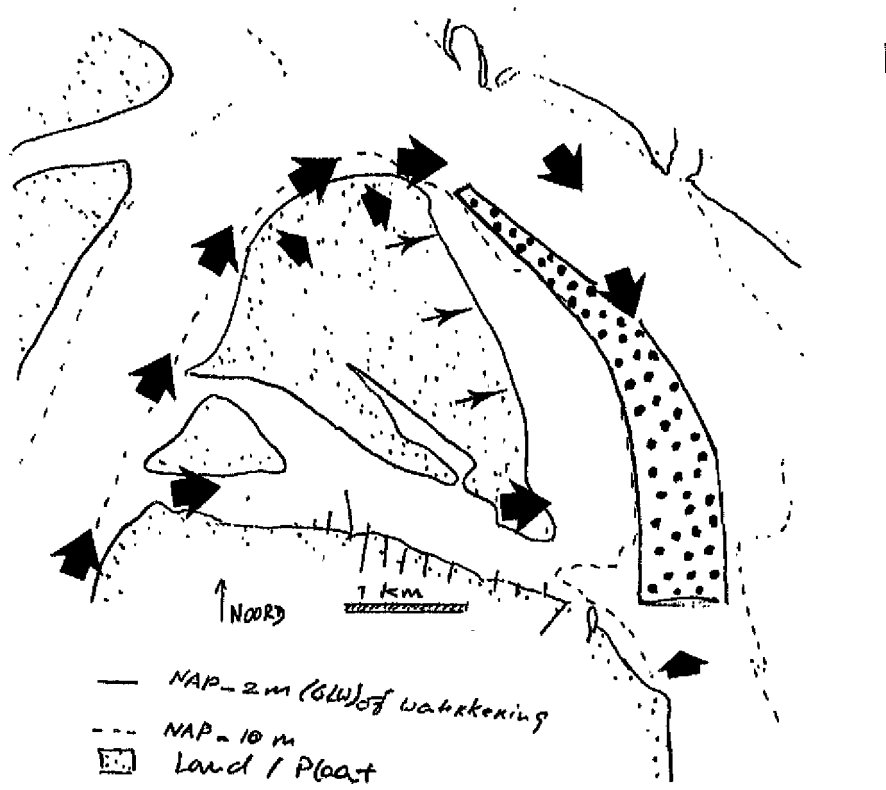
Door het *verder naar het westen storten* zal op termijn in het westelijk deel een relatief overschot en in oostelijk deel een relatief tekort aan zand ontstaan (Pieters, 1993). De aanzandingsnelheid op de gebaggerde drempels in het oostelijk deel zal afnemen door het verdwijnen van de kunstmatig onderhouden sedimentbronnen vlakbij de drempels en door de kleinere gradiënt in onder- en oververzadigingen.

Het westelijk deel zal vergelijkbare ontwikkelingen vertonen als de afgelopen twee decennia in het oostelijk deel zijn waargenomen. Dus relatief "krappe" geulen rondom de stortlocaties en een toename van de zandberging in het intergetijdegebied, ophoging en uitbreiding van de platen. De bergingscapaciteit van de geulen en platen in het westelijk deel is aanzienlijk groter dan in het oostelijk deel. Om dezelfde effecten te krijgen als in het oostelijk deel zal dus veel meer gestort moeten worden. Doordat netto zand uit het estuarium wordt onttrokken zal de uiteindelijke bagger-"kuil" in het oostelijk deel een aanzienlijk groter volume innemen dan de stort-"berg" in het westelijk deel.

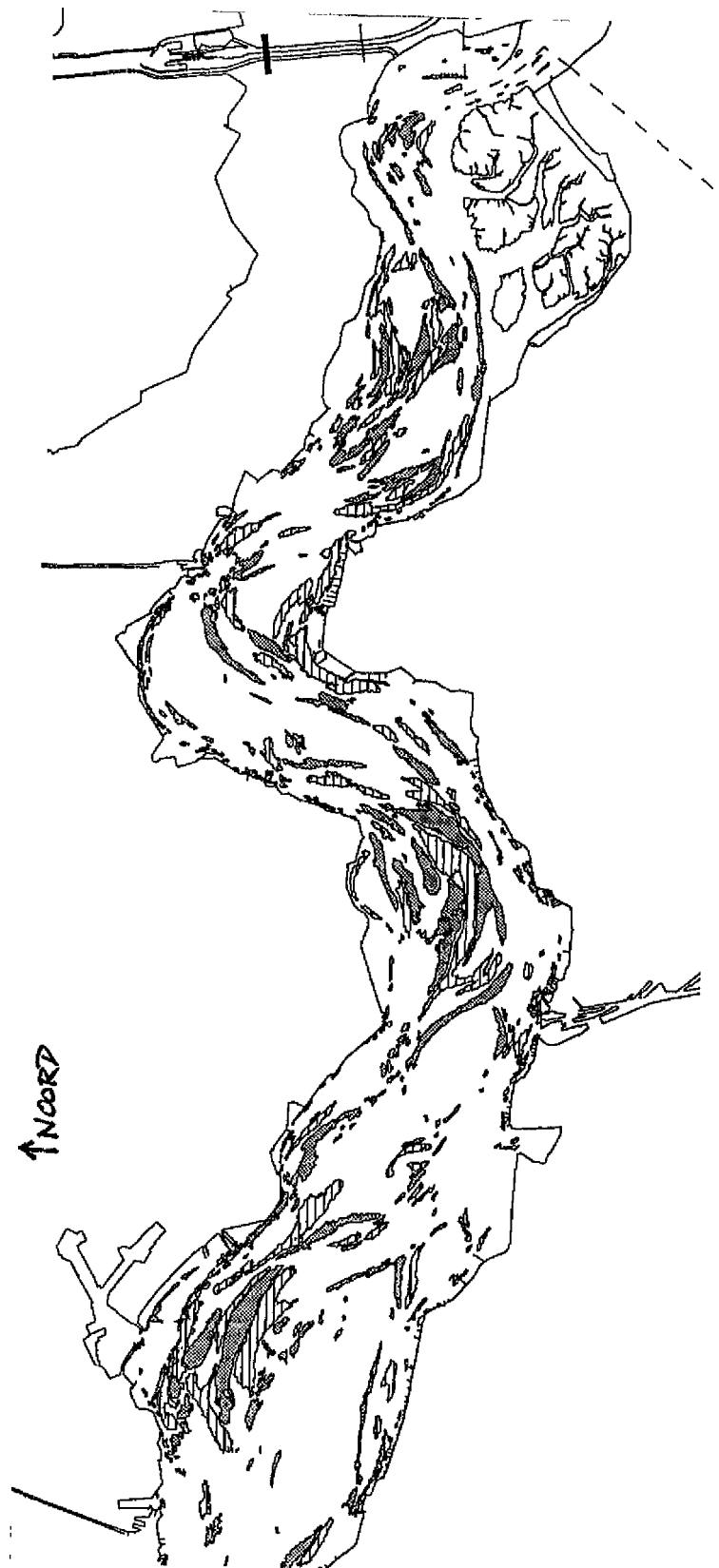
Het wordt interessant om te zien hoe de retourstroom van west naar oost zich zal ontwikkelen. De sedimentaanvoer naar de vloedschaar van de Everingen zal sterk toenemen. Vanuit dit gebied en de stortlocatie in het Gat van Ossensisse zal een vloedgedomineerd transport naar de Overloop van Hansweert worden aangedreven. De drempels aan de west- en oostzijde van de Plaat van Ossensisse zullen dan cruciale sedimentatiegebieden zijn. De mogelijkheden om sediment te transporteren zijn uiteraard niet onbeperkt. Het is zeer wel denkbaar dat de grootschalige retourstroom van west naar oost juist door omstandigheden in het middengebied wordt gereguleerd.



Figuur 6.1 Residuele zandtransportpaden in de omgeving van de Drempeis van Valkenisse en Bath en de Stortlocatie bij Konijnenschor gebaseerd op de zandbalans en expert judgement.

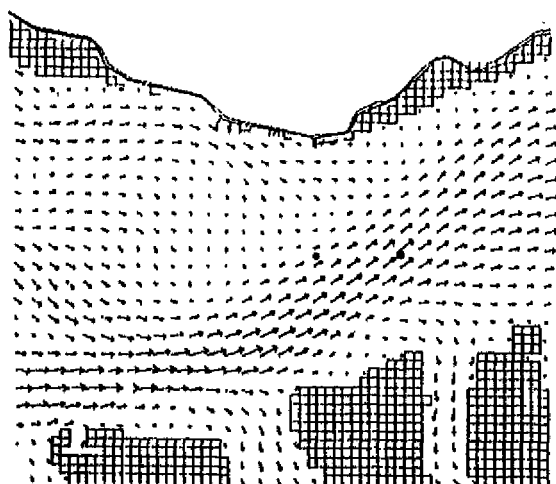


Figuur 6.2 Residuele zandtransportpaden in de omgeving van de Drempel van Hansweert en de stortlocatie Platen van Hulst gebaseerd op de zandbalans en best professional judgement.

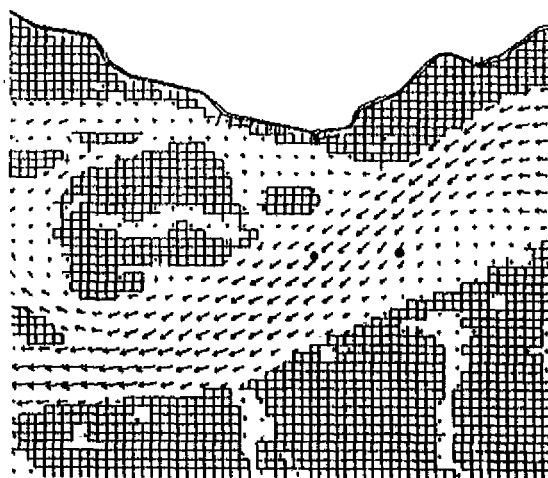


Figuur 6.3 Gebieden met een erosie (matrix) of sedimentatie (arcering) van meer dan 2 m over de periode van 1986 tot 1992.

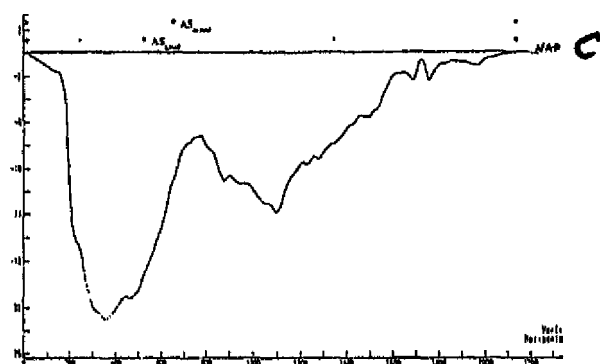
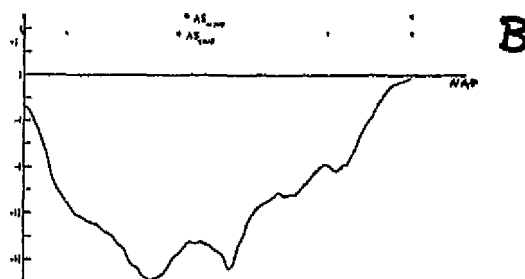
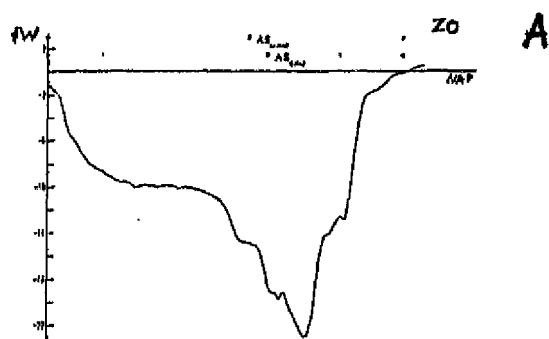
MAX. VLOED STROOM



MAX. EB STROOM

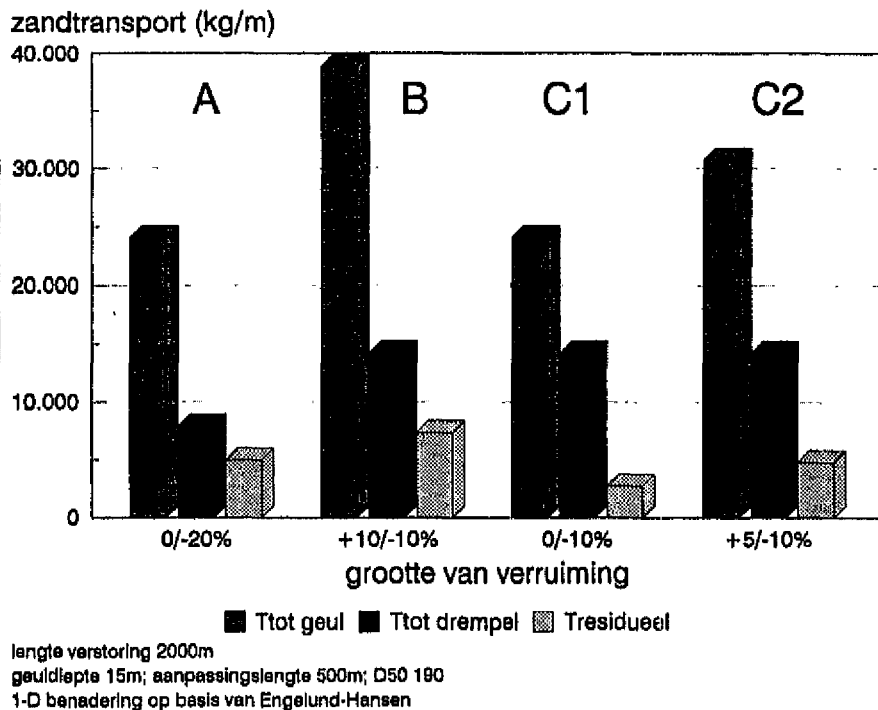
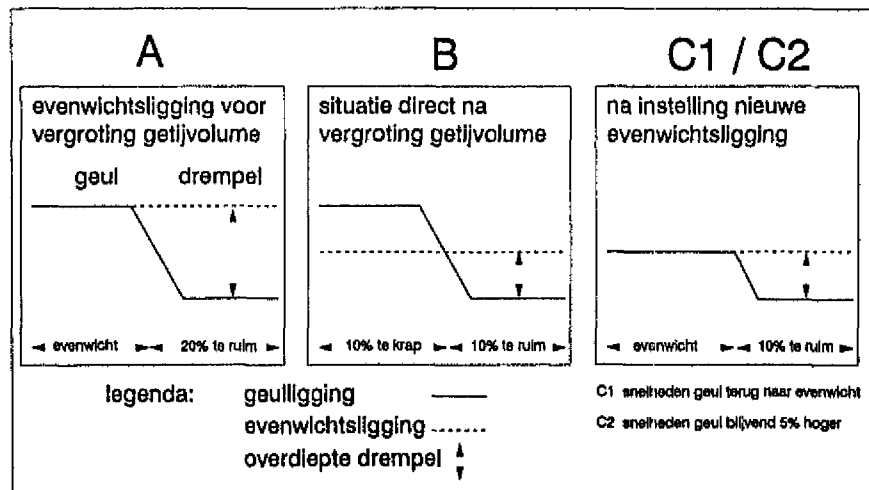


Figuur 6.4 Elkaar ontwijkende stroombeelden voor maximum vloed en eb in de omgeving van de Drempel van Valkenisse (DETWES).



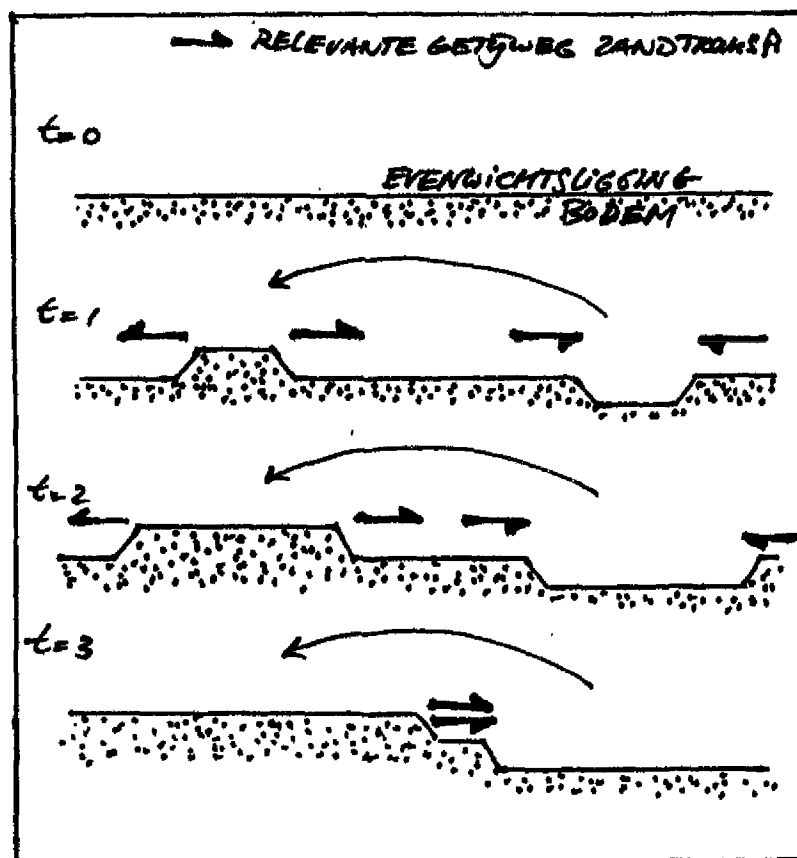
Figuur 6.5 Bimodale geulprofielen afwaarts en opwaarts van de Drempel van Valkenisse en een redelijk symmetrisch profiel op de Drempel.

Vergroting getijvolume met 10% over een 20% verruimde drempel
effecten op zandtransporten; initieel, direct na ingreep en op lange termijn



Figuur 6.6

Veranderingen van residuele sedimenttransporten door onder- en oververzadigingen als gevolg van een vergroting van het getijvolume met 10% over een 20% verruimde sterk geschematiseerde drempel; A voor toename getijvolume, B direct na toename getijvolumina, C1 nieuwe evenwichtssituatie en C2 nieuwe evenwichtssituatie met 5% hogere stroomsnelheden.



Figuur 6.7 Schematische weergave van de effecten van dichtbij en verder weg storten in een één-dimensionale benadering waarbij alleen rekening wordt gehouden met residuele transporten door onder- en oververzadigingen.

7 Conclusies

De zandtransportcapaciteit in de Westerschelde is hoog door een combinatie van sterke getijstromen en relatief fijn bodemsediment. Per eb- of vloedfase kan het zand in suspensie een afstand afleggen die wordt geschat op enkele km's. De geulen en geulranden zijn de zandtransportaders van het estuarium. In de eb- en vloedgedomineerde geulen en geuldelen worden grote en minder grote circulatie cellen of "zandneren" aangedreven.

De transportpaden beginnen meestal in een geul en eindigen op een (verdiepte) drempel, plaat of schor. De paden draaien vaak om de platen heen. De drempels lijken als knooppunten van hoofd- en nevengeulen een strategische positie in te nemen ten aanzien van het residuele zandtransport in het estuarium. Hoge platen en schorren hebben alleen een bergende functie voor het zand en zijn onbelangrijk voor het doorgaande zandtransport.

De patronen van residuele zandtransporten afgeleid via verschillende methodieken, de zandbalans, de McLaren analyse, numerieke waterbewegingsmodellen, en veldwaarnemingen (luchtfoto's en sonar-waarnemingen) zijn redelijk conform. Een indeling naar geulvorm in eb- en vloedscharen, zoals ook een halve eeuw geleden Van Veen al heeft gedaan, geeft een goede indicatie voor de dominante transportrichting. De resultaten van de niet eerder in Zeeland beproefde McLaren-analyse zijn bevredigend. Deze methodiek is een nuttige aanvulling om, in samenhang met andere methodieken, het inzicht in het residuele sedimenttransport te vergroten.

Het residueel zandtransport in een estuarium is de resultante van een aantal mechanismen, die zowel in grootte als richting binnen het estuarium variëren: 1) een asymmetrie in de waterbeweging door a) de getij-asymmetrie, b) Getijgedreven Residuele Strooming en c) een dichtheidsstrooming, 2) een asymmetrie in sedimentlast veroorzaakt door traagheidseffecten zoals a) "scour lag" en "settling lag" en b) door ruimtelijke variaties in transporterend vermogen van de strooming door profielveranderingen en 3) een transport door golfwerking.

De horizontale circulatie, aangeduid als de Getijgedreven Residuele Strooming (GRS), bepaalt in een dwars-profiel in sterke mate het verloop van de stroomsnelheden en daarmee de richting en grootte van het residuele zandtransport. GRS is sterk ontwikkeld in bochtovergangen (drempelgebieden). Het aandeel van de getij-asymmetrie in het lokale residuele zandtransport is meestal ondergeschikt aan de GRS component. Gezien de vorm van het verticale getij, namelijk een kortere duur van de vloedfase, zal in de Westerschelde globaal een vloedgericht zandtransport worden bevorderd. Verondersteld wordt dat in relatief ondiepe gebieden een sterkere vloedgerichte component aanwezig is dan in de diepe geulen. Wellicht is in sommige diepe geulen zelfs sprake van een ebgerichte component. Doordat de getij-asymmetrie altijd in vloedrichting werkt, is deze waarschijnlijk voor de lange termijn ontwikkeling van een estuarium belangrijker dan GRS.

Rondom de gebaggerde drempels ontstaan ruimtelijke consistente onder- en oververzadigingen van de alternerende getijstroom, welke gesuperponeerd zijn op "normale" gradiënten in het sedimenttransport gedurende een getij. Deze ruimtelijke onder- en oververzadigingen drijven een residueel zandtransport in de richting van de drempel aan. De intensiteit is positief gecorreleerd met de gradiënt van de verstoring.

Door het tegelijkertijd optreden van de verschillende mechanismen kan het residuele zandtransport lokaal worden versterkt of verzwakt. Getijgedreven Residuele Strooming en getij-asymmetrie spelen een belangrijke rol in de hele Westerschelde. Onder- en oververzadigingen kunnen in de directe omgeving van sterk verdiepte drempels en belangrijke stortlocaties de richting en de grootte van het residuele zandtransport sterk beïnvloeden. Andere mechanismen zoals dichtheidsstromingen, scour lag/settling lag, transport door

golfwerking en mengprocessen lijken in de Westerschelde van ondergeschikt belang te zijn.

Direct na de *vergroting van de getijvolumina* zal de aanzandingssnelheid op de oostelijke drempels toenemen. Dit is echter een tijdelijke zaak omdat als gevolg van zandontrekkingen de geulen zich zullen aanpassen aan de grotere getijvolumina. De niet verruimde drempels zijn minder uit evenwicht dan vóór de ingreep en de aanzandingssnelheid op de drempels zal verminderen.

Door het *verder naar het westen storten* zal op termijn in het westelijk deel een overschot en in oostelijk deel een tekort aan zand ontstaan. De aanzandingsnelheid op de gebaggerde drempels zal afnemen. Het westelijk deel zal gedeeltelijk dezelfde ontwikkelingen vertonen als het oostelijk deel, met relatief "krappe" geulen rondom stortlocaties en een toename van de zandberging in het intergetijdegebied. De bergingscapaciteit van de geulen en platen in het westelijk deel is aanzienlijk groter dan in het oostelijk deel. Om dezelfde effecten te krijgen als in het oostelijk deel zal wellicht meer gebaggerd en gestort kunnen worden. Doordat netto zand uit het estuarium wordt onttrokken zal de uiteindelijke bagger-"kuil" in het oostelijk deel een aanzienlijk groter volume innemen dan de stort-"berg" in het westelijk deel.

8 Aanbevelingen

Er wordt aanbevolen om voor een aantal gebieden een meer gedetailleerde zandbalans te berekenen, met speciale aandacht voor bagger- en stortgebieden en morfologische eenheden. De resultaten zullen het kwantitatieve inzicht in het retourtransport van stort- naar baggerlocaties vergroten. De zandbalans dient in principe te worden uitgebreid met gegevens van de Beneden Zeeschelde, liefst tot begin zestiger jaren, omdat vanaf die tijd het baggerwerk op de Beneden Zeeschelde is toegenomen.

Er wordt aanbevolen om aan de hand van 2Dh waterbewegingsmodellen een berekening uit te voeren voor het zandtransport volgens het zandtransportmodel van Engelund Hansen..

De asymmetrie van grote bodemvormen, zandgolven, lijkt een van de meest harde aanwijzingen te vormen voor de richting van het residuele zandtransport in een geul of een deel van de geul. Er wordt dan ook aanbevolen om een meer complete sonaropname te maken van enkele kritische gebieden, zoals de grote stortlocaties en in de geulen waar het retourtransport plaatsvindt van stort- naar baggerlocatie.

De invloed van de getij-asymmetrie op het residuele zandtransport kan zowel qua grootte als richting variëren binnen het estuarium. Dit aandeel kan beter worden gekwantificeerd door analyse van de amplitudes en fasen van de verschillende horizontale en verticale getijcomponenten van het M_2 , M_4 en M_6 . Dan kan eveneens worden vastgesteld of de invloed van de getij-asymmetrie toeneemt naarmate de getijgolf dieper in het estuarium doordringt.

De verschillende theorieën met betrekking tot de sedimentatie op de gebaggerde drempels van Blik en Ruijter (1994) en Storm (dit rapport) spreken elkaar gedeeltelijk tegen. Daarom wordt aanbevolen om ter toetsing een betrouwbare set meetresultaten op te bouwen voor één of twee relevante drempelgebieden en daarnaast modelberekeningen naar transportcapaciteiten uit te voeren.

Blik en Ruijter (1994) en Peters en Sterling (1976) stellen dat de spiraalstroom van groot belang is voor het vloedgericht zandtransport in de richting van de *Drempel van Bath en Hansweert*. Aanbevolen wordt om dit aan de hand van veldmetingen te onderzoeken.

Een belangrijke foutenbron in de transportmetingen is de ijking van de zandtransportmeter (AZTM) en de wijze waarop het zandtransport in de verticaal wordt berekend. Daarnaast moet worden afgewogen of de laterale variaties in een complex gebied als de Westerschelde voldoende kunnen worden bepaald met het aantal gemeten transportverticalen (meestal 4 tot 5 per dwarsraai).

9 Referenties

- Allen, G.P., Salmon, J.C., Bassoulet, P., Du Penhoat, Y., and De Grandpre, C., 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sed. Geology*, **26**, p 69-90.
- Allen, J.R.L., 1985. Principles of Physical sedimentology. George Allen & Unwin, London.
- Allersma, E., 1992. Studie inrichting oostelijk deel Westerschelde. Analyse van het fysische systeem. Waterloopkundig Laboratorium Z368.
- Allersma, E., 1994. Geulen in estuaria. 1-D Modellerling van evenwijdige geulen. Waterloopkundig Laboratorium H1828.
- Asselman, N.E.M., 1991. Morfologische ontwikkeling van het platengebied van Valkenisse in de periode 1972-1986. DGW Stageraport.
- Black, K.P., 1989. Sediment dynamics in the lower section of a mixed sand and shell-lagged tidal estuary, New Zealand. *J. of Coastal Research*, **5** (3), p 503-521.
- Blik, A.J., en Ruijter, M.N., 1994. Verklarend onderzoek drempels Westerschelde (Deel 1: tekst en tabellen; deel 2: figuren en apendices). Ingenieursbureau Svasek BV, projekt 940.
- Boon, D.J., and Byrne, R.J., 1981. On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Marine Geology*, **40**, p 27-48.
- Buxc, T.H.M., en Tobias, F.C., 1989. Een onderzoek naar de bodemmorfologie van het oostelijk deel van de Westerschelde 1985-1986. Afstudeerraport Universiteit Utrecht.
- Claessens, J., en Belmans, H., 1984. Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1971-1980. *Tijdschrift der Openbare werken van België*, No 3.
- De Jonge, V.N., 1992. Tidal flow and residual flow in the Ems estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **34**, p 1-24.
- De Loeff, D.D., 1978. Kaartering van de bodemsamenstelling van het oostelijk gedeelte van de Westerschelde. Methode en resultaten. RWS Studiedienst Vlissingen Nota WWKZ-78.V013.
- De Loeff, D.D., 1980. Kaartering van de bodemsamenstelling van het westelijk gedeelte van de Westerschelde. Methode en resultaten. RWS Studiedienst Vlissingen Nota WWKZ-80.V009.
- De Loeff, D.D., 1981. Vorm, ligging en verplaatsing van de ribbels op de geulbodem tussen Hansweert en Kruiningen, RWS Studiedienst Vlissingen Nota WWKZ-81.V012.
- De Vries Klein, G., 1970. Depositional and dispersal dynamics of intertidal sand bars. *J. of Sed. Petrology*, **40** (4), p. 1095-1127.
- Dyer, K.R., 1988. Fine sediment particle transport in estuaries. In: Dronkers, J. and Van Leussen, W., (eds). *Physical processes in estuaries*. Springer-Verlag, Heidelberg, p 295-310.
- Dronkers, J., 1984. Import of fine marine sediments in tidal basins. *Neth. Institute for Sea Research. Publication Series* **10**, p 83-105.
- Dronkers, J., 1986. Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands J. of Sea Research* **20**, p 117-131.
- Falconer, R.A., and Owens, P.H., 1990. Numerical modelling of suspended sediment fluxes in estuarine waters. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **31**, p 745-762.
- Fettweis, M., Sas, M., and Meyvis, L., 1994. Analyse van stroom- en sedimentmetingen ter hoogte van de drempel van Zandvliet (Schelde). *Water* **76**, mei/juni.
- Fischer, H.B., Imberger, J., List, E.J., Koh, R.C.Y., and Brooks, N.H., 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, Inc.
- Friedrichs, C.T., and Aubrey, D.G., 1988. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis^a. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **27**, p 521-545.
- Friedrichs, C.T., Lynch, D.R., and Aubrey, D.G., 1992. Velocity asymmetries in frictionally dominated tidal embayments: longitudinal and lateral variability. In: Prandle, D. (ed.). *Dynamics and*

- exchanges in estuaries and the coastal zone. *Coastal and estuarine studies* **40**. American Geophysical Union, Washington DC., p 277-312.
- Fry, V.A., and Aubrey, D.G., 1990. Tidal velocity asymmetries and bedload transport in shallow embayments. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **30**, p 453-473.
- Gao, S., Collins, M.B., Lanckneus, J., De Moor, G., Van Lancker, V., 1994. Grain size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgium continental shelf. *Marine Geology* **121**, p 171-185.
- GEOMOR, 1984. Geomorfologische processen oosterschelde. Een pilot-studie. RWS DDMI Geomor Nota 84.01.
- Gerritsen, F., en De Jong, H., 1983. Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde. RWS Nota WWKZ-83.V008.
- Goedheer, G.J., and Misdorp, R., 1985. Spatial variability and variations in bedload transport direction in a subtidal channel as indicated by sonographs. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**, p 375-386.
- Granat, M.A., and Ludwick, J.C., 1980. Perpetual shoals at the entrance to Cheseapeake Bay: flow-substrate interactions and mutually evasive net currents. *Marine Geology* **36**, p 307-323.
- Heathershaw, A.D., 1981. Comparison of measured and predicted transport rates in tidal currents. *Mar. Geology* **42**, p 75-104.
- Huijs, S.W.E., 1996. De ontwikkelingen van de morfologie in de Westerschelde in relatie tot menselijke ingrepen; 1955-1994. Rapport IMAU R96-17.
- Jeuken, M.C.J.L., 1992. Een analyse van stroom- en sedimenttransportmetingen in het oostelijk deel van de Westerschelde. RWS Nota NWL-92.17.
- Kjerfve, B., 1978. Bathymetry as an indicator of net circulation in well mixed estuaries. *Limnol. Oceanogr* **23** (4), p 816-821.
- Kjerfve, B., Stevenson, L.H., Proehl, J.A., Chrzanowski, T.H., and Kitchens, W.M., 1981. Estimation of material fluxes in an estuarine cross section: A critical analysis of spatial measurement density errors. *Limnol. Oceanogr* **26** (2), p 325-335.
- Korstanje, L.P., 1984. Methode ter bepaling van het zandtransport in de Westerschelde. Afstudeerrapport TH Delft.
- Kruyt, N.M., 1992. Berekende en gemeten zandtransporten over dwarsraaien in de Westerschelde. DGW Stagerapport.
- McLaren, P., and Bowles, D., 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *J. Sed Petrology*, **55**, p 457-470.
- McLaren, P., and Powys, R.I.L., 1993. Patterns of sediment transport in the western portion of the Westerschelde. GeoSea Consulting, Cambridge.
- McLaren, P., and Powys, R.I.L., 1994. Patterns of sediment transport in the Westerschelde between Baarland and Rupelmonde. GeoSea Consulting, Cambridge.
- McLaren, P., Collins, M.B., Gao, S., and Powys, R.I.L., 1993. Sediment dynamics of the Severn estuary and inner Bristol Channel. *J Geological Soc., London*, **150**, p 589-603.
- Meetdienst Zeeland, 1991. Meetresultaten stroom- en sedimentmetingen Project Oostwest Westerschelde Debietraai 3. RWS Notitie ZLMD-90.N.116.
- Miller, M.C., McCave, I.N., and Komar, P.D., 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology* **24**, p 507-527.
- National River Authority (NRA), 1992. The future of shoreline management. Conference Papers. October 14th 1991.
- Nichols, M.M., and Biggs, R.B., 1985. Estuaries. In: Davies, R.A.jr. (ed.). *Coastal sedimentary environments*. Second Revised and expanded edition. Springer-Verlag.
- Officer, C.B., 1981. Physical dynamics of estuarine suspended sediments. *Mar. Geology* **40**, p. 1-14.
- Peters, J.J., en Sterling, A., 1976. Hydrodynamiques et transports de sediments de l'estuaire de l'Es

- caut. In: L'estuaire de l'Escaut: Nihoul, C.L., et Wollast, R. (eds.). Rapport Final Project Mer, Volume 10. Bruxelles, Belgique.
- Pieters, T., Storm, C., Walhout, T., en Ysebaert, T., 1991. Het Schelde-estuarium méér dan een vaarweg. RWS DGW Nota GWWS-91.081.
- Pieters, T., 1993. Het Schelde-estuarium, beheren of beheersen? RWS Rapport DGW-93.032.
- Postma, H., 1967. Sediment transport and sedimentation in the marine environment. In: Lauff, G.H., (ed.): Estuaries. Amer. Assoc. Adv. Sci., Publ. 83, Washington, DC, p 158-179.
- Prandle, D., 1991. Tides in estuaries and embayments (review). In: Parker, B.P. (ed.). Tidal Hydrodynamics. John Wiley & Sons, Inc.
- Rouse, H., 1937. Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. Trans. ASCE, 102, p 463-543.
- Ridderinkhof, H., 1988. Tidal and residual flows in the western Dutch Wadden Sea: numerical model results. *Neth. J. Sea Research* 22 (1), p 1-21.
- Ruessink, G., 1991. De bodemmorfologie in de geulen van het oostelijk deel van de Westerschelde. DGW Stagerapport.
- Ruitenbeek, M., 1995. Bodemhoogte ontwikkeling van het intergetijdgebied in de Westerschelde. Stagerapport RIKZ.
- Speer, P.E., and Aubrey, D.G., 1985. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part II: theory. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 21, p 207-224.
- Storm, C., 1995. Morfologische gevolgen van een kombergingsvergroting in het Schelde estuarium: huidige Oostwest inzichten. RWS RIKZ Werkdocument OS-95.801X.
- Storm, C. en de Ruig, J.H.M., 1990. Problematiek van het baggeren en storten in het oostelijk deel van de Westerschelde (Deelrapport OostWest Pilot). RWS Directie Zeeland Notitie.
- Tank, F.T.G., 1996. Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Rapport IMAU R96-07.
- Uit den Bogaard, L.A., 1995. Resultaten zandbalans Westerschelde; 1955-1993. Rapport IMAU R95-08.
- Van den Berg, J.H., 1986. Aspects of sediment- and morphodynamics of subtidal deposits of te Oosterschelde (the Netherlands). Thesis Utrecht University. p 122.
- Van den Berg, J.H., 1987. Konfrontatie sedimenttransportformules met metingen van het suspensief zandtransport in de Westerschelde en de Eendracht. RWS Directie Zeeland Nota ZL-87.0002.
- Van den Berg, J.H., 1994. Toetsing resultaten methode McLaren Westerschelde. Memo.
- Van den Berg, J.H., Schouten, D., en Van Westenbrugge, C.J., 1991. Zandbalans Westerschelde 1965, 1970, 1975, 1980 en 1985. RWS Dir. Zeeland Nota NWL-91.36.
- Van Heuvel, Tj., 1991. Sedimenttransport in het Eems-Dollard estuarium, volgens de methode McLaren. RWS DGW Nota GWWS-91.002.
- Van de Kreeke, J., and Robaczewska, K., 1993. Tide-induced residual transport of coarse sediment; application to the Ems estuary. *Neth. J. of Sea Res.*, 31 (3), p 209-220.
- Van der Male, K., 1993. 2dh- Waterbewegingsmodel DETWES. RWS DGW Werkdocument GWWS-93.868X.
- Van der Male, K., 1996. De morfologische veranderingen op de Zeeschelde van 1961 tot 1992. Werkdocument RIKZ /ABD 96.837X.
- Van Rijn, L.C., 1989. Handbook Sediment transport by currents and waves. Delft Hydraulics Report H461.
- Van Straaten, L.M.J.U., and Kuenen, P.H., 1957. Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden Sea. *Geol. en Mijnbouw*, 19, p 329-354.
- Van Veen, J., 1950. Eb -en vloed-schaar systemen in de Nederlandse getijwateren. *Tidschrift KNAG*, 2^e reeks, deel 67, p. 303-325.
- Van der Weck, A.W., 1994. Bodemligging Oosterschelde. Veranderingen in de morfologie van slikken en platen sinds de aanleg van de Stormvloedkering. Rapport IMAU R94-1.

- Werkgroep Waterbeheer Westerschelde (WWW), 1989. Beleidsplan Westerschelde. Morfologische structuur en Dynamiek (Deelraport 4). Rijkswaterstaat DGW en Directie Zeeland.
- Wright, L.D., Coleman, J.M., and Thorn, B.G., 1975. Sediment transport and deposition in a macro tidal river channel: Ord River, Western Australia. In: Cronin, L.E.(ed.). Estuarine research. Volume II. Academic Press, New York, p. 309-322.