Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Rijkswaterstaat

Westerschelde: import of export?

Invloed van bodemligging op sedimenttransport in de Westerschelde

Juni 2005

Werkdocument RIKZ/KW/2005.114W
Hoofdrapport

Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Rijkswaterstaat

Westerschelde: import of export?

Invloed van bodemligging op sedimenttransport in de Westerschelde

Juni 2005

Ester Groenendaal

Werkdocument RIKZ/KW/2005.114W

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave **3**

Lijst met figuren en tabellen **6**

Samenvatting **9**

1 Inleiding **12**
1.1 Achtergrond 12
1.2 Kader 13
1.3 Probleem definitie 13
1.3.1 Probleem analyse 13
Beheersvraag 13
Kennisvraag 13
1.3.2 Doelstellingen 14
1.3.3 Methode van aanpak 14
1.4 Leeswijzer 15

2 Theorie **17**
2.1 Estuaria: algemeen 17
2.2 Morfologie van estuaria 18
2.3 Morfodynamica 19
2.3.1 Morfodynamisch evenwicht 19
2.3.2 Schaalniveaus 20
2.4 Fysica in estuaria 21
2.4.1 Processen en factoren die invloed hebben op sedimenttransport 21
2.4.2 2-dimensionale waterbeweging 23
2.4.3 Getij: uitgebreidere beschrijving 24
Algemeen 24
Getij in estuaria 25
Getij-asymmetrie 26
Getij componenten 28
2.4.4 Sedimenttransport 28
Algemeen 28
Residueel sedimenttransport als gevolg van getij-asymmetrie 29
2.5 Ecologie 31

3 Studiegebied: de Westerschelde **32**
3.1 Topografie Schelde-estuarium en Westerschelde 32
3.2 Ontstaan Westerschelde 32
3.3 Functies Schelde-estuarium 33
3.4 Morfologie Westerschelde 34
3.4.1 Huidige situatie 34
3.4.2 Menselijke ingrepen in de laatste 50 jaar 34
3.4.3 Ontwikkeling morfologische cellen 36
3.4.4 Sediment 37
3.4.5 Sedimenttransport 37
Metingen 37
Residueel sedimenttransport 38
Relatie getij-asymmetrie en morfologie 39
3.5 Hydrodynamica 40

3.5.1 Getij 40
3.5.2 Rivierafvoer 41
3.5.3 Zoutgradient 41

4 Zandbalans 42
4.1 Inleiding 42
4.2 Opstelling en berekening zandbalans 42
4.3 Zandbalans Westerschelde 1955-2002 44
4.4 Zandbalans en -uitwisseling macrocellen 1955-2002 46
4.5 Nauwkeurigheid zandbalans 50
4.5.1 Lodingen 51
4.5.2 Ingreepgegevens 51
4.5.3 Aannames 52
4.5.4 Conclusie en discussie 53

5 Opzet (model)onderzoek 56
5.1 Algemene opzet 56
5.2 WAQUA model 57
5.2.1 Algemeen 57
5.2.2 Schematisatie 58
5.2.3 Invoer 58
Bodemligging 58
Wrijving 58
5.2.4 Randvoorwaarden 59
5.2.5 Sedimenttransport 60
5.3 Opzet analyses 61

6 Analyse van de zandbalans 64
6.1 Methode van analyse 64
6.2 Zandbalans macrocellen 64
6.3 Sedimentuitwisseling tussen cellen 66
6.4 Conclusie data analyse 68

7 Analyse modelresultaten 71
7.1 Inleiding 71
7.2 Waterbeweging 1972 en 2002 71
7.2.1 Verticaal getij 71
7.2.2 Stromingspatronen 72
7.2.3 Debiet 73
7.3 Analyse horizontaal getij 1972 en 2002 74
7.3.1 Inleiding 74
7.3.2 Methode van analyse 75
7.3.3 Resultaat 76
7.3.4 Conclusie 80
7.4 Eb- en vloedtransport 1972 en 2002 (S_{eb} en S_{vloed}) 81
7.5 Conclusie 84

8 Analyse netto sedimenttransporten (S_{netto}) 86
8.1 Uitkomst modelsimulaties 86
8.2 Effect bodemligging op netto sedimenttransport 89
8.2.1 Methode 89
8.2.2 Resultaat 90
8.2.3 Lokaal effect versus regionaal effect 93
8.2.4 Vergelijking met meetgegevens 95
8.2.5 Netto sedimenttransporten bij keel Westerschelde 97
8.3 Voorlopige conclusie en discussie 99
8.3.1 Voorlopige conclusie 99

8.3.2 Discussie 100
8.4 Analyse modelsimulatie 1968 100
8.5 Conclusie 105

9 Conclusies en aanbevelingen 108
9.1 Conclusies 108
9.2 Discussie 110
9.3 Aanbevelingen 111

10 Referenties 113

Lijst met figuren en tabellen

Lijst met Figuren

Figuur 2.1 Distributie van energie en fysische processen in estuaria 17
Figuur 2.2 Eb- en vloedgeulen vormen circulaire stromen in estuaria 18
Figuur 2.3 Voortplanting getij in de Noordzee met amfidromische punten 24
Figuur 2.4 Logaritmische verdeling van de stroomsnelheid (V) in de verticaal door uniforme stroming (links) en een voorbeeld van een sedimentconcentratieverdeling (c) in de vertikaal (rechts) 28
Figuur 2.5 Getijgemiddeld residueel sedimenttransport a.g.v de M_0M_2-interactie (links) en de M_2M_4-interactie (rechts) 31
Figuur 3.1 Het Schelde-estuarium en de Westerschelde 32
Figuur 3.2 Macrocellen en mesocellen in de Westerschelde 34
Figuur 3.3 Bagger-, stort- en zandwinlocaties tussen 1955-2000 in de Westerschelde 35
Figuur 3.4 Bodemligging Westerschelde in 1965 en 2002 36
Figuur 3.5 Meetlocaties in macrocel 5 (zie Figuur 3.2) waar metingen zijn uitgevoerd bij de bodem van het sedimenttransport in combinatie met de stroomsnelheid 37
Figuur 3.6 Gemeten sedimenttransporten in combinatie met stroomsnelheden op de meetlocaties Kaloo, Veremans en Scaldis 38
Figuur 4.1 Vakindeling van balansvakken samenhangend met macrocellen ... 43
Figuur 4.2 Cumulatieve zandbalans (in Mm^3) sinds 1955 van de Westerschelde 45
Figuur 4.3 Cumulatieve zandvolumes (in Mm^3) sinds 1955 in de macrocellen 47
Figuur 4.4 Cumulatieve, natuurlijke sedimentuitwisseling sinds 1955 tussen de macrocellen 49
Figuur 4.5 Invloed variatie uitleveringspercentage (0-20%) op verloop van V_{nat} 52
Figuur 4.6 Invloed variatie aannames op verloop van V_{nat} 53
Figuur 5.1 Gekozen bodems in model op basis van verloop V_{nat} 57
Figuur 5.2 Modelschematisatie voor de Westerschelde 58
Figuur 5.3 Verschilkaart bodemligging 1972 en 2002 58
Figuur 5.4 Ruwheidsveld op basis van de parameter van Manning in $s/m^{1/3}$ .. 59
Figuur 5.5 Bepaling celranden in model met behulp van celranden in zandbalans 62
Figuur 5.6 Definitie grensgebieden tussen de individuele macrocellen 63
Figuur 6.1 Het bepalen van het natuurlijke sedimentvolume ontwikkeling in 1972 en 2002 65
Figuur 6.2 Het bepalen van de sedimentuitwisseling tussen macrocellen in 1972 en 2002 67
Figuur 6.3 Geschematiseerde 1-dimensionale zandbalans voor 1972, 2002 en verschil tussen 1972 en 2002 op basis van meetdata 69
Figuur 7.1 Waterstandsverloop gedurende 25 uur in model voor een aantal stations 71
Figuur 7.2 Residuele stroming over twee getijperioden 73
Figuur 7.3 Debiet door raaien ter hoogte van Vlissingen (links) en ter hoogte van Hansweert en de grens tussen Nederland en België (rechts) . 74
Figuur 7.4 Getijprisma in 1972 en 2002 en toename van getijprisma in 2002 ten opzichte van 1972 74

Figuur 7.5 Locaties waar de snelheidsvectoren zijn geanalyseerd 75
Figuur 7.6 Lokale stroomsnelheid in de eb- en vloedgeul op raai Vlissingen-Breskens berekend met model 77
Figuur 7.7 Lokale bijdragen aan het sedimenttransport (S/α) op de lange termijn op raai Vlissingen-Breskens 77
Figuur 7.8 Lokale stroomsnelheid in de eb- en vloedgeul op raai ter hoogte van Perkpolder (cel 5) berekend met model 78
Figuur 7.9 Lokale bijdragen aan het sedimenttransport (S/α) op de lange termijn op raai ter hoogte van Perkpolder (cel 5) 78
Figuur 7.10 Lokale stroomsnelheid in de eb- en vloedgeul op raai in cel 6 79
Figuur 7.11 Lokale bijdragen aan het sedimenttransport (S/α) op de lange termijn door de verschillende interacties op raai in cel 6 79
Figuur 7.12 Eb- en vloedtransport in 1972 met u^4 82
Figuur 7.13 Eb- en vloedtransport in 2002 met u^4 82
Figuur 7.14 Eb- en vloedtransport in 2002 gedeeld door het eb- en vloedtransport in 1972 met u^3 83
Figuur 7.15 Eb- en vloedtransport in 2002 gedeeld door het eb- en vloedtransport in 1972 met u^4 83
Figuur 7.16 Eb- en vloedtransport in 2002 gedeeld door het eb- en vloedtransport in 1972 met u^5 84
Figuur 8.1 Netto sedimenttransport in 1972 en 2002, berekend met model voor u^3 86
Figuur 8.2 Netto sedimenttransport in 1972 en 2002, berekend met model voor u^4 87
Figuur 8.3 Netto sedimenttransport in 1972 en 2002, berekend met model voor u^5 87
Figuur 8.4 Transportverschil 2002-1972 voor u^3 berekend met model 88
Figuur 8.5 Transportverschil 2002-1972 voor u^4 berekend met model 88
Figuur 8.6 Transportverschil 2002-1972 voor u^5 berekend met model 89
Figuur 8.7 Voorbeeld bepaling van sedimentuitwisseling tussen cellen en volumeontwikkeling van een macrocel en het verschil tussen 1972 en 2002 uit modelresultaten 89
Figuur 8.8 Effect bodemligging op netto sedimenttransport, berekend door het gemiddelde te nemen van de transportverschillen tussen 2002 en 1972 binnen de grensgebieden 91
Figuur 8.9 Effect veranderde bodemligging op netto sedimenttransport op basis van Figuur 8.8 92
Figuur 8.10 Effect bodemligging op netto sedimenttransport, berekend met het lopende gemiddelde 94
Figuur 8.11 Netto sedimenttransport bij keel Westerschelde volgens model in 1972 en 2002 (boven) en het verschil 2002-1972 (onder) 98
Figuur 8.12 Effect bodemverandering op netto sedimenttransport in cel 1 met u^3, u^4, u^5 en u^3 met een drempelsnelheid van 0,6 m/s 99
Figuur 8.13 Extra gekozen bodem in model op basis van natuurlijke volumeverloop (V_{nat}) 100
Figuur 8.14 Transportverschil 2002-1972 en 2002-1968 voor u^4 101
Figuur 8.15 Effect bodemligging voor 2002-1972 en 2002-1968, berekend door binnen de grensgebieden het gemiddelde te nemen 102
Figuur 8.16 Meetdata van cel 4 en randen van cel 4 met mogelijke trendlijnen rond 1968, 1972 en 2002 102
Figuur 8.17 Verschil 2002-1968 in cel 4 en randen van cel 4 volgens model en meting 103
Figuur 8.18 Meetdata van cel 5 en zeewaartse rand van cel 5 met mogelijke trendlijnen rond 1968, 1972 en 2002 103

Figuur 8.19 Meetdata van cel 3 en landwaartse rand van cel 3 met mogelijke trendlijnen rond 1968, 1972 en 2002 104
Figuur 8.20 Verschil 2002-1968 en 2002-1972 in cel 3 en grens 1-3 volgens model en meting 104
Figuur 8.21 Transportverschil tussen 1968 en 1972 voor u^4 105

Lijst met Tabellen

Tabel 3.1 Sedimenttransporten [in $g/m^2/s$] gemeten bij bepaalde bodemstroomsnelheden op meetlocaties Kaloo, Veremans en Scaldis 38
Tabel 4.1 Samenvatting invloed fouten op natuurlijk zandvolume (V_{nat}) 54
Tabel 6.1 Classificatie beoordeelde trends omstreeks 1972 en 2002 64
Tabel 6.2 Volumeontwikkeling in 1972 en 2002 op basis van meetdata 65
Tabel 6.3 Richting sedimenttransport tussen cellen in 1972 en 2002 volgens meetdata 68
Tabel 7.1 Amplitudes en faseverschillen van de verschillende componenten behorende bij de tijdreeksen van Figuur 7.6 77
Tabel 7.2 Amplitudes en faseverschillen van de verschillende componenten behorende bij de tijdreeksen van Figuur 7.8 79
Tabel 7.3 Amplitudes en faseverschillen van de verschillende componenten behorende bij de tijdreeksen van Figuur 7.10 80
Tabel 7.4 Samenvatting analyse van horizontaal getij in een aantal punten op basis van modelberekeningen 80
Tabel 8.1 Classificatie van de mate waarin meetdata en modelsimulaties met elkaar overeenkomen 95
Tabel 8.2 Vergelijking van het effect van de bodemligging op netto sedimenttransport volgens modelberekeningen met de transportrichting en volumeontwikkeling op basis van metingen ... 96

Samenvatting

Uit de lodingsdata en ingreepgegevens (bijv. zandwinning) verkregen volumegegevens van de Westerschelde blijkt dat het estuarium tot omstreeks 1989 sediment importeerde vanuit de omringende gebieden. De menselijke zandonttrekking wordt deels of geheel weer aangevuld door de natuur. Vanaf 1989 neemt de importerende trend echter af en vindt mogelijk zelfs een sedimentexport plaats.

Naar aanleiding van de resultaten in de zandbalans zijn voor deze studie de volgende doelstellingen geformuleerd:
1) Vergroot de kennis met betrekking tot de betrouwbaarheid van de data; of gesproken kan worden van een zandvolume toenemende en zandvolume afnemende trend als gevolg van natuurlijke processen in de periode vóór 1989 respectievelijk na 1989.
2) Bepaal of de veranderingen in de bodemgeometrie de dominante factor is voor de onttrekking of aanvulling van zand door de natuur.
3) Bepaal wat, in het algemeen, de invloed is van de bodemgeometrie op de sedimenttransportpatronen en het sedimenttransport in de Westerschelde.

Doelstelling 1) is onderzocht door een literatuurstudie te doen naar de onnauwkeurigheden in de zandbalans. Onnauwkeurigheden kunnen worden veroorzaakt door fouten in lodingen, in ingreepgegevens (bagger-, stort- en zandwindata) en door incorrecte aannamen waarmee de zandbalans wordt berekend. Het blijkt dat alleen waarde kan worden gehecht aan de trends op de langere termijn (10-15 jaar). Voor 1985 vindt een import plaats in de orde van 1 á 2 Mm^3/jr. In de periode 1985-1991 neemt de importerende trend af en sindsdien importeert de Westerschelde geen sediment meer. Begin jaren negentig lijkt een exporterende trend te zijn ingezet van 1 à 2 Mm^3/jr.

Met betrekking tot doelstelling 2) en 3) is een tweedimensionaal waterbewegingsmodel gebruikt. Dit model berekent de getijgedreven stroomsnelheden in het hele gebied op basis van de bodemgeometrie in een bepaald jaar. Andere factoren zoals wind, golven en dichtheidsstromen worden achterwege gelaten. Door middel van een vereenvoudigde transportformulering ($S \propto u^n$) kan een schatting worden gegeven van de getijgemiddelde sedimenttransporten in het estuarium. Uit het sedimenttransportpatroon kan worden bepaald of een bepaald (deel)gebied erodeert of aanzandt. Dit kan worden vergeleken met de uitkomsten uit de zandbalans. De sedimenttransportenpatronen zijn bepaald met bodemliggingen uit diverse jaren, waarbij alle condities in het model gelijk worden gehouden behalve de bodemligging. Op deze manier kan, binnen de grenzen van de modelnauwkeurigheid, de hypothese gerechtvaardigd of verworpen worden dat de bodemligging in de Westerschelde, via het effect op de getijsnelheden, een dominante invloed heeft op de ontwikkeling van het zandvolume.

Uiteindelijk zijn simulaties uitgevoerd met drie verschillende bodems: uit 1968, 1972 en 2002. Een simulatie met de bodem uit 2002 laat geen toename van export (of afname van import) zien ten opzichte van een simulatie met een bodem uit 1968 of 1972. In een aantal deelgebieden zijn wel overeenkomsten te vinden tussen modelresultaten en meting bij vergelijking van 1972 en 2002, maar dan wijkt de modeluitkomst en meting af bij vergelijking van 1968 en 2002 (of 1968 en 1972). Het omgekeerde komt ook voor. Mogelijke oorzaken voor de afwijking tussen modelresultaten en metingen zijn:

- Onnauwkeurigheden in de zandbalansdata (tot nu toe nog onbekend).
- De bodemligging in combinatie met getijgedreven sedimenttransporten is niet (als enige) bepalend voor de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde en deelgebieden in de Westerschelde.
- De transportformulering die is gebruikt ($S \propto u^n$) representeert niet het sedimenttransport in de Westerschelde.
- De berekende sedimenttransporten representeren mogelijk wel de morfologische ontwikkeling op de korte termijn, maar niet de morfologische ontwikkeling op de lange termijn
- In het model zijn niet genoeg processen meegenomen, zoals (wind)golven en dichtheidstromen.

Er is dus te veel onzekerheid met betrekking tot de methode om de hypothese (de bodemligging heeft via de getijgedreven transporten een dominante invloed op de morfologie) echt te kunnen verwerpen. Wat in ieder geval wél kan worden geconcludeerd is dat het effect van de bodemgeometrie, ook in deelgebieden, niet zo significant is dat de effecten boven de modelruis en modelonnauwkeurigheid uitkomen.

Uit de modelresultaten kan het volgende worden geconcludeerd:

- De bodem van 1972 veroorzaakt een toename van sedimenttransporten in landwaartse richting vergeleken met de simulatie van 1968. Dit effect is het grootst in het oostelijk deel. Vanuit het midden van het estuarium, rondom Hansweert, vindt een relatieve toename van erosie plaats. Ter hoogte van Bath vindt relatief meer aanzanding plaats.
- De bodem van 2002 veroorzaakt in het midden en oostelijk gedeelte van de Westerschelde een toename van landwaarts gericht transport ten opzichte van de transporten berekend met een bodem van 1968. In het westen is een relatieve toename van zeewaarts gericht transport waarneembaar. Rondom Hansweert en verder oostwaarts tot en met de Platen van Valkenisse is het effect op de sedimenttransporten het grootst. In het gebied tussen Borssele en Hansweert vindt een relatieve toename van erosie plaats. Vanuit dit gebied wordt relatief méér sediment naar het oosten en naar het gebied ter hoogte van de haven van Vlissingen getransporteerd. Deze gebieden zanden daardoor relatief meer aan.
- Het getijprisma is in het gehele estuarium toegenomen als gevolg van veranderde bodemligging tussen 1972 en 2002. De debiettoename gaat in het westelijk en midden deel van de Westerschelde gepaard met een toename van 10 tot 30% van het bruto transport. In het oostelijk deel gaat de debiettoename gepaard met een afname van 20-50% van het bruto transport. Het doorstroomoppervlak in het oostelijk deel is dus zodanig toegenomen, dat de stroomsnelheden over het algemeen lager zijn geworden.

- De veranderingen van het (getijgemiddelde) sedimenttransport op de lange termijn (>1 mnd) samenhangend met de bodemverandering tussen 1972 en 2002 kunnen worden veroorzaakt door veranderingen van de interactie tussen het M_2-getij en de residuele stroming (M_0) en/of door de interactie tussen het M_2-getij en de hogere harmonischen (M_4, M_6). Het residuele sedimenttransport als gevolg van de bodemligging wordt op de beschouwde locaties in het oostelijk deel vooral beïnvloed door de M_2M_4-interactie en de $M_2M_4M_6$-interactie en op de locaties in het westelijk deel vooral door de M_0M_2-interactie.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Westerschelde ligt in het zuidwesten van Nederland en vormt het overgangsgebied tussen de rivier de Schelde en de Noordzee. De menging van het zoute Noordzee water en het zoete rivierwater en de aanwezigheid van zowel ondiepe als diepe delen zorgen voor een variëteit aan flora en fauna in het gebied en geven de Westerschelde een hoge ecologische waarde. Tevens fungeert de Westerschelde als toegang voor meerdere havens, waarvan met name de haven van Antwerpen van groot economische belang is (RWS en MVG, 2001). Om toegang te verschaffen tot grote(re) schepen, wordt de vaargeul kunstmatig op diepte gehouden. Het gebaggerde sediment wordt elders weer in de Westerschelde teruggestort. Ook is de diepte van de vaargeul de laatste 40 jaar twee keer structureel vergroot, zodat de toegang werd verbeterd voor de steeds groter wordende schepen. In 2005 is bepaald dat in 2007 begonnen gaat worden met een derde verruiming (NRC, 2005). De behoefte aan verdere vaargeulverdieping is vanuit België daarmee nog steeds niet verminderd. De bagger- en stortwerkzaamheden ten behoeve van de vaargeul kunnen de natuurlijke ontwikkeling van de Westerschelde beïnvloeden en kan tot gevolg hebben dat van de aanwezige ecologische waarde afneemt. Hetzelfde geldt voor de zandwinning die jaarlijks plaatsvindt in de Westerschelde. De beheerder van de Westerschelde, Rijkswaterstaat (RWS) Zeeland, heeft dan ook als taak om het beleid en beheer zo in te richten dat de genoemde functies gewaarborgd blijven. Hierbij geldt het veiligheidsaspect als randvoorwaarde. De naastgelegen gebieden in zowel Nederland als België moeten beschermd blijven tegen overstromingsgevaar (RWS en MVG, 2001). Deze studie spitst zich met name toe op het beleid met betrekking tot de morfologie, d.w.z. het bagger- en stortbeleid en het zandwinbeleid.

Eén van de graadmeters voor een natuurlijke en gezonde habitat is het zandvolume van het systeem. Daling van het sedimentvolume wordt als zeer onwenselijk ervaren aangezien het ten koste kan gaan van de plaatarealen in de Westerschelde en afbreuk kan doen aan de ecologie. Met behulp van dieptemetingen is de ontwikkeling in de loop der tijd te bepalen. Het netto sedimentvolume kan veranderd zijn door activiteiten van de mens (bijv. baggeren, storten en zandwinning) én als gevolg van natuurlijke processen. Historische dieptemetingen geven aan dat het netto zandvolume van de Westerschelde afneemt sinds 1970. Dit is voornamelijk het gevolg van menselijke zandonttrekking (zandwinning). Ook blijkt dat een deel van de volumeafname in de laatste 10 –15 jaar mogelijk het gevolg is van natuurlijke processen. De menselijke ingrepen (baggeren, storten en zandwinning) kunnen hiervoor sturend zijn geweest door de richting van het netto sedimenttransport te beïnvloeden. Om thans en in de toekomst een optimaal zandwinbeleid en bagger- en stortbeleid te kunnen opstellen en uitvoeren is het voor RWS Zeeland van belang te

weten of de natuurlijke zandvolumeverandering daadwerkelijk is veranderd en zo ja: of dit is veroorzaakt door de menselijke ingrepen.

1.2 Kader

Door het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) wordt in de projecten ZEEKENNIS en KUST2005*WSmond gewerkt aan kennisopbouw om actuele en toekomstige beleids- en beheersvragen voor RWS Zeeland te kunnen beantwoorden. In het kader van deze projecten is de zandbalans voor de Westerschelde en monding opgesteld. De resultaten van de zandbalansstudie genereerden bovengenoemde kennisvraag. Dit afstudeeronderzoek wordt in het kader van deze projecten uitgevoerd en valt officieel onder KUST2005*WSmond.

1.3 Probleem definitie

1.3.1 Probleem analyse

Het probleem kan worden onderscheiden in beheersvragen en kennisvragen. Om een optimaal beleid en beheer te kunnen opstellen en voeren moet een aantal beheersvragen worden opgelost. Om antwoord te kunnen geven op deze beheersvragen zal eerst een aantal kennisvragen moeten worden beantwoord.

Beheersvraag

De beheerder van de Westerschelde, RWS Zeeland, is geïnteresseerd in de gevolgen van het huidige bagger- en stortbeleid en zandwinbeleid en van de reeds uitgevoerde vaargeulverdiepingen in de Westerschelde. Met name de effecten voor de volgende functies van het estuarium zijn van belang:

- Toegankelijkheid van de Schelde-havens
- Veiligheid tegen overstromingen
- Natuurlijkheid (d.w.z. de ecologische waarde)

Kennisvraag

Vragen met betrekking tot de toegankelijkheid gaan bijvoorbeeld over de laagwaterstanden (voor de vaardiepte van schepen) en de snelheid waarmee vaargeulen aanzanden.
De vragen over de veiligheid in het gebied hebben vooral te maken met hoogwaterstanden, waarbij onder andere de voortplanting van het getij, tijverschillen en windopzet van belang zijn.
Met betrekking tot de natuurlijkheid kunnen de vragen bijvoorbeeld gaan over het effect op de waterkwaliteit, veranderingen van habitats en ontwikkeling van de morfologie. Met betrekking tot de morfologie spelen vragen als: Zijn geulen aan het dichtslibben? Verdwijnen er plaatarealen? Verandert de bodemsamenstelling (verhouding slib/zand)?

Een parameter waarmee een indicatie kan worden gegeven voor de ontwikkeling van de morfologie in het systeem is het verloop van het sedimentvolume. Dit kan als graadmeter worden gezien voor de natuurlijkheid van de Westerschelde: een volume afname betekent afbraak van de ecologische waarde in het systeem. In de totale volumeverandering van de Westerschelde kan onderscheid worden gemaakt tussen

veranderingen in het zandvolume door de mens en door de natuur. Sinds circa 50 jaar geleden wordt door de mens zand onttrokken aan de Westerschelde. Uit lodinggegevens en bagger- en stortdata blijkt dat vanaf 1966 tot ongeveer 1989 het systeem voor een gedeelte of in z'n geheel weer met zand wordt aangevuld a.g.v. natuurlijke processen. Maar sinds ongeveer 1989 lijkt een licht afnemende trend zichtbaar te zijn en vindt mogelijk zelfs een export van zand plaats door de natuur. De kennisvragen die met betrekking tot het verloop van het zandvolume kunnen worden gesteld zijn de volgende:

- Is de betrouwbaarheid van de data zo groot dat daadwerkelijk gesproken kan worden van een aanvulling en onttrekking van zand a.g.v. natuurlijke processen in de periode voor 1989 respectievelijk na 1989?
- Als inderdaad sprake is van een trendafname of trendbreuk, is dat het gevolg van de veranderde bodemgeometrie door bijvoorbeeld de uitgevoerde vaargeulverdiepingen?
- Wat is in het algemeen de invloed van de bodemgeometrie op de sedimenttransport patronen in de Westerschelde?

Deze studie richt zich met name op deze drie kennisvragen.

1.3.2 Doelstellingen

1) Vergroot de kennis met betrekking tot de betrouwbaarheid van de data; of gesproken kan worden van een zandvolume toenemende en zandvolume afnemende trend a.g.v natuurlijke processen in de periode vóór 1989 respectievelijk na 1989.
2) Bepaal of de veranderingen in de bodemgeometrie de dominante factor is voor de onttrekking of aanvulling van zand door de natuur.
3) Bepaal wat, in het algemeen, de invloed is van de bodemgeometrie op sedimenttransportpatronen en het sedimenttransport in de Westerschelde.

1.3.3 Methode van aanpak

Een literatuuronderzoek is uitgevoerd om de fysische processen en dynamica van estuaria in kaart te brengen en het studiegebied zelf. Met betrekking tot de eerste doelstelling is een literatuurstudie gedaan naar de bandbreedte en betrouwbaarheid van de meetdata. Om de twee laatste doelstellingen te kunnen bereiken is een tweedimensionaal waterbewegingsmodel van de Westerschelde gebruikt. Dit model berekent de getijgedreven stroomsnelheden in het hele gebied op basis van de bodemgeometrie in een bepaald jaar. Aan de hand van de stroomsnelheden worden de sedimenttransporten berekend met behulp van een vereenvoudigde, algemene transportformulering. Er wordt dus geen gebruik gemaakt van een morfologisch model, maar van een model waarbij het sedimenttransport direct is gerelateerd aan de waterbeweging. Alle complexe processen die in een morfologisch model zitten worden achterwege gelaten, zodat terug wordt gegaan naar de basis: de waterbeweging. Met het model kan een schatting worden gegeven van het getijgemiddelde sedimenttransport in het estuarium. De sedimenttransportpatronen hangen alleen af van de momentane stroomsnelheden en geven dus de initiële morfologische verandering weer op basis van de bodemgeometrie. Uit het sedimenttransportpatroon kan bepaald worden of een bepaald (deel)gebied aanzandt of erodeert. Als de veranderingen in de bodemligging een significante invloed hebben op het

sedimenttransportpatroon, doordat getijsnelheden veranderen, dan zal het model ook veranderde getijsnelheden berekenen en daarom ook een ander sedimenttransportpatroon.

Het model houdt geen rekening met andere processen of factoren zoals wind, golven of veranderingen van het getij op de zeerand. De sedimenttransporten zijn dus berekend met bodemliggingen uit diverse jaren en de sedimentbalansen zijn bepaald voor deelgebieden. De randvoorwaarden veranderen hierbij niet, zodat alleen de veranderingen in het sedimenttransport en in de sedimentbalans, als gevolg van de bodemgeometrie, zichtbaar zijn. Op deze manier kan, binnen de grenzen van de modelnauwkeurigheid, de hypothese gerechtvaardigd of verworpen worden dat de bodemligging in de Westerschelde, via het effect op de getijsnelheden, een dominante invloed heeft op de ontwikkeling van het zandvolume. Bij de verwerping of rechtvaardiging van de hypothese wordt rekening gehouden met de gevoeligheid van variatie binnen de gebruikte vereenvoudigde transportfomulering. Er is bijvoorbeeld onderzocht wat de invloed is van toepassing van een drempelsnelheid in de transportformulering.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstukken 2 t/m 4 zijn het resultaat van het literatuuronderzoek. Hoofdstuk 2 bevat algemene theorie en hoofdstukken 3 en 4 hebben betrekking op de Westerschelde. In hoofdstuk 2 worden processen en factoren beschreven, die in het algemeen van belang zijn voor de ontwikkeling van een estuarium. Daarnaast worden in dit hoofdstuk definities van verschillende processen gegeven, die in de rest van het rapport worden gebruikt. Hoofdstuk 3 bevat o.a. een beschrijving van het ontstaan van Westerschelde, een beschrijving van de hydrodynamica en de morfologie (inclusief de menselijke ingrepen). Hieruit volgt wat de karakteristieken zijn van de Westerschelde en welke processen en factoren specifiek van belang zijn voor de (morfologische ontwikkeling van de) Westerschelde. Een onderdeel van de gebiedsbeschrijving is ook het verloop van het zandvolume in de Westerschelde. Omdat dit een cruciaal onderdeel is van dit onderzoek, wordt er een apart hoofdstuk aan gewijd: hoofdstuk 4. Hierin staat niet alleen het volumeverloop van de Westerschelde en van deelgebieden van de Westerschelde beschreven, maar ook het resultaat van het literatuuronderzoek naar de nauwkeurigheid van de data. Doelstelling 1 wordt in dit hoofdstuk dus behandeld.

In hoofdstuk 5 is de opzet van het verdere onderzoek en de opzet van het model beschreven (invoer, randvoorwaarden, etc.). Op basis van hoofdstuk 3 en 4 zijn de (model)aannames geformuleerd, waarop het onderzoek is gebaseerd. Naar aanleiding van hoofdstuk 4 is bepaald met welke bodemliggingen (uit welke jaren) de simulaties moeten worden uitgevoerd.

Om te kunnen weten wat verwacht kan worden uit de modelsimulaties is het verloop van het zandvolume geanalyseerd (hoofdstuk 6). De trends zijn bepaald omstreeks de jaren die corresponderen met de jaren van de bodemliggingen in het model.

Met het model zijn de waterbeweging en sedimenttransporten berekend. Het effect van een andere bodemligging is door vergelijking van de modelresultaten zichtbaar. De verschillen in waterbeweging a.g.v. de veranderde bodem zijn beschreven in hoofdstuk 7. Ook wordt in dit hoofdstuk een analyse gegeven van de veranderingen van het sedimenttransport, dat gedurende de vloedperiode en de ebperiode plaatsvindt, a.g.v. de bodemverandering. Dit hoofdstuk is vooral gericht op doelstelling 3. Er wordt nog niet gericht op getijgemiddelde sedimenttransporten.

In hoofdstuk 8 zijn de resultaten van de getijgemiddelde sedimenttransporten gegeven. Het effect van een andere bodemligging op het sedimenttransport wordt vergeleken met de trends van de meetdata uit hoofdstuk 6. Hoofdstuk 8 behandelt zowel doelstelling 2 als doelstelling 3.

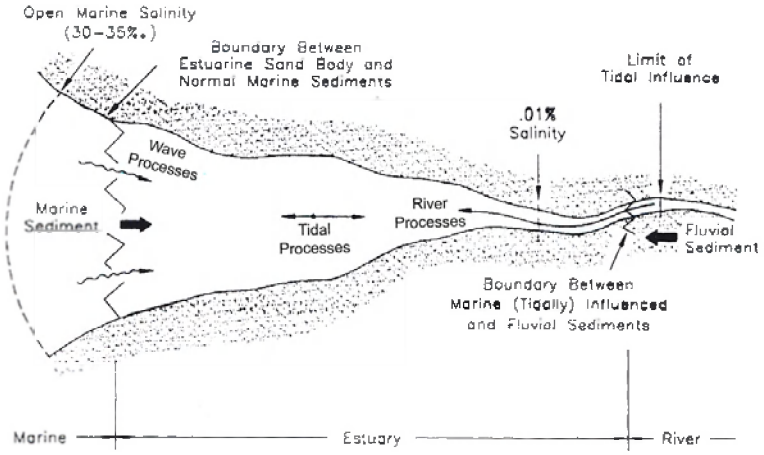
Op basis van hoofdstukken 4, 7 en 8 zijn de algemene conclusies geformuleerd (hoofdstuk 9) en volgen een aantal aanbevelingen.

2 Theorie

2.1 Estuaria: algemeen

Een estuarium is een zeearm die in verbinding staat met een rivier, zodat het fungeert als riviermonding, maar ook onder invloed staat van het getij. De meeste estuaria ontstaan door relatieve zeespiegelstijging. Hierdoor kan de zee steeds verder doordringen in de riviermonding en overstroomt uiteindelijk de riviervallei.

Kustsystemen kunnen geclassificeerd worden op basis van de onderlinge invloed van fysische processen zoals golfwerking, getij en rivierafvoer. De combinatie van deze processen geven het estuarium zijn typerende, trechtervormige geometrie. (Figuur 2.1 volgens Dalrymple e.a., 1992). Estuaria vallen, wat betreft de relatie getij en rivierafvoer, tussen de deltagebieden (dominante rivierafvoer) en de kustvlaktes (verwaarloosbare rivierafvoer). Kenmerkend is dat het systeem een gemengde sedimenthuishouding heeft: zowel fluviatiel als marien sediment komt voor. De rivier transporteert een mix van zand, slib en klei naar het estuarium en vanuit zee wordt voornamelijk zand (vaak met schelpdeeltjes) aangevoerd.



Figuur 2.1 Distributie van energie en fysische processen in estuaria

Volgens Dalrymple e.a., 1992

Een ander fundamenteel kenmerk van estuaria is de menging van zoet en zout water. Estuaria kunnen worden geclassificeerd naar de mate waarin het zoute en zoet water zich mengt of scheidt. Doordat het zoete water een kleinere dichtheid heeft dan het zoute water, schuift het zoete water over het zoute water en ontstaat er een zouttong. De hoek van het scheidingsvlak tussen het zoute en zoete water wordt bepaald door de grootte van de watervolumina en varieert binnen een getij cyclus, met het seizoen en bijvoorbeeld tijdens stormen. Bij een relatief grote rivierafvoer is het scheidingsvlak nagenoeg horizontaal en varieert het zoutgehalte over de diepte. In het andere geval, waarbij de rivierafvoer relatief klein is, loopt het scheidingsvlak verticaal en is er sprake van een gemengd of homogeen systeem.

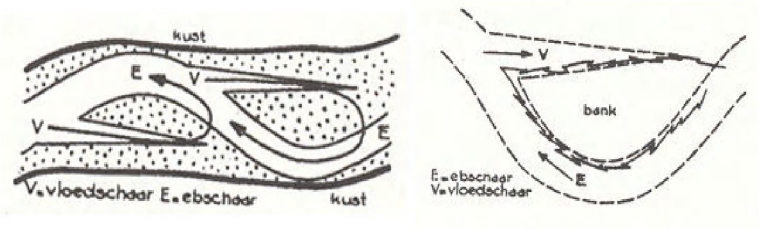
2.2 Morfologie van estuaria

De morfologie van estuaria betreft de bestudering van de fysieke structuur van een estuarium en met name de veranderingen daarin. Als gevolg van fysische processen zoals golfwerking, getij en de rivierafvoer vormt een estuarium zich tot een trechtervormig gebied. De rand zeewaarts wordt daarbij de mond(ing) genoemd en de landwaartse rand, waar de rivier binnenstroomt, het hoofd van het estuarium. De breedte van de mond en het hoofd hangen af van de grootte van de getijslag; bij een toenemende getijslag neemt de breedte van de mond toe en wordt het hoofd steeds smaller.

Een estuarium kan worden verdeeld in een mondingsgebied en het achterliggende bekkengebied. Het mondingsgebied bestaat uit twee onderdelen:

- Buitendelta of ebdelta: Zeewaartse rand van het mondingsgebied waar het sediment bij eb gedeponeerd wordt door divergentie van de monding.
- Keel: de vernauwing tussen buitendelta en het bekkengebied.

Karakteristiek aan het bekkengebied van een estuarium is het systeem van meanderende, vertakte geulen en platen die bij laag water droog komen te staan. Dit systeem ontstaat door de tegengestelde eb- en vloedstromen in combinatie met het uitschuren van geulbochten. Er ontstaat een splitsing binnen een geul tussen een gedeelte waar voornamelijk de ebstroom is geconcentreerd en een gedeelte waar de vloedstroom zich concentreert. Bochtuitschuring kan dan resulteren in afsplitsing van een afzonderlijke eb en vloedgeul met daartussen een gebied dat voornamelijk sedimenteert (Van Veen, 1950). Nieuwe vertakkingen van eb en vloedgeulen kunnen ontstaan doordat de watermassa de neiging heeft om als het ware "uit de bocht te vliegen". Door het systeem van eb en vloedgeulen ontstaat een circulaire reststroming met daartussen een droogvallend gebied (Figuur 2.2).



Figuur 2.2 Eb- en vloedgeulen vormen circulaire stromen in estuaria

Volgens Van Veen, 1950

Waar eb- en vloedstromen elkaar ontmoeten vindt ophoping van sediment plaats en ontstaat een drempel. Indien een drempel doorbreekt, wordt de geulbocht afgesneden en ontstaat er een kortsluitgeul. Als de waterstand bij eb lager is dan bij vloed, concentreert de ebstroming zich meer in de diepere delen van de geul en zullen ebgeulen over het algemeen dieper zijn dan vloedgeulen (Van Veen, 1950). Er is bij estuaria sprake van een geulensysteem met een gevlochten karakter (vertakkingen komen minder voor) door de aanwezigheid van rivierafvoer.

Het estuarium kan worden ingedeeld naar hoogteligging ten opzicht van het waterpeil (Tank, 1995):

- Subgetijden gebieden: gebieden beneden gemiddeld laag water (GLW), zoals (eb en vloed)geulen en ondiep water gebieden.
- Intergetijden gebieden: gebieden tussen GLW en gemiddeld hoog water (GHW), zoals platen en slikken.
- Supragetijden gebieden: gebieden boven GHW, zoals hoge platen en schorren.

Het verschil tussen platen en slikken ligt in de aangrenzende gebieden. Platen zijn geheel omringd door geulen en een slik grenst aan één zijde aan een oever. Ook is er een verschil in de samenstelling van sediment; slikken bevatten veel silt en klei en platen bestaan voornamelijk uit middelfijn tot fijn zand. Het oppervlak van het intergetijdengebied hangt af van de getijslag; hoe groter het verschil tussen eb en vloed, des te uitgestrekter de intergetijdengebieden zijn en des te groter de komberging. De komberging van een estuarium is het watervolume dat geborgen wordt tussen GLW en GHW. Vegetatie is vooral te vinden op schorren, die door hun hoge ligging maar een paar keer per jaar overstromen.

2.3 Morfodynamica

De waterbeweging, sedimenttransport en morfologische verandering interacteren met elkaar. Het morfodynamische systeem in estuaria wordt gevormd door deze interacties op (en tussen) verschillende schaalniveaus. Het morfodynamische systeem kan worden beïnvloed door zowel natuurlijke als menselijke factoren.

2.3.1 Morfodynamisch evenwicht

De morfologie van getijdenbekkens is niet statisch maar dynamisch. De bodem zal zich voortdurend proberen aan te passen aan de momentane hydraulische omstandigheden. Wanneer deze vormverandering zonder resulterend zandverlies of zandwinst plaatsvindt, is er sprake van een grootschalig morfologisch evenwicht of (morfo)dynamisch evenwicht. Een in de tijd onveranderlijk profiel wordt echter nooit bereikt, omdat hydraulische omstandigheden continu veranderen. In het streven naar morfologisch evenwicht passen morfologische elementen van een estuarium zich aan (zoals geulen, intergetijdengebieden en de buitendelta). Met name stormen kunnen het evenwicht hevig verstoren.

De stabiliteit van de morfologische eenheden kan worden beschreven met empirische relaties, waarbij de geometrische eigenschappen van het estuarium zijn gerelateerd aan de hydraulische condities. Het stroomoppervlak in de keel van het estuarium is bijvoorbeeld gerelateerd aan het getijprisma volgens Vergelijking 2.1.

Vergelijking 2.1 Empirische relatie tussen getijprisma en stroomoppervlak van de keel

Volgens O'Brien, 1969

$$A_{GZN} = c_A \cdot P$$

Waarin;

A_{GZN} = stroomoppervlak onder gemiddeld zee niveau [m^2]
c_A = empirische coëfficiënt [-]
P = getijprisma = vloedvolume + ebvolume [m^3]

Andere morfologische eenheden die kunnen worden gerelateerd aan het getijprisma via empirische relaties zijn het geulvolume, het zandvolume van de buitendelta en het oppervlak van het intergetijdengebied samen met het totale bekkenoppervlak (De Vriend e.a., 2002).

Interne dynamiek kan de morfologische stabiliteit van een estuarium herstellen. Een verstoring van de breedte of diepte van een geul of plaat kan lokaal door eb- en vloedtransporten worden vereffend, zonder een netto transport tussen estuarium en zee te veroorzaken. Drempels worden bijvoorbeeld gevormd waar nauwelijks stroming aanwezig is en uitschuring ontstaat bij een lokale vernauwing. Een belangrijk onderdeel van de interne dynamiek zijn de cycli van geuluitbochting en geulafsnijding.

Aanpassing van de morfologie in de tijd heeft in het algemeen een asymptotisch karakter. In het begin is het verschil tussen de bestaande geometrie en evenwichtsprofiel groot. Het aanpassingsproces zal snel verlopen door sterke gradiënten in het sedimenttransport. Naarmate het evenwicht dichterbij komt nemen de gradiënten af en vertraagt het aanpassingsproces.

2.3.2 Schaalniveaus

De fysische processen die ten grondslag liggen aan de morfologische ontwikkeling en morfodynamiek van estuaria zijn complex. De complexiteit wordt extra vergroot doordat de processen plaatsvinden op verschillende tijd- en ruimteschalen. De volgende schaalniveaus kunnen worden onderscheiden (de Vriend en Ribberink, 1996):

- Micro-schaal
  Het niveau van beddingvormen, zoals megaribbels. De bijbehorende tijdschaal is dagen. Relevante forceringen zijn het dagelijks getij en wind.
- Meso-schaal
  Het niveau van de morfologische elementen, zoals geulen en platen. De bijbehorende schalen zijn honderden meters in de ruimte en jaren in tijd. De voornaamste forceringen zijn seizoensvariaties en jaarlijkse variaties in het getij en weercondities, maar ook menselijke ingrepen en extreme condities.
- Macro-schaal
  Dit is het niveau van deelverzamelingen van de morfologische elementen en de wisselwerking tussen en de morfologische elementen, bijvoorbeeld de buitendelta, hoofd- en nevengeulen met tussenliggende plaat. De ruimtelijke schaal en tijdschaal is respectievelijk enkele kilometers en decennia. Lange-termijn forceringen als 18,6 jarige getijcyclus en herhaaldelijk ingrijpen van de mens zijn van belang op deze schaal.
- Mega-schaal
  Deze schaal omvat het gehele estuarium of van de grootste compartimenten van het estuarium, dus tientallen kilometers in de ruimte. De bijbehorende tijdschaal is eeuwen. Zeespiegelrijzing, klimaatsverandering en grootschalig menselijk ingrijpen (bijv. afsluitwerken) zijn forceringen die een rol spelen.

Het dynamische evenwicht kan ook op verschillende schalen plaatsvinden.

2.4 Fysica in estuaria

De ontwikkeling van de morfologie wordt bepaald door hydrodynamische processen, die sedimenttransport genereren, en door factoren die het sedimenttransport kunnen beïnvloeden. De hydrodynamische processen spelen af op verschillende tijd- en ruimteschalen.

Stroming langs de bodem veroorzaakt een schuifspanning, die verantwoordelijk is voor het transport van sedimentdeeltjes (ook wel erosie). Turbulente waterbewegingen zijn daarnaast van belang, omdat ook hierdoor deeltjes in suspensie komen. Beneden een bepaalde "kritische" schuifspanning, wordt geen sediment getransporteerd. Indien horizontale gradiënten in het sedimenttransport aanwezig zijn, zal dit leiden tot erosie of sedimentatie in bepaalde gebieden of deelgebieden.

2.4.1 Processen en factoren die invloed hebben op sedimenttransport

Stroming wordt aangedreven door verschillende forceringen en wordt beïnvloed door een aantal factoren:

- Getij
  Indien een verschil ontstaat tussen de hoeveelheid geïmporteerd (vloed) en geëxporteerd sediment (eb) is sprake van een residueel transport, gemiddeld over een getijperiode gezien. Getijstromen vormen het systeem van platen en geulen in estuaria. Het getij is de belangrijkste aandrijving voor sedimenttransport in estuaria. In paragraaf 2.4.3 wordt hier verder op in gegaan.

- Rivierafvoer
  De rivierafvoer kan het sedimenttransport in estuaria op twee manieren beïnvloeden. Ten eerste kan de aanwezigheid van het zoute zeewater en het zoete rivierwater dichtheidsstromen veroorzaken, waardoor een zeewaarts gerichte reststroming aan het oppervlak en een landwaarts gerichte reststroming bij de bodem ontstaat. Dit is met name het geval als de rivierafvoer relatief groot is en een grote dichtheidsgelaagdheid in de verticaal ontstaat. De sedimentconcentraties zijn bij de bodem het grootst en een netto landwaarts transport kan ontstaan. Ten tweede kan door een rivierafvoer de ebstroom versterkt en de vloedstroom verzwakt worden. Een vergroting van de ebdominantie of verkleining van de vloeddominantie is het gevolg.

- Wind
  Via golfwerking en windopzet kan wind het sedimenttransport beïnvloeden. Met betrekking tot de golfwerking hebben windgolven met name in ondiep water invloed op de erodeerbaarheid van de bodem als gevolg van de orbitaalbeweging. In ondiep water beschrijft een waterdeeltje bij de bodem een horizontale heen en weer gaande waterbeweging. De opwoeling van sediment wordt zo bevorderd en brengt het sediment uiteindelijk in suspensie. De kritische stroomsnelheid voor erosie zal daardoor bij aanwezigheid van golven eerder bereikt worden. Een sedimentdeeltje wordt eerder getransporteerd met golven dan zonder golven. Voor estuaria is dit met name het geval op de buitendelta en op intergetijdengebieden. Intergetijden gebieden staan vaak alleen met vloed onder water.

Daardoor zijn de concentraties op platen bij vloed groter en kan een residueel vloedtransport worden veroorzaakt. De meeste golven bereiken het estuarium niet en breken op de buitendelta, al kunnen windgolven via refractie en diffractie toch een bijdrage leveren aan het residuele sedimenttransport in het estuarium.

Ook kan wind kan zorgen voor een waterstandsverhoging: windopzet. Een waterstandsverhoging bij de monding van het estuarium genereert een landwaartse stroming. Bij stormen kan windopzet aanzienlijk zijn en uren lang aanhouden, waardoor het zelfs mogelijk is dat, als gevolg van wind gegenereerde stroming, geen getijkentering plaats vindt. Dit soort omstandigheden kan grote invloed hebben op de morfologie van het estuarium, zoals vorming van nieuwe geulen en vertakkingen.

- Morfologie/geometrie
  De morfologie van een estuarium, zoals de locatie van geulen en platen, beïnvloedt de stroming. Geulen hebben vooral een transporterende werking en platen meer een kombergende functie, zodat sediment voornamelijk door de geulen wordt getransporteerd. Morfologie en stroming hebben een interactie met elkaar: stroming beïnvloedt morfologie en morfologie beïnvloedt stroming. Hierdoor kunnen zichzelf versterkende effecten ontstaan, zoals uitbochting van geulen. Andere morfologische parameters die eb- of vloeddominantie kunnen beïnvloeden zijn de gemiddelde waterdiepte van het estuarium in verhouding tot de getij-amplitude en de verhouding geulvolume-plaatvolume. (Speer en Aubrey, 1985; Friedrichs en Aubrey, 1988). Maar ook parameters als de lengte van het estuarium in verhouding tot de lengte van de getijgolf en de breedte van het estuarium in verhouding tot de golflengte, kunnen de sedimenttransportpatronen in estuaria beïnvloeden (Li en O'Donnell, 1997). Zie ook paragraaf 2.4.3.

- Menselijk ingrijpen
  Activiteiten van de mens in en nabij estuaria kunnen de morfologische ontwikkeling beïnvloeden op verschillende schaalniveaus. Ter wille van de scheepvaart worden geulen uitgediept en gefixeerd. Het dieper maken van geulen kan de hydraulische condities veranderen, zoals een toename van de getijvoortplanting en vergroting van het getijvolume en de getijslag. Het fixeren van geulen beperkt het vermogen van het estuarium om zich aan te kunnen passen aan een nieuw evenwicht. De grenzen van het estuarium zijn vaak ook vastgelegd door de bouw van dijken, zodat verdere meandering van geulen tegengegaan wordt. Activiteiten die de ontwikkeling ook beïnvloeden, via directe veranderingen in de morfologie, zijn zandwinning, storten van sediment en landaanwinning. Activiteiten als gasboringen en grondwateronttrekking kunnen leiden tot bodemdaling waardoor de zeespiegel relatief stijgt. Activiteiten als het storten van sediment kan tijdelijk een verhoogde concentratie geven, waardoor netto sedimenttransporten plaatsvinden.

- Andere invloedsfactoren
  Klimaatsverandering en verhoogde uitstoot van broeikasgassen zijn mogelijke oorzaken voor een mondiale stijging van de temperatuur met als gevolg: zeespiegelstijging. Stijging van de zeespiegel kan ook relatief zijn door een grootschalige bodemdaling. Een estuarium zal, om zich aan te passen aan de stijgende zeespiegel, sediment importeren ten koste van de omringende kust. Wanneer de sedimentvoorraad van de aanliggende kust niet voldoende is, zal de diepte van het estuarium

relatief toenemen en veranderen hydraulische condities zoals getijslag, getijvoortplanting, etc. Het estuarium zal streven naar een nieuw evenwicht. Naast zeespiegelrijzing kan de mondiale temperatuurstijging zorgen voor extremere weersomstandigheden zoals extreme droogte, regenval of toename van stormvloeden.

2.4.2 2-dimensionale waterbeweging

De tweedimensionale stroming in het horizontale vlak in estuaria kan worden beschreven met bewegingsvergelijkingen in ondiep water en de massa-balans. De massa-balans (of continuïteitsvergelijking) geeft het behoud van de massa van het water weer. (Vergelijking 2.2)

Vergelijking 2.2 Massa-balans of continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}((h+\zeta)u) + \frac{\partial}{\partial y}((h+\zeta)u) + E = 0$$

Waarin;

- u,v = componenten van de dieptegemiddelde snelheden in respectievelijk x en y richting [m/s]
- ζ = verticale uitwijking waterstand ten opzicht van referentiepeil [m]
- h = locale waterdiepte ten opzichte van referentiepeil [m]
- x,y = coördinaten in het horizontale vlak loodrecht op en evenwijdig aan de kust [m]
- t = tijd [s]
- E = bronterm; toevoer of afvoer van water zoals neerslag of evaporatie [m/s]

De bewegingsvergelijkingen in x- en y-richting geven de balans weer tussen de aandrijvende krachten en de wrijvingstermen volgens Vergelijking 2.3 en Vergelijking 2.4.

Vergelijking 2.3 Bewegingsvergelijking in x-richting

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - fv + g\frac{\partial \zeta}{\partial x} + gu\frac{\sqrt{u^2+v^2}}{C^2(h+\zeta)} = \frac{\rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2+W_y^2}}{\rho_w (h+\zeta)} + \upsilon\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + F_x$$

Vergelijking 2.4 Bewegingsvergelijking in y-richting

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + fu + g\frac{\partial \zeta}{\partial y} + gv\frac{\sqrt{u^2+v^2}}{C^2(h+\zeta)} = \frac{\rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2+W_y^2}}{\rho_w (h+\zeta)} + \upsilon\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + F_y$$

Waarin;

- f = Corolis parameter [-]
- g = zwaartekracht versnelling [m/s^2]
- C = Chezy coëfficiënt (bodemruwheid coëfficiënt) [m$^{1/2}$/s]
- ρ_a = dichtheid van lucht [kg/m^3]
- ρ_w = dichtheid van water [kg/m^3]
- C_d = coëfficiënt van de windschuifkracht [-]

W_x, W_y = componenten van de windsnelheid aan het wateroppervlak in respectievelijk x en y richting [m/s]
υ = coëfficiënt van de turbulente viscositeit [m^2/s]
F_x, F_y = componenten van de krachtenterm; fysische processen die de waterbeweging versnellen dan wel vertragen [m/s^2].

2.4.3 Getij: uitgebreidere beschrijving

Algemeen
Een getijgolf ontstaat door een combinatie van de aantrekkingskracht van hemellichamen (maan en zon) en de centrifugale kracht als gevolg van de excentrische beweging van de aarde om het gemeenschappelijke zwaartepunt tussen maan en aarde. De aantrekkingskracht van de maan is het grootst en veroorzaakt een getijgolf met een periode van 12 uur en 25 minuten. De waterstanden van de hoogwaters en laagwaters variëren binnen een dag door de scheefstand van de as van de aarde ten opzichte van de maan (dagelijkse ongelijkheid). Ook komt een variatie voor met een cyclus van 4 weken en met een cyclus van 18,6 jaar. Dit wordt veroorzaakt door respectievelijk de onderlinge stand van maan, zon en aarde (spring-doodtij) en door de draaiing van het maansbaanvlak ten opzichte van het zonbaanvlak.

De voortplanting van een getijgolf wordt beïnvloed door de (on)diepte van oceanen en zeeën, de locatie van continenten en Coriolis krachten. De getijgolf die om Schotland heen in de Noordzee aankomt, wordt door de Coriolis kracht met een afwijking naar rechts naar de Engelse kust gedwongen. Door de vorm van de Noordzee buigt de getijgolf voor het Kanaal linksom en vervolgt zijn weg langs de Belgische en Nederlandse kust noordwaarts. De getijgolf maakt in het Noordzeebekken dus een ronddraaiende beweging tegen de klok in waarbij drie amfidromische punten zijn waar te nemen (zie Figuur 2.3). In een amfidromische punt is de verticale getijbeweging nul. Voor het getij in de Westerschelde is de rotatie om het meest zuidelijke amfidromisch punt belangrijk (nr 1 in Figuur 2.3).



Figuur 2.3 Voortplanting getij in de Noordzee met amfidromische punten

Het astronomische getij kan worden beschreven met behulp van harmonische componenten, waarbij de frequentie astronomisch is bepaald (zoals het maansgetij en zonsgetij). De amplitude en fase van iedere component verschillen van elkaar en per locatie. In de Noordzee is het dubbeldaags maangetij het sterkst, ook wel M_2-getij genoemd. Waarbij de M staat voor het Engelse woord *moon* en 2 voor tweemaaldaags. Een ander belangrijke component is het zonsgetij, S_2, met een periode van 12 uur. Verder kunnen componenten worden onderscheiden zoals O_1, P_1, K_2, Q_1, N_2, L_2. Deze componenten hangen samen met de declinatie tussen aarde, maan en zon en met de ellipsvormige baan van de maan en aarde. De lineaire combinatie van componenten met verschillende frequenties leidt tot lagere harmonische componenten (bijvoorbeeld het maan- en zonsgetij leidt tot een spring-doodtij variatie). Niet-lineaire interacties van het M_2-getij met zichzelf en met andere basis componenten genereren naast lagere harmonischen ook hogere harmonische componenten (bijv M_4, M_6, M_8, etc), samengestelde componenten (bijv. MS_4) en een residuele stromingscomponent (M_0). In Bijlage A wordt dit door middel van een theoretische analyse in de 1-dimensionale bewegingsvergelijking gedemonstreerd. De niet-lineaire effecten nemen toe naarmate het ondieper wordt (verhouding amplitude-waterdiepte wordt groter).

Getij in estuaria

Het getij is vaak de dominante forcering voor de morfologische ontwikkeling van een estuarium. De geometrie van het estuarium en de grootte van het getij(prisma) hebben hierbij een sterke interactie met elkaar. Bodemwrijving en andere bathymetrische en geometrische niet-lineaire effecten (bijvoorbeeld plaat-geul interacties) vervormen de getijgolf bij voorplanting in het estuarium (zie ook Bijlage A en paragraaf "Getij-asymmetrie"). Per locatie in het estuarium verschilt zowel de waterstandkromme als de snelheidskromme. Meestal is het getijdebiet bij de keel het grootst en neemt het debiet af in landwaartste richting, wat het estuarium de trechtervormige vorm geeft.

In een relatief lang getijdenbekken ten opzichte van de getijgolflengte (bekkenlengte tenminste enkele tientallen kilometers lang) heeft de getijgolf het karakter van een lopende golf, waarbij de waterstand en stroomsnelheid meer in fase zijn (het faseverschil is kleiner dan $\frac{1}{2}\pi$). Indien de golf niet geheel is uitgedempt door wrijving, kaatst een gedeelte van de golf terug en kan een vergroting van de getijslag worden veroorzaakt. De mate van vergroting van de getijslag hangt samen met de verhouding bekkenlengte – golflengte. Andere factoren die de getijslag kunnen vergroten zijn shoaling (als gevolg van afnemende diepte) en contractie (afnemende breedte).

Door de ruimtelijk sterk variërende bathymetrie is op vrijwel iedere locatie in het estuarium een residuele stroming aanwezig als gevolg van het getij (de M_0-component). Deze component is dan ook gevoelig voor de bathymetrie en geometrie van het estuarium. De residuele stroming kan ook worden beïnvloed door andere processen zoals rivierafvoer, dichtheidstromen of meteorologische factoren (paragraaf 2.4.1). In het algemeen zijn de volgende circulaire stromingen te onderscheiden:

- Bathymetrisch gerelateerde stromingen, vooral opgewekt door wrijving. In het algemeen geldt dat relatief diepe gedeeltes van een estuarium een residuele stroming in de ebrichting hebben en

relatief ondiepe delen een residuele stroming in de vloed richting. Een extreem voorbeeld hiervan is de vloedstroming op intergetijden gebieden. In geval van een systeem met meerdere geulen is de geul met ebgerichte residuele stroming over het algemeen dieper dan de geul met residuele stroming in de vloedrichting (Van Veen, 1950).
- Coriolis geeft de stroming een afwijking naar rechts waardoor binnen een geul een eb en een vloed gedomineerd gedeelte ontstaat.
- Horizontale en transversale circulatiestromen worden opgewekt bij geulbochten. De waterstand is aan de buitenkant van de bocht hoger waardoor een getijgemiddelde dwarscirculatie en langscirculatie ontstaat.

In Bijlage A staat beschreven welke niet-lineaire interacties verantwoordelijk zijn voor de opwekking van de M_0-component.

Residuele stromingen kunnen een belangrijke parameter zijn voor de morfologische ontwikkeling van een estuarium op verschillende schaalniveaus. (zie o.a. Van de Kreeke en Robaczewska, 1993; Jeuken en Wang, 2000; Hibma, 2004).

Getij-asymmetrie

In de praktijk is het getijverloop op een bepaalde locatie nooit sinusvormig, maar vervormd en asymmetrisch. Dit geldt zowel voor het verticale getij als voor het horizontale getij. Asymmetrie in het getij kan een getijgemiddeld residueel sedimenttransport veroorzaken. Doordat het sedimenttransport sterk gerelateerd is aan de stroomsnelheid, is vooral de horizontale getij-asymmetrie belangrijk. Maar het horizontale getij is weer gerelateerd aan het verticale getij, zoals volgt uit de continuïteitsvergelijking. Het verwachte effect van het residuele sedimenttransport als gevolg van getij-asymmetrie kan dus bepaald worden via een direct benadering (horizontaal getij) maar ook via een indirecte benadering (verticaal getij).

In literatuur wordt vaak gesproken van eb- en vloeddominantie in het verticale getij. In de praktijk ontbreken namelijk vaak metingen van de stroomsnelheid. Waterstandmetingen zijn meestal wel beschikbaar. De asymmetrie van het verticale getij wordt daarom vaak geanalyseerd om inzicht te krijgen in de eb- of vloeddominantie van estuaria. Hiervoor wordt de duur van de waterstanddaling (eb) en de duur van de waterstandstijging (vloed) vergeleken. De onderliggende gedachte is dat als dezelfde hoeveelheid water in een kortere periode afgevoerd moet worden, de stroomsnelheden over het algemeen hoger zullen liggen. Ebdominantie vindt plaats wanneer de dalingsduur korter is dan de rijzingsduur.

Bij voorkeur wordt de asymmetrie in het horizontale getij gebruikt, omdat het sedimenttransport voornamelijk hiermee samenhangt. Een vloeddominantie in het verticale getij hoeft namelijk niet per definitie gepaard te gaan met een vloeddominantie in het horizontale getij. Dit komt omdat de bergende breedte $b(x,\zeta)$ en het stroomvoerend oppervlak $A(\zeta)$ variëren met de waterstand (hypsometrisch effect). De relatie tussen het verticale en horizontaal getij hoeft dus niet lineair te zijn

Asymmetrie in het horizontale getij kan gemiddeld over een getijperiode een residueel sedimenttransport veroorzaken op twee manieren:

- Verschil in grootte van de maximale eb- en vloedsnelheden. Wanneer de maximale vloedsnelheid groter is dan de maximale ebsnelheid, dan is het getijgemiddelde vloedtransport waarschijnlijk groter dat het getijgemiddelde ebtransport. Dit komt doordat het sedimenttransport niet-lineair gerelateerd is aan de stroomsnelheid. (zie paragraaf 2.4.4). Een hogere stroomsnelheid zal een veel groter transport geven. Deze getij-asymmetrie is vooral van belang voor grof materiaal (bijv. zand).
- Verschil in verandering van de stroomsnelheid per tijdseenheid (du/dt) rond kentering na eb en na vloed. Dit is met name van belang voor fijn sediment. Wanneer de stroomsnelheid afneemt en kleiner wordt dan de kritische stroomsnelheid, duurt het even voordat een (fijn) sedimentdeeltje is uitgezakt (settling lag). De sedimentatie na vloed kan groter zijn dan de sedimentatie na eb, als de du/dt rond kentering na vloed kleiner is dan na eb. Een getijgemiddeld landwaarts transport kan hierdoor worden veroorzaakt. Grof sediment reageert directer op de momentane stroomsnelheid en dit proces geldt daarom minder voor grof sediment. Voor het fijne sediment speelt tevens een ander vertragingsproces een rol bij de getij-asymmetrie: de scour lag.

De geometrie/bathymetrie van een estuarium heeft invloed op de getij-asymmetrie, zowel verticaal als horizontaal. In het algemeen hebben de volgende geometrische en bathymetrische parameters invloed op de getij-asymmetrie; volgens Speer en Aubrey (1985) en Friedrichs en Aubrey (1988) voor korte, wrijvingsgedomineerde en goedgemengde estuaria:

- Gemiddelde diepte van het estuarium (h) in verhouding tot de getijamplitude (a); (a/h).
- Verhouding tussen het watervolume dat wordt geborgen op de platen (V_{pl}) en dat door de geulen stroomt (V_g) beneden GLW; (V_{pl}/ V_g).

Deze parameters zijn niet onafhankelijk van elkaar: een grotere geuldiepte gaat meestal gepaard met een groter geulvolume en beïnvloed zo het plaat/geulvolume.
Li en O'Donnell (1997) hebben geconcludeerd dat voor estuaria in het algemeen, ook de volgende parameters van invloed zijn op getij-asymmetrie:

- Lengte van het estuarium (in relatie tot de getijgolflengte).
- Verandering van de breedte langs het estuarium (in verhouding tot de getijgolflengte).
- Tijd dat een golf is uitgedempt door wrijving (in verhouding tot de getijperiode).

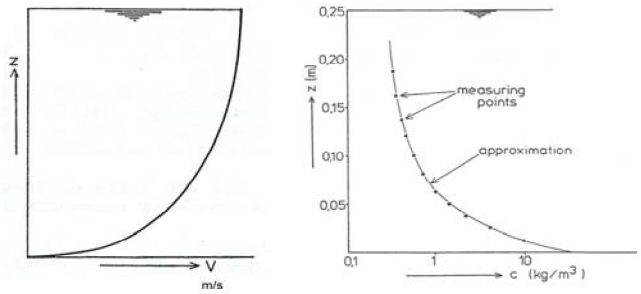
Daarnaast toont Dronkers (1986) aan dat ook intergetijdengebieden een belangrijk rol kunnen spelen bij getij-asymmetrie in een estuarium.

Het omgekeerde geldt ook: getij-asymmetrie beïnvloedt de geometrie/ bathymetrie van het estuarium. Twee onderdelen zijn daarbij van belang: de asymmetrie van de getijkromme bij de monding van het estuarium en de verdere vervorming van de getijkromme door voorplanting van het getij door het estuarium. Inzicht in andere factoren zoals wind en dichtheidsverschillen is hierbij ook belangrijk, omdat deze factoren ook invloed uitoefenen op de morfologie (paragraaf 2.4.1). Op verschillende schaalniveaus kan een bepaald proces dominant zijn voor de morfologie.

Getij componenten
In termen van harmonische componenten kan asymmetrie in het horizontale getij worden veroorzaakt door de M_0-component (residuele stroming) en door hogere en samengestelde harmonische componenten. De sterkte van de asymmetrie wordt beïnvloed door de amplitude verhouding tussen het M_2-getij en de overige harmonische componenten. De richting van de asymmetrie (ebdominantie of vloeddominantie) wordt beïnvloed door het faseverschil tussen de harmonischen en het M_2-getij.

2.4.4 Sedimenttransport

Algemeen
Indien de stroomsnelheid de kritische waarde overschrijdt, vindt sedimenttransport plaats. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen transport langs de bodem en in suspensie. Formulering van zowel bodem als suspensietransport is nog steeds erg empirisch. Er bestaan verschillende formuleringen van sedimenttransport als gevolg van stroming, golven en een combinatie van die processen; Van der Velden (2000) geeft een samenvatting. Het bodemtransport wordt vaak direct gerelateerd aan de lokale, instantane stroomsnelheid en evenredig beschouwd aan een 3^{de} tot 5^{de} macht van de stroomsnelheid (u^3 tot u^5). Het suspensietransport kan worden gezien als het product van de sedimentconcentratie en stroomsnelheid over de diepte (evenredig met u^1). De stroomsnelheid wordt beïnvloed door bodemwrijving over de gehele diepte. Bij de bodem zal de stroomsnelheid lager zijn dan hoger in de verticaal. Meestal wordt verondersteld dat de snelheidscurve een logaritmische profiel heeft (Figuur 2.4). De sedimentconcentraties daarentegen zijn hoger bij de bodem, doordat de stroming langs de bodem schraapt. Hoger in de verticaal zijn de sedimentconcentraties lager (Figuur 2.4). Verschillende concentratieverdelingen kunnen worden gebuikt, afhankelijk van de toegepaste methode (bijvoorbeeld Van Rijn-verdeling of Rouse/Einstein-verdeling).



Figuur 2.4 Logaritmische verdeling van de stroomsnelheid (V) in de verticaal door uniforme stroming (links) en een voorbeeld van een sedimentconcentratieverdeling (c) in de vertikaal (rechts)

Het suspensietransport hangt daarnaast ook af van bovenstroomse stromingscondities en condities eerder in de tijd. Dit komt door het relaxatie-effect. Dat betekent dat de sedimentconcentratie niet meteen zijn aangepast aan de werkelijke stroomsnelheid. Het transport van grof sediment (zoals zand) hangt sterk af van de lokale snelheid en past zich snel aan veranderingen van de stroomsnelheid. Fijn sediment (klei en slib) sedimenteert alleen bij zeer kleine snelheden en reageert niet direct op de stroomsnelheid. De tijd die een fijn sedimentdeeltje krijgt om te bezinken is belangrijk.

In het algemeen wordt het sedimenttransport vaak voorgesteld door $S \propto \alpha * u^n$. Een voorbeeld hiervan is de Engelund-Hansen formulering met n=5 (Vergelijking 2.5). De term α is dus een functie van de sediment- en stromingskarakteristieken en heeft in deze vergelijking de eenheid [s^4/m^3].

Vergelijking 2.5 Engelund-Hansen formulering

$$q_T = \frac{(\rho_s - \rho)^2 0{,}05}{\rho^2 \sqrt{g} D_{50} C^3} * u^5$$

Waarin;

q_T = totaal sedimenttransport per eenheid van breedte [m^2/s]
ρ = dichtheid van water [kg/m^3]
ρ_s = dichtheid van sediment [kg/m^3]
g = zwaartekracht versnelling [m/s^2]
D_{50} = gemiddelde korreldiameter [m]
C = Chezy coëfficiënt [$m^{0,5}/s$]
u = (dieptegemiddelde) stroomsnelheid [m/s]

Andere formuleringen zijn bijvoorbeeld de Meyer-Peter & Müller formulering (met n=5) en de Bagnold formulering (met n=3).

De kritische stroomsnelheid voor erosie kan worden beïnvloed door verschillende aanvullende factoren. Zo zal het sedimenttransport op een helling anders zijn dan op een horizontaal vlak, doordat sediment ook kan worden getransporteerd als gevolg van de zwaartekracht. Ook kunnen hellingen effect hebben op verschillen in de sedimentconcentratie in de verticaal bij eb en vloed, doordat opwaartse stroming in het algemeen grotere concentraties bij de bodem geeft dan neerwaartse stroming. Ook de samenstelling van de bodem (% fijn en grof sediment), aanwezigheid van organismen en de consolidatiegaad van de bodem kunnen invloed hebben op de hoogte van de kritische stroomsnelheid.

Residueel sedimenttransport als gevolg van getij-asymmetrie

Van der Kreeke en Robaczewska (1993) geven inzicht in de invloed van de horizontale getij-asymmetrie op het sedimenttransport. Zij richtten zich op het bodemtransport, waarbij het sedimenttransport gerelateerd is aan de lokale, instantane stroomsnelheid door de vorm u^n. Er is aangenomen dat het M_2-getij dominant is.

De lokale stroomsnelheid in de tijd (horizontaal getij) kan worden beschreven door middel van Vergelijking 2.6.

Vergelijking 2.6 Weergave lokale stroomsnelheid in de tijd

$$u(t) = u_0 + \hat{u}_2 \cos(\omega_2 t) + \sum_i \left(\hat{u}_i \cos(\omega_i t - \varphi_i)\right)$$

Waarin;

u = stroomsnelheid [m/s]
t = tijd [s]
u_0 = residuele stroming [m/s]
$\hat{u}_2$ = amplitude van de M_2-component [m/s]
ω_2 = hoekfrequentie van M_2-getij [s^{-1}]
$\hat{u}_i$ = amplitude van een andere getij component [m/s]
ω_i = hoekfrequentie van andere getijcomponent [s^{-1}]
φ_i = fase van een andere getijcomponent [rad]

In de analyse zijn de componenten S_2, N_2, MS_4, K_1 naast de componenten M_0, M_2, M_4 en M_6 gebruikt. Wanneer het sedimenttransport wordt benaderd door $S = \alpha \cdot u^n$ met n=3 (zoals met Bagnold), dan is het dimensieloze, getijgemiddelde sedimenttransport op de lange termijn zoals Vergelijking 2.7.

Vergelijking 2.7 Getijgemiddeld sedimenttransport op de lange termijn met u³

Volgens Van der Kreeke en Robaczewska (1993).

$$\frac{\overline{S}}{\alpha \cdot \hat{u}_2^3} = \frac{3}{2}\frac{u_0}{\hat{u}_2} + \frac{3}{4}\frac{\hat{u}_4}{\hat{u}_2}\cos\varphi_4 + \frac{3}{2}\frac{\hat{u}_4}{\hat{u}_2}\frac{\hat{u}_6}{\hat{u}_2}\cos(\varphi_4 - \varphi_6)$$

Waarin;

S = sedimenttransport per eenheid van breedte [m^2/s]
α = functie van sediment- en stromingskarakteristieken [s^2/m]
u_0, $\hat{u}_2$, $\hat{u}_4$, $\hat{u}_6$ = amplitude van respectievelijk de M_0, M_2, M_4 en M_6-component [m]
φ_4, φ_6 = relatieve faseverschil tussen de M_2-component en respectievelijk de M_4- en M_6-component [-]

Voor n=5 wordt het dimensieloze, getijgemiddelde sedimenttransport op de lange termijn weergegeven volgens Vergelijking 2.8.

Vergelijking 2.8 Getijgemiddeld sedimenttransport op de lange termijn met u⁵

Alleen de eerste orde termen zijn gegeven volgens Van der Kreeke en Robaczewska (1993).

$$\frac{\overline{S}}{\beta \cdot \hat{u}_2^5} = \frac{15}{8}\frac{u_0}{\hat{u}_2} + \frac{5}{4}\frac{\hat{u}_4}{\hat{u}_2}\cos\varphi_4$$

Waarin;

β = functie van sediment- en stromingskarakteristieken [s^4/m^3]

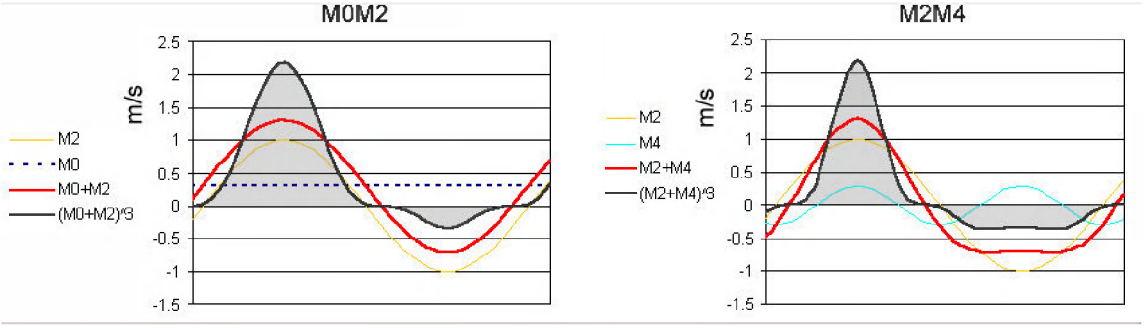
Het sedimenttransport als gevolg van de overige componenten fluctueert met een frequentie die een veelvoud is van de frequentie van het M_2-getij, zodat de transporten op de lange termijn (minimaal 1 maand) worden uitgemiddeld. Het gemiddelde sedimenttransport op de lange termijn hangt alleen af van de residuele stromingscomponent M_0, het M_2-getij en de boven harmonischen (M_4, M_6, etc).

Het gemiddelde, lange-termijn sedimenttransport volgens Vergelijking 2.7 en Vergelijking 2.8 kan worden onderverdeeld in een aantal bijdragen:

- Sedimenttransport als gevolg van de interactie tussen de residuele stroming (M_0) en het M_2-getij.
- Sedimenttransport als gevolg van de interactie tussen het M_2-getij en de hogere harmonische componenten M_4 en M_6 (M_2M_4-interactie en $M_2M_4M_6$-interactie). Niet alleen de amplitude van de hogere harmonische componenten is bepalend voor het residuele sedimenttransport, maar ook het relatieve faseverschil tussen de M_2 en hogere componenten.

In Figuur 2.5 is geïllustreerd hoe de M_0M_2-interactie (links) en de M_2M_4 interactie (rechts) een residueel sedimenttransport kunnen veroorzaken. Het residuele sedimenttransport wordt aangegeven door het gearceerde gebied. In het voorbeeld wordt het totale transport bij de machtsverheffing met n=3 in de vloedrichting (positief) groter dan in ebrichting (negatief).

Figuur 2.5 Getijgemiddeld residueel sedimenttransport a.g.v de M_0M_2-interactie (links) en de M_2M_4-interactie (rechts)



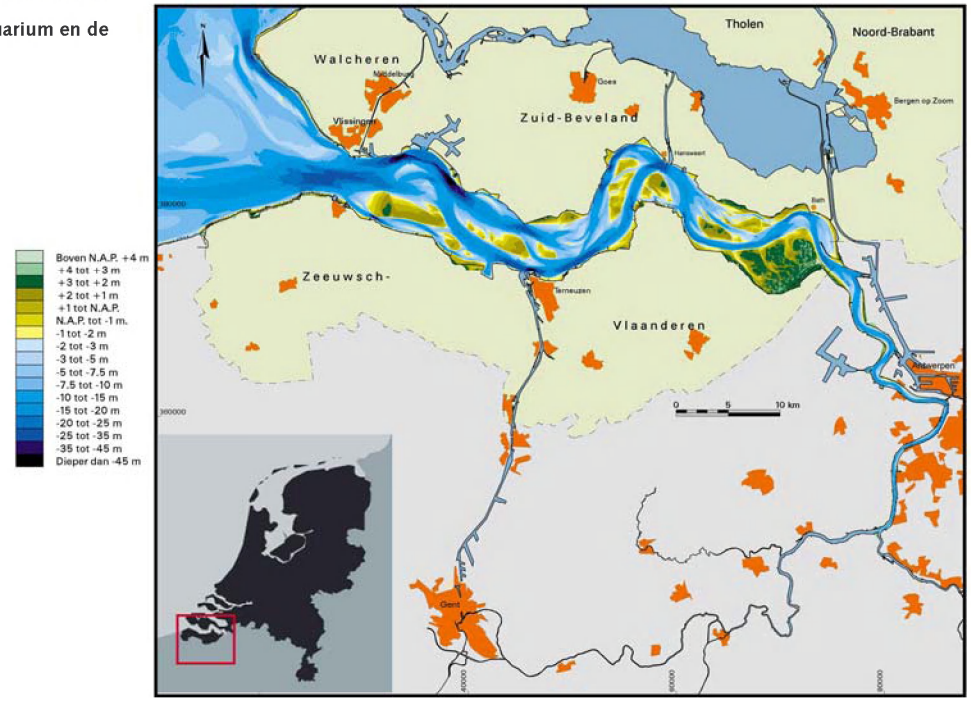
2.5 Ecologie

Veel verschillende organismen komen voor in estuaria om gebruik te maken van het relatief kalme milieu en van de voedingsrijke omgeving. De verschillende morfologische elementen (geulen, platen, slikken, etc) in het estuarium fungeren als voedselbron, verblijfplaats, broedplaats, rui- en rustplaats. Estuaria vormen dan ook een erg belangrijk element in de ecologische structuur van de kustzone. Veel soorten organismen (bacteriën, plankton, larven, garnalen, bodemdieren, vissen, zeehonden) worden meegevoerd of trekken door de geulen. Ondiepwatergebieden zijn essentieel als opgroeigebied voor jonge vis, ze leveren het voedsel voor vissen en zeehonden. Platen en slikken fungeren als verblijf- en vestigingsplaats van bodemdieren. Slikken en schorren zijn een verblijfplaats voor brak-, zout- en zoetwater-getijdeplanten. Vogels, jonge vis en dieren die op en in de bodem leven zijn voor hun voedselvoorziening van platen en slikken afhankelijk. Tevens worden platen en slikken door zeezoogdieren gebruikt om te rusten en te zogen en hebben ze een ruifunctie en rustfunctie voor vogels. Met name de intergetijdengebieden, schorgebieden en ondiep water zijn zeer belangrijk voor het ecologisch optimaal kunnen functioneren van het estuarium. Degeneratie van deze gebieden kan betekenen dat veel soorten organismen verdwijnen.

3 Studiegebied: de Westerschelde

3.1 Topografie Schelde-estuarium en Westerschelde

De rivier de Schelde ontspringt in het noorden van Frankrijk en mondt uit in de Noordzee na ongeveer 350 kilometer via het westen van België en zuidwest Nederland. Het stroomgebied van de Schelde heeft een oppervlak van ongeveer 22.000 km^2 (van Eck, 1999). De invloed van het getij is merkbaar tot aan de stuwen bij Gent toe. Dit gedeelte, met een totale lengte van ongeveer 160 km, wordt het Schelde-estuarium genoemd (Figuur 3.1). Het estuarium kan worden onderscheiden in twee gedeeltes. Het gedeelte van Gent tot aan de grens tussen Nederland en België, bestaat uit 1 geul en heet de Zeeschelde. Vanaf de Nederlands-Belgische grens bestaat het estuarium uit een systeem van meerdere geulen en platen. Dit gedeelte met een lengte van ongeveer 60 kilometer en een totaal oppervlak van ongeveer 370 km^2 wordt de Westerschelde genoemd. Het is het meest zuidelijke zeegat van zuidwest Nederland en ligt tussen Walcheren/Zuid Beverland en Zeeuws Vlaanderen. Ten westen van Vlissingen loopt het bekkengebied over in de buitendelta. Dit onderzoek is gericht op de Westerschelde.



Figuur 3.1 Het Schelde-estuarium en de Westerschelde

3.2 Ontstaan Westerschelde

Het Schelde estuarium is een relatief jong systeem, dat rond de negende eeuw is ontstaan. Vanaf het begin van de Middeleeuwen breidde een zeegat (de Honte) zich steeds verder uit in oostelijke richting door relatieve

zeespiegelstijging en stormvloeden (Van der Berg e.a., 1996; Van der Spek, 1994). De Schelde voerde in die tijd het rivierwater af via de Oosterschelde. Uiteindelijk verbond de Honte zich met de Schelde en kreeg de rivier een tweede riviermonding: de Westerschelde. In de loop der eeuwen werd de afvoer via de Westerschelde steeds belangrijker en groter. In de 14e eeuw was de Westerschelde zelfs zover uitgediept door natuurlijke processen, dat de riviermonding als toegangsgeul kon dienen voor de Antwerpse haven. Het bekken had zijn maximale grootte in de 17e eeuw. De Westerschelde bestond toendertijd uit vele getijdengeulen en uitgestrekte schorgebieden die zorgden voor een groot kombergingsoppervlak. De Westerschelde stond in verbinding met de Oosterschelde via het Sloe en het Kreekrak. In de opvolgende eeuwen heeft de mens een groot deel van de morfologische ontwikkeling in de Westerschelde bepaald. Vertakking die door natuurlijke processen dichtslibden werden ingepolderd, inclusief de verbindingen met de Oosterschelde. Sinds de 17e eeuw is het bekkenoppervlak met meer dan 40% gereduceerd. Inpolderingen en bedijking voorkwamen verdere meandering van de geulen en bepaalden daarmee grotendeels de huidige vorm van de Westerschelde.

3.3 Functies Schelde-estuarium

Het Schelde estuarium voorziet in vele functies voor zowel België als Nederland. Allereerst heeft het gebied een hoge *natuurlijke* waarde doordat veel verschillende organismen voorkomen in de Westerschelde. Met name de intergetijdengebieden, schorren en ondiep watergebieden spelen hiervoor een essentiële rol. Tevens fungeert het estuarium als *toegang* voor de Schelde-havens (Vlissingen, Terneuzen, Antwerpen en Gent), waarbij de haven van Antwerpen het grootst is. Antwerpen ontvangt dan ook (container)schepen met een grote diepgang. Voor Antwerpen is het van economische belang dat de steeds groter wordende schepen toegang kunnen krijgen tot de haven, liefst onafhankelijk van het getij. De derde functie van het estuarium is de *veiligheid* van de omringende gebieden in Nederland en Vlaanderen. Hier gaat het met name om beheer van de waterkeringen. Daarnaast voorziet het estuarium ook in functies als recreatie, visserij, landbouw en winning van zand.

De eerste drie genoemde functies (natuurlijkheid, toegankelijkheid en veiligheid) zijn door de Nederlandse en Vlaamse overheid aangewezen als de geprioriteerde functies voor toekomstig beleid (RWS en MVG, 2001). Om deze functies in de toekomst te kunnen waarborgen is een streefbeeld voor het jaar 2030 opgesteld. Voor de Westerschelde betekent dit dat de instandhouding van de fysieke systeemkenmerken van het estuarium uitgangspunt moet zijn voor beleid en beheer (RWS en MVG, 2001). De fysieke systeemkenmerken kunnen als volgt worden gespecificeerd:

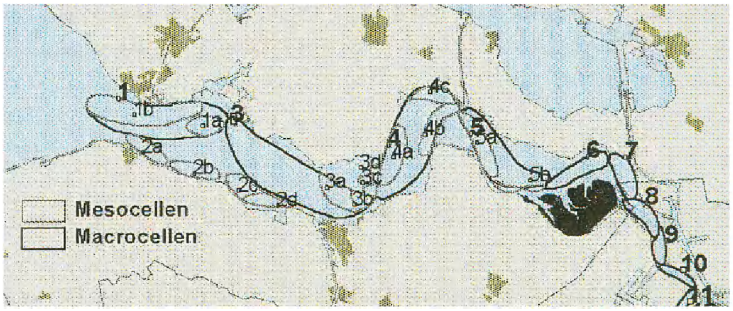
- Een open en natuurlijk mondingsgebied
- Een systeem van hoofd- en nevengeulen met tussenliggende platen en ondiepwatergebieden.
- Grote diversiteit van schorren, slikken, platen in zout, brak en zoet gebied, gecombineerd met natuurvriendelijke oevers.

3.4 Morfologie Westerschelde

3.4.1 Huidige situatie

Het huidige Schelde-estuarium is een trechtervormig gebied, waarbij breedte en de gemiddelde diepte afnemen in stroomopwaartse richting. De breedte reduceert van ongeveer 6 kilometer bij de monding tot 2 à 3 kilometer bij Bath en verder tot 100 meter bij Gent. De diepte, gemiddeld over de breedte, is ongeveer 15 meter bij Vlissingen en neemt af tot ongeveer 3 meter bij Gent (Jeuken, 2000).

De Westerschelde bestaat bij benadering uit een regelmatig patroon van eb- en vloedgeulen (Figuur 3.1). De ebgeulen meanderen tussen de zijdelingse begrenzingen van het gebied (de dijken) vanaf de Belgische grens tot aan de keel. De locatie van de ebgeulen ligt grotendeels vast. De vloedgeulen lopen vanaf de bocht in de ebgeul in landwaartse richting. De ebgeulen zijn over het algemeen dieper dan de vloedgeulen. Drempels zijn gevormd aan de zeewaartse en landwaartse zijde van respectievelijk de eb- en vloedgeulen. De meeste eb- en vloedgeulen zijn van elkaar gescheiden door een langgerekte plaat. Op sommige platen zijn kortsluitgeulen aanwezig. De Westerschelde kan worden geschematiseerd tot een aaneenschakeling van zes morfologische cellen (Figuur 3.2 volgens Winterwerp e.a., 2000). Een cel bestaat uit een (grote) eb- en vloedgeul met een tussenliggende plaat, indien aanwezig. De cellen worden ook wel macrocellen genoemd op basis van de tijd- en ruimteschaal waarop processen zich afspelen. Daarnaast zijn ook mesocellen te onderscheiden (paragraaf 2.3.2). In deze cellen zijn processen aanwezig zoals het ontstaan of migratie van kortsluitgeulen, sedimenttransporten op platen, plaat-geul interacties, etc.



Figuur 3.2 Macrocellen en mesocellen in de Westerschelde

3.4.2 Menselijke ingrepen in de laatste 50 jaar

De inpolderingen in het verleden hebben de morfologische ontwikkeling van het estuarium voor een groot deel beïnvloed, maar ook de laatste decennia heeft de mens veranderingen in de morfologie veroorzaakt. Het betreft de volgende werkzaamheden:

- Baggeren
  Op drempels in de Westerschelde wordt gebaggerd om de Antwerpse haven toegankelijk te houden voor grote schepen. Tegenwoordig wordt jaarlijks ongeveer $10*10^6$ m^3 op de drempels uitgebaggerd in de hoofdvaarroute (welke voornamelijk de ebgeul volgt, zie Figuur 3.3 en Bijlage B). De geul wordt gebaggerd op basis van 48'/43'/38' voet. Dit betekent dat schepen met een maximale diepgang van 48 voet in één

getij naar Antwerpen kunnen varen, schepen met een diepgang van 43 voet in één getij van Antwerpen naar zee kunnen varen en schepen met een maximale diepgang van 38 voet onafhankelijk van het getij kunnen varen op de Westerschelde. Twee grootschalige projecten hebben in het verleden plaatsgevonden om de geuldiepte te verlagen. In periode 1970-1974 werden de geulen verruimd op basis van 44'/40'/34' voet en in de periode 1997/1998 op de huidige basis. Begin 2005 is zelfs bepaald dat in 2007 moet worden begonnen met een derde vaarwegverruiming (NRC, 2005). Jaarlijks onderhoudsbaggerwerk zorgt voor het op peil houden van de geuldiepte. In het oosten is de geuldiepte gemiddeld kleiner, waardoor grotere hoeveelheden sediment in het oosten moeten worden uitgebaggerd (Bijlage B). Door de tweede verruiming werden de drempels met ongeveer 1,5 meter verlaagd van ongeveer 14,5 m tot 16,0 m beneden NAP. De jaarlijkse baggerhoeveelheden zijn hierdoor toegenomen. In het westen moet sinds de tweede verruiming ook op drempels worden gebaggerd om te voldoen aan de vereiste diepte.

- Storten
  Het gebaggerde sediment wordt elders in het estuarium teruggestort wegens financiële redenen (dichtbij storten is goedkoop) en om de totale hoeveelheid sediment in het gebied constant te houden (Figuur 3.3). Vóór de tweede verdieping in 1997/1998 werd het meeste sediment vlakbij de uitgebaggerde geulen gestort. Dit betekende dat stortingen voornamelijk in het oosten werden gedaan, omdat hier de meeste baggerwerkzaamheden werden verricht (Bijlage B). Het gevolg was dat de nevengeulen in het oosten dreigden dicht te slibben.. Sinds 1997 wordt daarom meer in het westen gestort (Bijlage B).

- Zandwinning
  Jaarlijks wordt maximaal $2,6*10^6$ m^3 aan zand gewonnen in de Westerschelde (RWS Zeeland, 2000). De zandwinning is gebaseerd op "evenwicht in de zandhuishouding van het systeem", dit betekent dat het gewonnen zand weer gecompenseerd moet worden door 'natuurlijke' aanvoer. Tegenwoordig wordt zandonttrekking toegelaten op basis van de veronderstelling dat de tweede verruiming een sedimentoverschot heeft veroorzaakt (RWS, Zeeland, 2000; Roelse en Arends, 2000). Het overschot wordt op kustmatige wijze door zandwinning onttrokken. Het grootste deel van het gewonnen zand wordt gebruikt als ophoogzand. Het huidige zandwinbeleid is geldig tot 2011, maar in 2006 vindt er een tussenevaluatie plaats waardoor bijsturing van het huidige beleid mogelijk is. De zandwinlocaties zijn weergegeven in Figuur 3.3 en de hoeveelheden in Bijlage B.



Figuur 3.3 Bagger-, stort- en zandwinlocaties tussen 1955-2000 in de Westerschelde

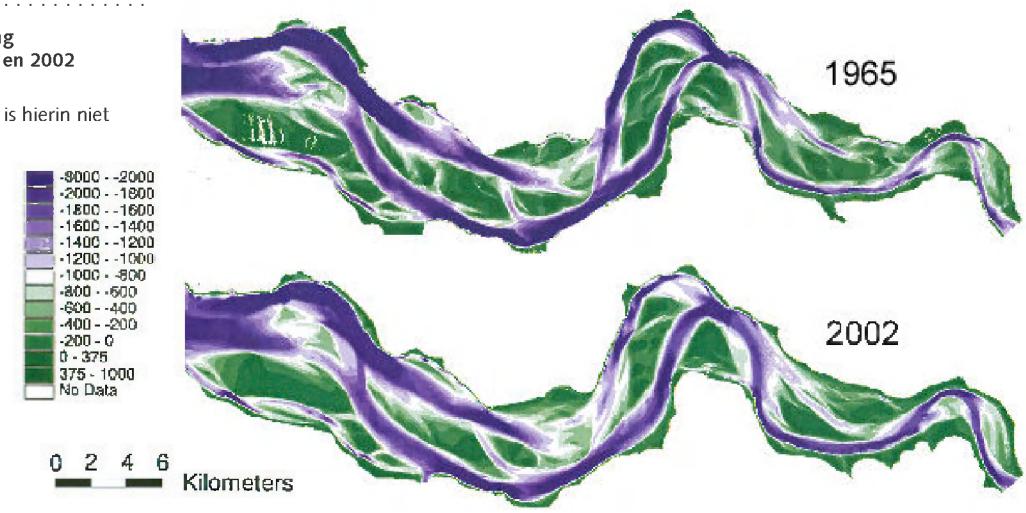
- Geulwandbescherming
  De uitbochting van geulen kan gevaar opleveren voor de waterkeringen langs het estuarium en afbraak van slikken en schorren veroorzaken. Hiervoor zijn geulwandverdedigingen aangelegd langs het Gat van Ossenisse, het Zuidergat, in het Nauw van Bath en noordoostwaarts van het Land van Saeftinge. De eerste verdedigingen zijn tijdens de eerste geulverdieping aangelegd. Gedurende de tweede geulverruiming is het aantal uitgebreid.

3.4.3 Ontwikkeling morfologische cellen

De morfologische veranderingen die de laatste decennia zijn waar te nemen spelen zich af op meso- en macro-schaal. Het betreft veranderingen zoals de migratie, dichtslibbing en ontstaan van hoofd-, neven- en kortsluitgeulen (Figuur 3.4). De menselijke ingrepen uit de vorige paragraaf hebben een grote invloed gehad op deze veranderingen. De ebgeul in het oostelijk deel is duidelijk verdiept als gevolg van de verruimingswerkzaamheden. In het middendeel van het estuarium is de ebgeul (het Middelgat) aangezand, deels als gevolg van natuurlijke processen en deels als gevolg van stortingen door de mens. De ebstroming gaat nu voor een groot deel door de vloedgeul, welke dan ook sterk is verbreed. In het algemeen zijn een aantal geulen op meso-schaal (zoals geulen door platen) verdwenen. Het estuarium lijkt meer te zijn "gestroomlijnd".

Figuur 3.4 Bodemligging Westerschelde in 1965 en 2002

Het Land van Saeftinge is hierin niet weergegeven.



De zandhuishouding van de Westerschelde kan in kaart worden gebracht met behulp van lodingsgegevens. Hiermee kunnen de veranderingen en ontwikkelingen van zandvolume in de Westerschelde worden berekend. De veranderingen in het zandvolume (bijvoorbeeld erosie of sedimentatie) kunnen worden gecorrigeerd voor menselijke ingrepen, zodat als het ware de "natuurlijke" volumeontwikkeling bepaald kan worden. In het volgende hoofdstuk wordt hier uitgebreid op in gegaan, omdat dit een cruciaal onderdeel is van dit onderzoek.

3.4.4 Sediment

Op de meeste plaatsen bestaat de bodem uit medium tot fijn zand. Binnen het estuarium zijn duidelijke verschillen in sediment waarneembaar tussen de diverse morfologische elementen. De geulen bevatten over het algemeen grover sediment dan de platen. Slikken en schorren bestaan uit nog fijner sediment. De karakteristieke waarden van de gemiddelde korreldiameter D_{50} zijn gegeven in Van Eck (1999):

- Geulen: >150µm (voornamelijk (fijn) zand)
- Platen: 50-150µm (fijn zand)
- Slikken/schorren: <125µm (klei en slib)

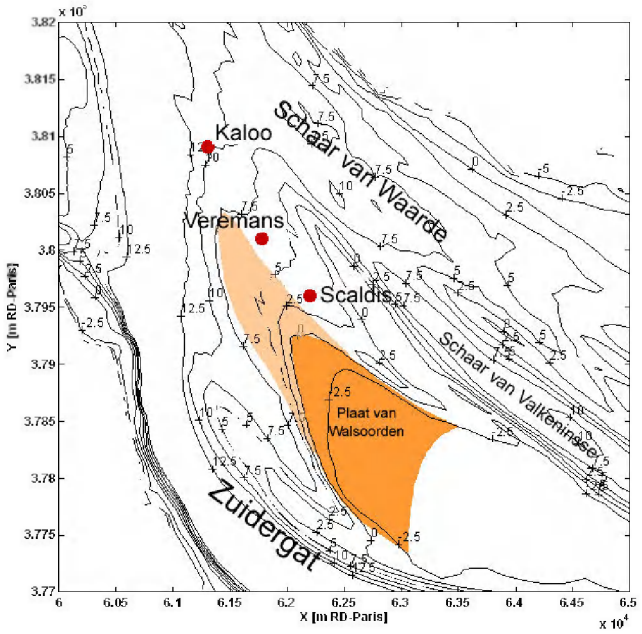
Zie ook Bijlage C.

Van west naar oost is een duidelijke gradiënt waarneembaar. In het westen van het estuarium (benedenstrooms) is het sediment over het algemeen grover dan in het oosten (bovenstrooms). Het slibgehalte en korreldiameter nemen substantieel toe respectievelijk af in bovenstroomse richting vanaf Bath.

3.4.5 Sedimenttransport

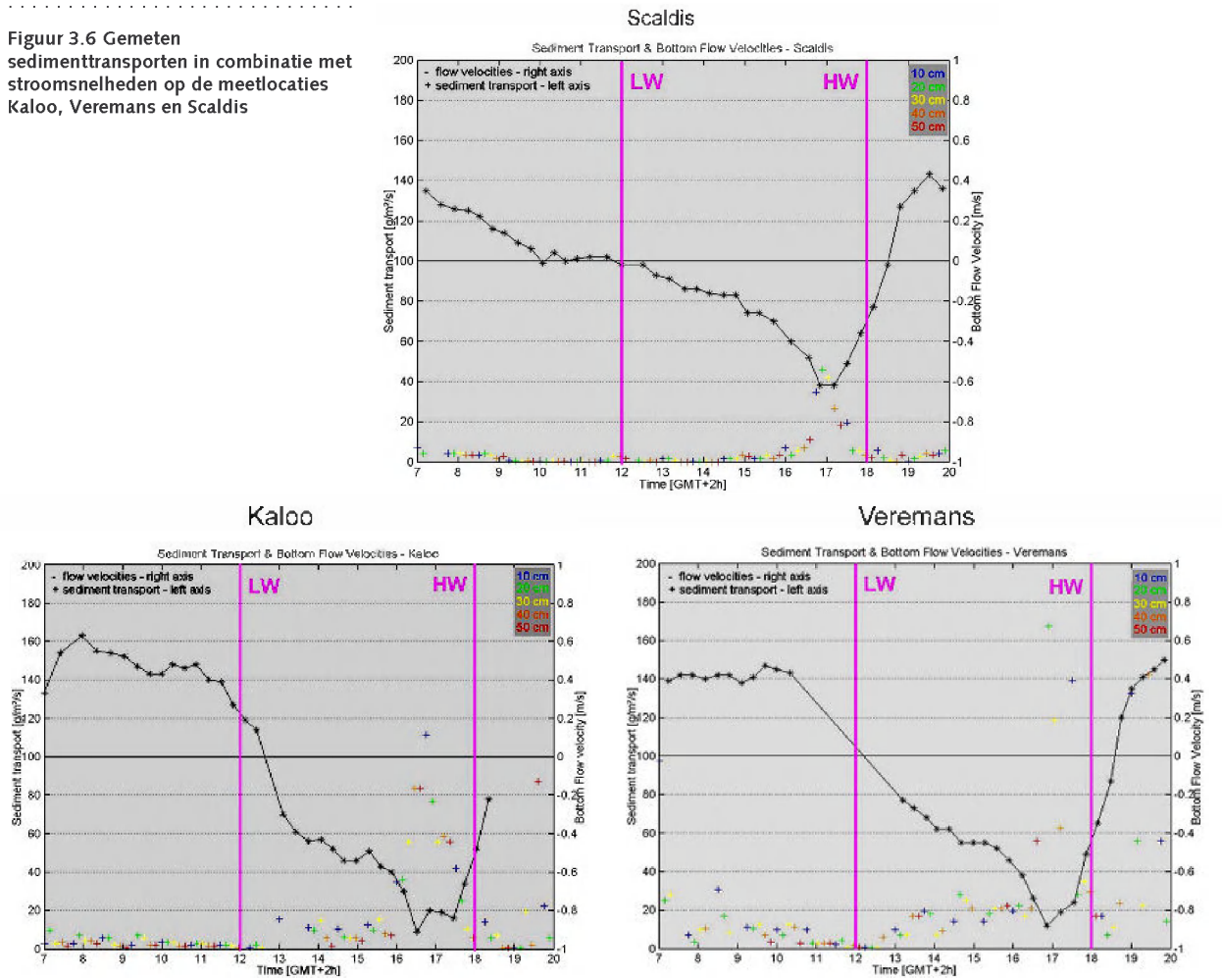
Metingen

In 2003 zijn metingen uitgevoerd, waarbij het sedimenttransport in combinatie met de stroomsnelheid bij de bodem is gemeten door middel van ASTM (Acoustic Sand Transport Meter) en DB12 (Delft Bottle; 1 in suspensie, 2 vlakbij de bodem). Op drie locaties zijn de metingen uitgevoerd, allemaal in macrocel 5 van de Westerschelde bij de platen van Walsoorden (Figuur 3.5).



Figuur 3.5 Meetlocaties in macrocel 5 (zie Figuur 3.2) waar metingen zijn uitgevoerd bij de bodem van het sedimenttransport in combinatie met de stroomsnelheid

Het transport is gemeten op verschillende hoogtes, op 0,1 m; 0,2 m; 0,3 m; 0,4 m en 0,5 m ten opzichte van de bodem. De resultaten van de metingen zijn gegeven in Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Gemeten sedimenttransporten in combinatie met stroomsnelheden op de meetlocaties Kaloo, Veremans en Scaldis

De gemeten sedimenttransporten (in $g/m^2/s$) die optreden bij een stroomsnelheden van 0,2 m/s, 0,4 m/s, 0,6 m/s en 0,8 m/s of hoger zijn geschat d.m.v. de grafieken en samengevat in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Sedimenttransporten [in $g/m^2/s$] gemeten bij bepaalde bodemstroomsnelheden op meetlocaties Kaloo, Veremans en Scaldis

	0,2 m/s	0,4 m/s	0,6 m/s	0,8 m/s of > 0,8 m/s
Scaldis	0	10	30-45	
Kaloo	0	10	20	60-100
Veremans	0	10-30	20-40	60-170

Bij 0,2 m/s vindt geen of nauwelijks sedimenttransport plaats. De kritische stroomsnelheid ligt dus ergens tussen 0,2 en 0,4 m/s. Bij een stroomsnelheid van 0,4 m/s treedt transport van sediment op tussen 10 en 30 $g/m^3/s$. Bij 0,6 m/s is dat 20 tot 40 $g/m^3/s$. En bij stroomsnelheden van 0,8 m/s of hoger zijn sedimenttransporten gemeten tussen 60 en 170 $g/m^3/s$.

Residueel sedimenttransport

In de Westerschelde kan het sedimenttransport op verschillende tijd- en ruimteschalen worden beschouwd. Het residuele stroomveld wordt gedomineerd door circulaire stromingen op de schaal van eb- en vloedgeulen (macro-schaal). Het sedimenttransport gerelateerd aan deze

circulaire stromingen heeft, naast het geïntegreerde transport over de gehele breedte, invloed op de morfologische ontwikkeling van het estuarium.

Het lokale transport kan op de volgende tijdschalen worden gedefinieerd:

- Eb- en vloedtransport: integratie van het instantane sedimenttransport (s) over respectievelijk de eb- en vloedperiode (T_{eb} en T_{vloed}):

$$st_{eb} = \int_{T_{eb}} sdt \text{ en } st_{vloed} = \int_{T_{vloed}} sdt$$

- Residueel transport: integratie van het instantane sedimenttransport (s) over de gehele getijperiode (T):

$$st_{totaal} = \int_{0}^{T} sdt = st_{eb} + st_{vloed}$$

Wanneer het *lokale* residuele sedimenttransport wordt beschouwd (st_{totaal}), kan het sedimenttransport worden gedefinieerd op de volgende ruimteschalen:

- Transport over eb- en vloedgeul: residueel transport (st_{totaal}) geïntegreerd over de breedte van de eb- en vloedgeul (B_{eb} en B_{vloed}). Dit transport is voornamelijk van invloed op de morfologische ontwikkeling op *macro-schaal*:

$$S_{eb} = \int_{B_{eb}} st_{totaal} dy \text{ en } S_{vloed} = \int_{B_{vloed}} st_{totaal} dy$$

- Totaal residueel transport (ook wel netto sedimenttransport): integratie van residueel transport (st_{totaal}) over gehele breedte van het estuarium (B_{tot}). Dit transport is van invloed op de morfologische ontwikkeling op *mega-schaal*:

$$S_{netto} = \int_{B_{tot}} st_{totaal} dy = S_{eb} + S_{vloed}$$

- Bruto sedimenttransport: de som van absolute waarden van het eb- en vloedtransport (st_{eb} en st_{vloed}) geïntegreerd over gehele breedte van estuarium (B_{tot}):

$$S_{bruto} = \int_{B_{tot}} (|st_{eb}| + |st_{vloed}|) dy$$

Op de lange termijn kan het residuele sedimenttransport op verschillende ruimteschalen (lokaal, in eb- of vloedgeul of over totale breedte) bepaald worden door de M_0M_2-interactie en/of door de interactie tussen het M_2-getij en de hogere harmonische componenten (Van der Kreeke en Robaczweska, 1993).

Relatie getij-asymmetrie en morfologie

In de studie van Wang e.a. (2002) is de relatie tussen de verticale getij-asymmetrie en morfologie onderzocht met behulp van bodem- en waterstandmetingen. Wanneer de bodemontwikkeling van drie deelgebieden in de Westerschelde (west, midden en oost) wordt vergeleken met veranderingen in de M_2M_4-interactie sinds 1955, komen de bevindingen kwalitatief overeen met de waarnemingen van Friedrichs en Aubrey (1988) en Speer e.a. (1991). Dit geldt met name voor de parameterverhouding getijamplitude-diepte (a/h). Dit betekent dat de

ondiepe(re) gebieden in het bekken meer vloeddominant zijn en diepe(re) delen meer ebdominant op basis van het verticale getij.

In Jeuken en Wang (2000) is de relatie tussen de horizontale getij-asymmetrie en het residuele sedimenttransport onderzocht door snelheidsmetingen en 1D en 2DH modelberekeningen te analyseren. Uit dit onderzoek blijkt dat het residuele stromingsveld een belangrijke rol kan spelen bij de morfologische ontwikkeling op macro- en megaschaal. In de bevindingen is het sedimenttransport als gevolg van de M_0M_2-interactie van invloed op zowel de circulaire transporten (transport in eb- en vloedgeul S_{eb} en S_{vloed}) als op het totale residuele transport (S_{netto}) . De residuele stromingen zijn met name geometrisch en bathymetrisch gerelateerd. Menselijke ingrepen zoals baggeren, storten en zandwinning kunnen derhalve van invloed zijn op de morfologische ontwikkeling op zowel macro- als megaschaal. De M_2M_4- interactie en $M_2M_4M_6$-interactie blijken van invloed te zijn op het totale residuele transport (S_{netto}) en spelen daarom mogelijk een rol bij de morfologische ontwikkeling op mega-schaal.

3.5 Hydrodynamica

3.5.1 Getij

In het Schelde-estuarium overheerst het dubbeldaags getij met een gemiddelde periode van 12 uur en 25 minuten. De getijgolf is gedeeltelijk een lopende golf en deels een gereflecteerde golf. In 2 uur plant de golf zich voort van Vlissingen tot aan Antwerpen. De voortplantingssnelheid is in de loop der tijd toegenomen. Het hoogwater bereikt tegenwoordig Antwerpen 40 minuten sneller dan 100 jaar geleden (Vroon e.a., 1997). Het verticale getij loopt ongeveer 2,5 uur achter op het horizontale getij. De maximale vloedstroom treedt daardoor op bij een gemiddeld hogere waterstand dan de maximale ebstroom.

Het verloop van de waterstanden wordt bijna volledig bepaald door de binnenkomende getijgolf. Het getijverschil neemt toe in het estuarium van 3,9 meter bij Vlissingen tot 5,2 meter bij Antwerpen en verder tot 5,5 meter bij Rupelmonde als gevolg van resonantie effecten, shoaling en contractie. De Westerschelde is daardoor te classificeren als een meso- en macrogetijdebekken. Verder stroomopwaarts neemt de getijslag af tot 1,9 meter bij Gent. De getijslag is sinds de 17^e eeuw sterk vergroot door de reductie van het kombergingsoppervlak (Van den Berg e.a., 1996). Waarnemingen laten ook zien dat de gemiddelde hoogwaters bij Bath in de laatste decennia zijn verhoogd door de geulverruimingen. De gemiddelde getijslag is gestegen van ongeveer 4,6 meter in 1965 tot ongeveer 4,9 meter in 2000 (Stikvoort e.a., 2003). In het westen hebben de verruimingswerkzaamheden nauwelijks invloed gehad op de getijslag. Waarneembare variaties in de getijslag van 0,1 tot 0,2 meter bij Vlissingen worden veroorzaakt door de 18,6 jarige cyclus (van Eck, 1999). Zeespiegelrijzing heeft daarnaast gezorgd voor een lichte toename van de getijslag in de orde van 5 tot 10 cm in de laatste 50 jaar (Vroon e.a., 1997 en Stikvoort e.a., 2003). In het hele estuarium is de dalingsduur langer dan de rijzingsduur. Het verschil neemt in stroomopwaartse richting toe. In Vlissingen is de ebduur (dalende waterstand) een half uur korter dan de

vloedduur (stijgende waterstand). In Antwerpen is het verschil tussen eb- en vloedduur bijna twee uur.

Het getijprisma is bij Vlissingen circa $2*10^9$ m^3 (Vroon e.a., 1997). Het getijvolume neemt af in oostwaartse richting. Bij de grens is het getijprisma ruim $0,2*10^9$ m^3/getij en bij Antwerpen $0,1*10^9$ m^3/getij. De sterke afname van de komberging sinds de 17e eeuw heeft niet geresulteerd in een afname van het getijprisma. Dit komt doordat de getijslag en voortplantingssnelheid ook zijn toegenomen (Van den Berg e.a., 1996).

De maximale stroomsnelheden treden voornamelijk op in de geulen en zijn in de orde van 1,0 - 1,5 m/s.

3.5.2 Rivierafvoer

De Schelde is een regenrivier en de afvoer varieert sterk met het seizoen en per jaar. De gemiddelde rivierafvoer bedraagt ongeveer $5*10^6$ m^3 per getij, ofwel 110 m^3/s (Van Eck, 1999). Dit is minder dan 1% van het getijdebiet. De bijdrage van de rivierafvoer is daarom marginaal en het getij domineert de stromingen in de Westerschelde. De bijdrage van de rivierafvoer neemt relatief toe in oostwaartse richting.

3.5.3 Zoutgradient

Het zoutgehalte verloopt van ongeveer 10‰ bij de grens met België tot ongeveer 30 ‰ bij de haven van Vlissingen (Holland en Smit, 1994). In het mondingsgebied is het zoutgehalte tussen de 30 en 32‰ (RWS DNZ, 2004) en loopt in westwaartse richting verder op. Rond de Belgische grens is het zoetwatergehalte gemiddeld 75%. Bij Hansweert is dit al minder dan de helft en bij Vlissingen is dat nog maar 10% (Van Eck, 1999). De Westerschelde is voor een groot deel een goed gemengd systeem (tot aan Bath), het overige deel is gedeeltelijk gemengd. Sterke dichtheidsstromen komen in de Westerschelde niet voor.

4 Zandbalans

4.1 Inleiding

Een zandbalans geeft de zandhuishouding van een gebied weer, in dit geval de Westerschelde. Sinds 1800 zijn bodemmetingen uitgevoerd in de Westerschelde en aan de hand hiervan is de morfologische ontwikkeling in kaart gebracht. Eigenlijk hoort dit hoofdstuk dus in het vorige hoofdstuk thuis, onder paragraaf Morfologie (3.4). Maar omdat de zandbalans een belangrijk onderdeel is van dit onderzoek wordt het apart behandeld.

Allereerst zal een beschrijving worden gegeven van de zandbalans (paragraaf 4.2) Hierin wordt uitgelegd wat een zandbalans precies is en hoe wordt het berekend. De uitkomsten van de zandbalans van de Westerschelde en van de individuele macrocellen, berekent over de laatste 50 jaar, zal worden besproken in paragraaf 4.3 respectievelijk 4.4. Tenslotte wordt in paragraaf 4.5 de nauwkeurigheid van de zandbalans onderzocht met behulp van bestaande literatuur.

4.2 Opstelling en berekening zandbalans

Historische meetdata geven aan dat het totale zandvolume van de Westerschelde in de periode 1878 tot 1952 is toegenomen met een gemiddelde van ongeveer 1,3 Mm^3 per jaar (=1,3*10^6 m^3/jr). Van den Berg e.a., 1996. Deze toename van sediment resulteerde in dichtslibbing van vertakkingen en het aangroeien van slikken en schorren.

Sinds 1955 wordt de Westerschelde minstens één keer in de twee jaar gelood. Gebiedsdekkende lodingskaarten zijn digitaal beschikbaar. Gedurende deze periode is de morfologie jaarlijks beïnvloed door menselijke ingrepen (baggeren, storten en zandwinning). De bodemmetingen geven daardoor niet de natuurlijke processen weer. De lodingen kunnen gecorrigeerd worden voor menselijk ingrijpen om de morfologische ontwikkeling als gevolg van "natuurlijke" processen te kunnen volgen. "Natuurlijk" staat tussen aanhalingstekens, omdat de processen mogelijk gestuurd worden door menselijke activiteiten.

Voor een bepaald gebied wordt een balans opgesteld tussen de veranderingen in het sedimentvolume als gevolg van menselijk ingrijpen, de totale verandering (die gemeten is) en als gevolg van "natuurlijke" processen (Vergelijking 4.1). Deze balans wordt ook wel de sedimentbalans genoemd. Bij de Westerschelde wordt vaak gesproken over een zandbalans omdat het grootste deel van het sedimentvolume bestaat uit zand.

Vergelijking 4.1 Sedimentbalans binnen een vastgesteld gebied over een bepaalde periode

$$\Delta V_{nat} = \Delta V_{tot} - V_i$$

Waarin;

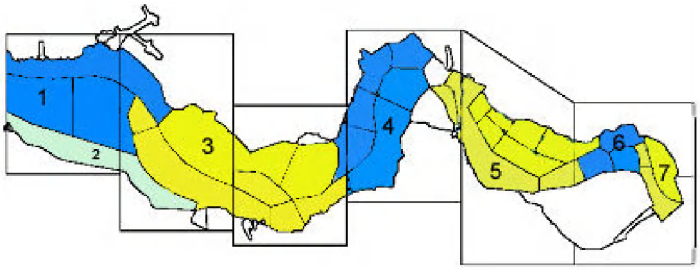
ΔV_{nat} = Gecorrigeerde sedimentvolumeverandering in balansgebied [Mm^3/jr].
Wordt ook wel natuurlijke volumeverandering genoemd. Positief = sedimentatie, negatief = erosie.

ΔV_{tot} = Totale sedimentvolumeverandering [Mm^3/jr].
Deze waarde volgt uit bodemmetingen. Positief = sedimentatie, negatief = erosie.

V_l = Sedimentvolume die door menselijk ingrijpen aan het beschouwde gebied is onttrokken of eraan is toegevoegd [Mm^3/jr].
Deze volumeverandering volgt uit bagger-, stort en zandwingegevens. Positief = toevoeging, negatief = onttrekking.

In Nederbragt en Liek (2004) is de zandbalans voor de Westerschelde opgesteld en berekend. De lodingsdata wordt gedurende het jaar verzameld. Het westen kan dus op een heel ander moment gelood worden dan het oosten. De lodinggegevens worden daarom gesynchroniseerd naar 1 januari van ieder jaar door middel van lineaire interpolatie. De volumeberekeningen worden uitgevoerd ten opzichte van het referentievlak NAP+3,5m. Bij gebruik van de bagger- en stortgegevens is rekening gehouden met het verschil tussen het sedimentvolume in het beun van het schip en ter plekke op de bodem. Over het algemeen is het volume in de beun van het schip groter dan het volume "in situ". Er wordt gebruik gemaakt van een uitleveringspercentage om het verschil te corrigeren. Het percentage hangt af van het type sediment, de korrelgrootteverdeling en de baggermethode. Voor de zandbalans van de Westerschelde wordt gebruik gemaakt van een uitleveringspercentage van 10%, gebaseerd op sediment met een hoge porositeit en mechanische baggermethode (Jeuken e.a., 2002). De correctie is dan als volgt: $V_{in\ situ} = V_{beun}/1{,}1$.

De Westerschelde is opgedeeld in een aantal balansvakken (Figuur 4.1) die samenvallen met de macrocellen uit Figuur 3.2. Het oosten van het estuarium omvat cellen 5, 6 en 7. Het midden bevat cel 4 en het westen betreft cellen 1 en 3 (en mesocel 2).



Figuur 4.1 Vakindeling van balansvakken samenhangend met macrocellen

Blauwe en gele vlakken zijn de macrocellen. Het groene vlak is een mesocel. Volgens Nederbragt en Liek, 2004

Zijwaartse uitwisseling van sediment is onmogelijk door de begrenzing van dijken. Wanneer de volumeveranderingen binnen de macrocellen bekend zijn, kan de natuurlijke sedimentuitwisseling tussen de macrocellen worden bepaald. Zo ontstaat een 1-dimensionale zandbalans, die met behulp van de volgende aannames kan worden berekend:

A1 Géén zandtransport over de grens tussen Nederland en België.

A2 Het Land van Saeftinge sedimenteert met 0,3 Mm^3 per jaar, waarbij het zand afkomstig is uit macrocel 5

A3 Er vindt geen sedimentuitwisseling plaats tussen mesocel 2 en macrocellen 1 en 3. Mesocel 2 transporteert alleen sediment van en naar het mondingsgebied.

Voor de totale Westerschelde en de afzonderlijke macrocellen kunnen de volgende "natuurlijke" ontwikkelingen worden bepaald:

- Gemiddelde natuurlijke erosie of sedimentatie (ΔV_{nat}) in een bepaalde periode. Hiermee kan worden vastgesteld of een cel of estuarium sediment aantrekt uit of afvoert naar aangrenzende gebieden.
- Sediment uitwisseling tussen gebieden door natuurlijke processen. De grootte en richting van de uitwisseling tussen gebieden kunnen worden vastgesteld door middel van Vergelijking 4.2.

Vergelijking 4.2 Sedimentuitwisseling tussen balansgebied en aangrenzende gebieden in de Westerschelde

$$S_{ZW} = S_{LW} + \Delta V_{nat}$$

Waarin;

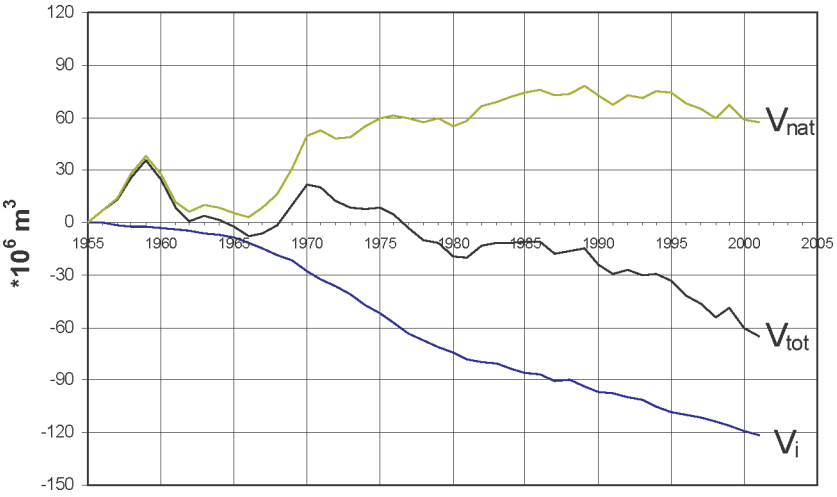
S_{ZW} = Sedimentuitwisseling door natuurlijke processen over zeewaartse grens van balansgebied met aangrenzend gebied [Mm^3/jr].
Positief = landwaarts transport, negatief = zeewaarts transport.

S_{LW} = Sedimentuitwisseling door natuurlijke processen over landwaartse grens van balansgebied met aangrenzend gebied [Mm^3/jr].
Positief = landwaarts transport, negatief = zeewaarts transport.

Met betrekking tot de gehele Westerschelde is door gebruik van aanname A1 alleen sedimentuitwisseling mogelijk met het mondingsgebied. Sedimentatie wordt hierdoor gelijk gesteld aan de geïmporteerde hoeveelheid venuit de monding en erosie wordt gelijk gesteld aan export náár de monding.

4.3 Zandbalans Westerschelde 1955-2002

Voor de totale Westerschelde is de cumulatieve zandbalans gegeven voor de periode 1955-2002 in Figuur 4.2.



Figuur 4.2 Cumulatieve zandbalans (in Mm^3) sinds 1955 van de Westerschelde

De **zwarte** lijn is het totale volume volgend uit lodingen. De blauwe lijn is de menselijke ingrepen en de groene lijn is het natuurlijke volumeverloop. Een stijgende lijn betekent sedimentatie, een dalende lijn erosie. Volgens Nederbragt en Liek (2004).

In de gehele beschouwde periode is sediment onttrokken aan het systeem door de mens, zoals blijkt uit het dalende verloop van V_i. De zandonttrekking bestaat hoofdzakelijk uit zandwinning, omdat baggeren en storten het sediment alleen intern verdeeld. In periode 1968 - 1980 werd gemiddeld het meeste sediment onttrokken: ongeveer 5 Mm^3/jr. Sinds 1980 vond een onttrekking plaats van gemiddeld 2,2 Mm^3/jr.

Het verloop van het natuurlijke zandvolume kan worden onderscheiden in verschillende periodes. Een toename van het volume (sedimentatie) komt overeen met import en een afname van het volume (erosie) met export.

- 1955 – 1959: periode van natuurlijke sedimentatie met een totaal van ongeveer 40 Mm^3. Deze natuurlijke sedimentatie is vrijwel gelijk aan de toename van het netto zandvolume. De ingrepen hebben relatief weinig invloed op de ontwikkeling van het zandvolume. Er is geen directe oorzaak aan te wijzen van deze sterke import.
- 1959 – 1962: periode van natuurlijke erosie met een totaal van bijna 30 Mm^3. Ook in deze periode wordt de ontwikkeling van het netto volume gedomineerd door natuurlijke processen. Voor deze sterke export is ook geen directe oorzaak aan te wijzen. Omdat deze export volgt op een sterke import, is het vermoeden dat meetfouten een grote rol spelen.
- 1962 – 1966: periode van stabilisatie van het natuurlijke sedimentvolume. Vrijwel geen import of export van sediment in deze periode.
- 1966 – 1970: periode van sterke natuurlijke sedimentatie. Er wordt gemiddeld circa 10 Mm^3/jr geïmporteerd. De natuurlijke volumetoename (en netto toename) lijkt niet gestuurd te zijn door menselijke ingrepen, dus wordt waarschijnlijk veroorzaakt door natuurlijke processen. Een relatief klein deel van het geïmporteerde sediment is onttrokken door de mens.
- 1970 – 1989: periode van natuurlijke sedimentatie. Gemiddeld wordt ongeveer 1,6 Mm^3/jr geïmporteerd vanuit de monding. De import is veel kleiner dan de periode hiervoor. De afname van import gaat gepaard met de eerste vaarwegverruiming. Mogelijk heeft de geulverruiming invloed gehad op de afname van de importerende trend. Tot ongeveer 1980 neemt het netto sedimentvolume in de Westerschelde af. De volumeafname als gevolg van zandwinning is groter dan de sedimentimport. Na 1980 blijft het totale zandvolume gelijk. Dit betekent dat het sediment onttrokken als gevolg van

zandwinning volledig wordt aangevuld door import vanuit het mondingsgebied.
- Vanaf 1989: Periode van stabilisatie en natuurlijke erosie. Vanaf 1989 lijkt het natuurlijke sedimentvolume zich te stabiliseren of licht te eroderen. Vanaf 1995 is een licht exporterende trend waarneembaar. Wanneer wordt aangenomen dat het systeem exporteert in periode '89-'02, is het gemiddelde ongeveer 1,5 Mm^3/jr. Indien wordt aangenomen dat het systeem vanaf 1995 exporteert, is het gemiddelde ongeveer 1,7 Mm^3/jr. De netto verruiming (V_{tot}) van de Westerschelde wordt niet alleen veroorzaakt door menselijk ingrijpen, maar is ook het gevolg van natuurlijke export. Mogelijk heeft de tweede vaargeulverruiming (1997-1998) hier invloed op gehad. Afname van het zandvolume als gevolg van zandwinning wordt niet langer op natuurlijke wijze aangevuld.

Kortom, na een periode van meer dan 20 jaar natuurlijke sedimentatie of sedimentimport vanuit de monding is tussen 1989 en 1995 een trendbreuk opgetreden waardoor het systeem nu sediment exporteert.

Volgens Jeuken e.a. (2003) is in de V_{tot} een cyclische variatie te zien met een periode van ongeveer 18 jaar en een amplitude van 7 Mm^3. Deze variatie zou 2 jaar achterlopen op de 18,6 jarige cyclus van het verticale getij. Deze uitspraak wordt echter niet statistisch onderbouwd.

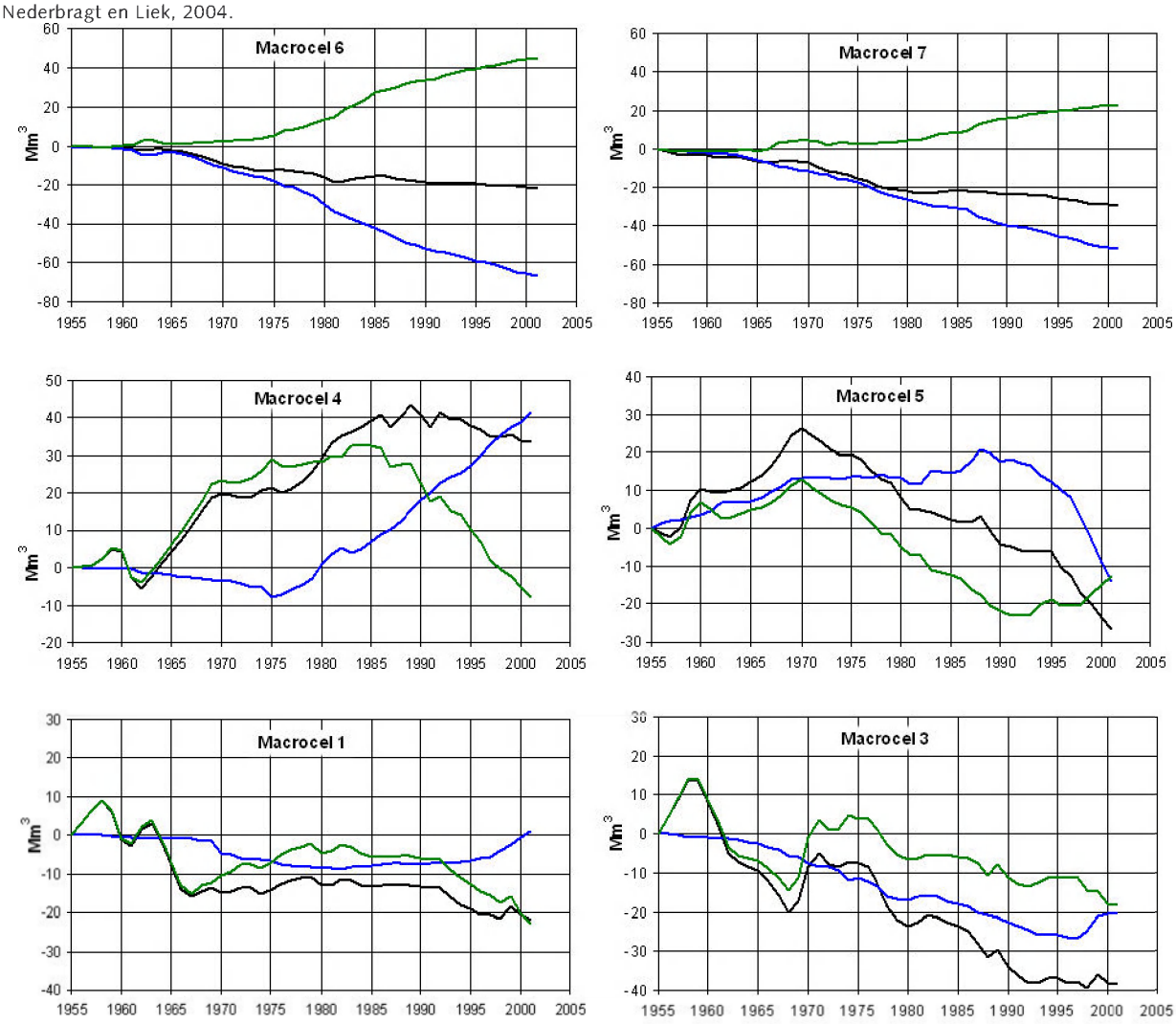
De nauwkeurigheid van de lodingsdata, ingreepgegevens en aannames bepalen de bandbreedte van V_{nat} en op welke tijdschaal het verloop kan worden geïnterpreteerd. Dit bepaalt of daadwerkelijk gesproken kan worden van een exporterend systeem. In de loop der tijd zijn meettechnieken en verwerkingstechnieken verbeterd, zodat ervan uit kan worden gegaan dat recente data betrouwbaarder is dan 50 jaar geleden. Zie hiervoor ook paragraaf 4.5.

4.4 Zandbalans en -uitwisseling macrocellen 1955-2002

De zandbalans van iedere macrocel afzonderlijk is gegeven in Figuur 4.3. De balans is opgesteld volgens de balansvakken uit Figuur 4.1.

Figuur 4.3 Cumulatieve zandvolumes (in Mm^3) sinds 1955 in de macrocellen

De zwarte lijn is het totale volume volgend uit lodingen. De blauwe lijn is de menselijke ingrepen en de groene lijn is het natuurlijke volume. Een stijgende lijn betekent sedimentatie, een dalende lijn erosie. Volgens Nederbragt en Liek, 2004.



Helemaal in het oosten (cel 6 en 7) wordt veel sediment uitgebaggerd in de vaargeulen. In de beschouwde periode is een vrijwel constant dalend verloop te zien van V_j. Het totale zandvolume lijkt sinds 1980 redelijk stabiel. De gebaggerde hoeveelheid wordt door natuurlijke sedimentatie vrijwel geheel gecompenseerd. Deze bedraagt in cel 6 ongeveer 1,6 Mm^3/jr sinds 1975 en in cel 7 ongeveer 1 Mm^3/jr sinds 1980.

Tot 1989 is door de mens netto zand toegevoegd aan cel 5, in totaal ongeveer 20 Mm^3. Sindsdien wordt gemiddeld 2,7 Mm^3 sediment per jaar onttrokken aan de macrocel. Tot 1970 is het totale sedimentvolume

toegenomen; deels door stortingen en deels door natuurlijke aanvoer vanuit omringende gebieden. Vanaf 1970 neemt het totale zandvolume af met gemiddeld 1,7 Mm^3 per jaar. Tot 1990 wordt dit vrijwel geheel veroorzaakt door natuurlijke erosie. Na 1991 neemt het netto volume af door baggeractiviteiten. Deze afname wordt deels gecompenseerd door natuurlijke sedimentatie.

In het midden van het estuarium (cel 4) wordt sinds 1975 gemiddeld 2 Mm^3 per jaar gestort. Netto zandt het gebied aan. Tot ongeveer 1986 is het totale zandvolume sterk toegenomen, waarna het zich stabiliseert en zelfs afneemt, terwijl stortingen blijven plaatsvinden. In het natuurlijke volumeverloop is dan ook een sterke trendbreuk waar te nemen rond 1986, waarbij de natuurlijke sedimentatie omslaat in een natuurlijke erosie van ongeveer 2,5 Mm^3 per jaar.

Aan macrocel 3 is voornamelijk sediment onttrokken (0,7 Mm^3/jr), maar de laatste jaren, sinds 1997, wordt netto meer sediment gestort. Dit komt overeen met de nieuwe bagger- en stortstrategie. In de periode 1955 – 1970 zijn periodes van afname en toename te zien in het totale zandvolume. Deze gaan gepaard met schommelingen in het natuurlijke volumeverloop, omdat de menselijke ingrepen relatief klein zijn. Vanaf 1971 is een afnemende trend in het netto volume te zien van 1,6 Mm^3/jr . Dit komt deels door de baggerwerkzaamheden en deels door natuurlijke erosie. Vanaf 1992 lijkt het netto volume zich te stabiliseren. De gestorte hoeveelheden na 1997 verdwijnen volledig door transport naar nabijgelegen gebieden.

Helemaal in het westen van de Westerschelde, in macrocel 1, is in de loop der tijd steeds minder gebaggerd en de laatste jaren wordt steeds meer gestort. Dit gebied is in de periode 1958 - 1966 met 25 Mm^3 verruimd. De ingrepen zijn in die periode relatief klein, dus dit komt geheel door natuurlijke processen. Een lichte toename van het netto zandvolume tussen 1966 en 1979 wordt ook veroorzaakt door een natuurlijke sedimentatie. Hierna treedt een periode van stabilisatie op tot omstreeks 1992. Er wordt ook weinig ingegrepen in die periode. Na 1992 neemt het totale volume van de cel af met ongeveer 1 Mm^3 per jaar, ook al wordt er gestort. De natuurlijke erosie is groter dan de stortingen.

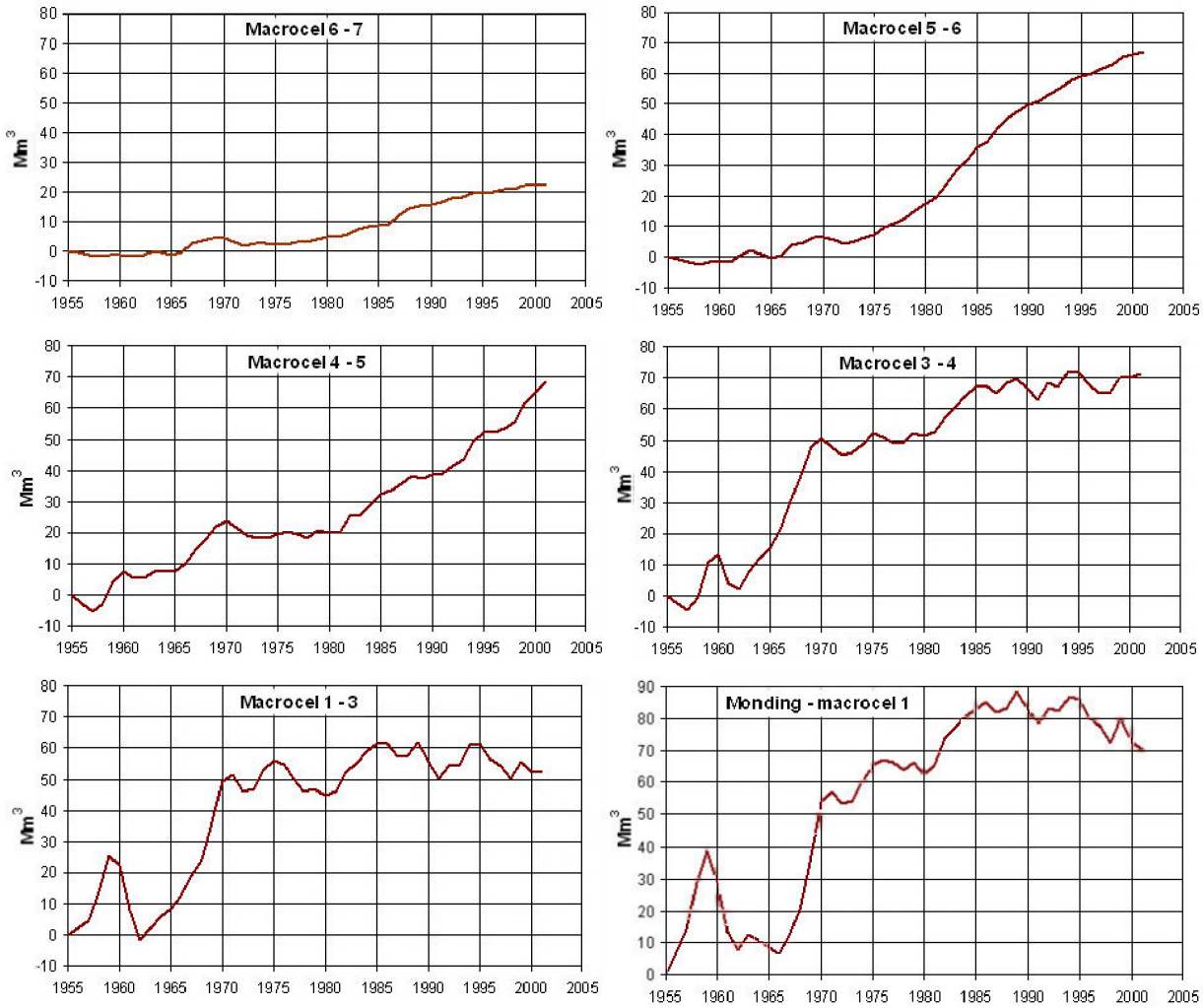
Wanneer de natuurlijke ontwikkeling van cellen samen wordt beschouwd, trekt het meest oostelijke deel (cel 6 en 7) sediment aan vanuit de omgeving. Cel 5 transporteerde eerst nog sediment naar omringende gebieden, maar heeft sinds 1991 ook een (natuurlijk) sedimenterend karakter. Dit komt waarschijnlijk door de toenemende baggerwerkzaamheden. Het midden en westelijk deel (cel 1, 3 en 4) laten de afgelopen jaren juist een eroderende trend als gevolg van natuurlijke processen. Deze gebieden transporteren sediment naar omliggende gebieden.

Voor de macrocellen geldt hetzelfde als bij de zandbalans van de gehele Westerschelde: In hoeverre de beschreven trends representatief zijn voor de werkelijkheid wordt vooral bepaald door de nauwkeurigheid van de data. Dit wordt behandeld in paragraaf 4.5. Grotere balansgebieden hebben over het algemeen een hogere nauwkeurigheid dan kleinere balansgebieden, omdat meer fouten worden uitgemiddeld.

De uitwisseling van sediment tussen de cellen volgens Vergelijking 4.2 wordt gegeven in Figuur 4.4. De uitwisseling over de grens met België is niet gepresenteerd, want die is nul (aanname A1).

Figuur 4.4 Cumulatieve, natuurlijke sedimentuitwisseling sinds 1955 tussen de macrocellen

Een stijgende lijn betekent landwaarts transport, een dalende lijn is zeewaarts transport. Volgens Nederbragt en Liek, 2004. De figuren zijn van gelijke schaal.



In het oosten is het natuurlijke sedimenttransport sinds 1965 landwaarts gericht over de grens tussen cel 6 en 7 en tussen cel 5 en 6. Vanaf 1975 is het gemiddelde transport circa 0,8 Mm^3/jr respectievelijk circa 2,4 Mm^3/jr. Voor 1965 vindt nauwelijks sedimentuitwisseling plaats tussen de cellen. Met betrekking tot het sedimenttransport over de grens tussen cel 4 en 5, is de richting vrijwel de gehele periode sinds 1957 landwaarts gericht met een gemiddelde van ongeveer 1,3 Mm^3 per jaar. Tussen 1972 en 1981

vindt geen of nauwelijks uitwisseling plaats. Na 1981 is het landwaarts transport ongeveer 2,2 Mm^3 per jaar.

De uitwisseling tussen cel 3 en 4 is tot aan 1985 voornamelijk landwaarts gericht. Tussen 1970 en 1980 vindt nauwelijks transport over de grens plaats. Na 1985 lijkt de netto uitwisseling van sediment zich te stabiliseren: korte periodes van landwaarts en zeewaarts transport hebben een netto effect van 0.

Het transport over de grens tussen cel 1 en 3 laat sterke fluctuaties zien tussen landwaarts en zeewaarts gericht transport. De lange-termijn trend doet vermoeden dat er een sinds 1955 een overwegend landwaarts transport heeft plaatsgevonden. Sinds ongeveer 1985 lijkt deze trend te zijn afgenomen en de laatste jaren is het transport mogelijk omgeslagen naar een overwegend zeewaarts transport.

Met betrekking tot de uitwisseling tussen cel 1 en de monding is het transport sinds 1966 tot 1989 landwaarts gericht. Voor 1966 heeft een periode van sterk landwaarts en zeewaarts gericht transport plaatsgevonden. Vanaf 1970 is jaarlijks ongeveer 1,2 Mm^3 over grens cel 1-monding getransporteerd in landwaartse richting en na 1989 is een zeewaarts gerichte trend waar te nemen van dezelfde orde.

Wat opvalt is dat de fluctuaties van landwaarts en zeewaarts gericht transport toenemen in westelijke richting. In het gehele estuarium heeft overwegend landwaarts transport plaatsgevonden. De laatste 10 à 15 jaar wordt vanuit het westelijke deel steeds meer sediment in zeewaartse richting getransporteerd.

De sedimentuitwisseling (op de zeewaartse rand van een balansvak) wordt berekend met de volumeverandering van het balansvak zelf en met de sedimentuitwisseling op de landwaartse rand. De sedimentuitwisseling op de landwaartse rand is ook weer berekend door middel van de natuurlijke volumeverandering in het (landwaartse) balansvak. Onnauwkeurigheden in de natuurlijke volumeverandering (a.g.v onnauwkeurigheden in data) veroorzaken daardoor een grotere onnauwkeurigheid in de sedimentuitwisseling dan bij alleen de volumeverandering, omdat de getallen van elkaar worden afgetrokken.

4.5 Nauwkeurigheid zandbalans

De ontwikkeling van het natuurlijke volume (V_{nat}) is berekend door middel van lodingsdata, bagger- en stortgegevens en met behulp van aannames. De nauwkeurigheid van de data en de geldigheid van de aannames bepalen in hoeverre de zandbalans representatief is voor de werkelijkheid. In Storm e.a. (1993) en Marijs en Parée (2004) zijn fouten in de meetdata geïnventariseerd en zoveel mogelijk gekwantificeerd. In Bijlage D is een inventarisatie gegeven van de studies met mogelijke fouten in lodingen (= fouten in V_{tot}). Daarnaast is in de studie van Nederbragt en Liek (2004) een analyse uitgevoerd om de gevoeligheid van de aannames op de zandbalans uitkomsten te toetsen. Deze studies hebben zich vooral gericht op het natuurlijke volumeverloop op ruimtelijke schaal van de gehele

Westerschelde en niet op macro-niveau. De uitkomsten, kwantificering en invloed op de zandbalans zijn in deze paragraaf gepresenteerd.

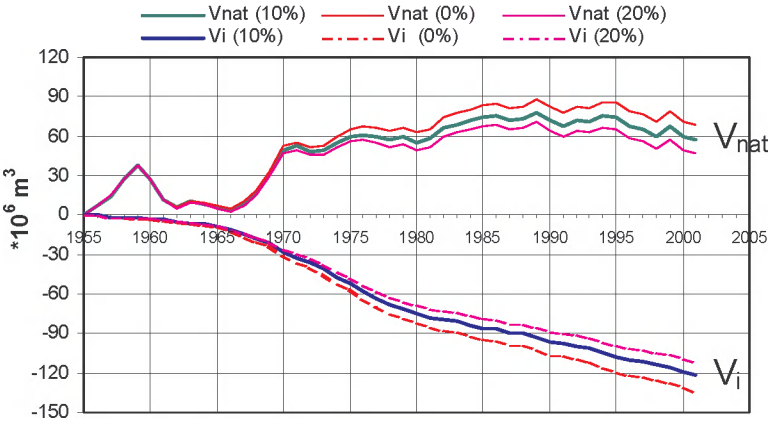
4.5.1 Lodingen

Onnauwkeurigheden in lodingen kunnen worden onderscheiden in stochastische en systematische fouten. Stochastische fouten zijn geheel willekeurig, zowel in de ruimte als in de tijd, en middelen uit bij een groot balansgebied. De stochastische fouten kunnen worden verwaarloosd voor de zandbalans van de Westerschelde en van macrocellen 1 t/m 5 (Bollenbakker en Van der Male, 1993; zie ook Bijlage D). Onduidelijk is of dit ook geldt voor macrocellen 6 en 7. Een systematische fout is een constante afwijking in een bepaald gebied. De diepte wordt structureel te klein of te groot gemeten door bijvoorbeeld een menselijke fout of technische storing. Maar er kan ook een systematische afwijking ontstaan doordat een nieuwe techniek in gebruik wordt genomen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de ingebruikneming van LRK (deze corrigeert voor squat, de inzinking van de meetsensor) en de kleiner geworden openingshoek van de lodingsbeam (waardoor tegenwoordig op hellingen nauwkeuriger wordt gemeten). Zie ook Bijlage D. Deze technieken hebben als gevolg dat het totale zandvolume (V_{tot}) vanaf 1993 structureel in de orde van 3 Mm^3 te laag zijn ingeschat ten opzichte van de periode daarvoor en vanaf 2002 in de orde van 0,4 Mm^3 (Bijlage D volgens Storm e.a., 1993; Marijs en Parée, 2004). Het voordeel van deze systematische fout is dat ze relatief gemakkelijk te achterhalen en te kwantificeren zijn. Bij menselijke fouten of technische storingen is dat veel lastiger. Marijs en Parée (2004) hebben door middel van verschilkaarten van opvolgende jaren een inventarisatie gemaakt van mogelijke onnauwkeurigheden als gevolg van menselijke fouten of technische mankementen (Bijlage D). Wanneer in één en hetzelfde gebied een sterke erosie volgt op een sterke sedimentatie terwijl de lange-termijn trend niet verandert, zou dit kunnen komen door een meetfout. De waargenomen afwijkingen zijn in de orde van ±1-4 Mm^3 voor een individueel jaar een uitschieter met van 10 Mm^3. Dit kan een indicatie geven van de bandbreedte van V_{tot}.

4.5.2 Ingreepgegevens

De ingreepgegevens worden bepaald door de gestorte en gebaggerde hoeveelheden sediment (ook zandwinning) in de beun van het schip te meten. Tijdens het meten kunnen ook stochastische fouten optreden. Uitgaande van een stochastische fout van 1,5% voor baggeren en 1-5% voor zandwinning is deze fout volgens Storm e.a. (1993) verwaarloosbaar op de zandbalans van de totale Westerschelde. Onbekend is of de fout op macroniveau ook verwaarloosbaar is.

Een andere factor die de nauwkeurigheid van de ingreepgegevens in de zandbalans beïnvloed, is het uitleveringspercentage. Voor de Westerschelde wordt een percentage van 10% aangehouden. Maar dit kan ook 5 of 15% zijn (Jeuken e.a., 2002). In Nederbragt en Liek (2004) is de gevoeligheid op uitkomsten van V_{nat} met een uitleveringspercentage van 0 en 20% berekend (zie Figuur 4.5).



Figuur 4.5 Invloed variatie uitleveringspercentage (0-20%) op verloop van V_{nat}

Volgens Nederbragt en Liek (2004).

Indien wordt aangenomen dat het uitleveringspercentage constant is in de tijd, geeft een uitleveringspercentage van 0% in de periode 1970 – 1989 een import van 2,0 Mm^3/jr en vanaf 1989 en export van 1,0 Mm^3/jr. Een uitleveringpercentage van 20% geeft een import in periode 1970 – 1989 van 1,0 Mm^3/jr en vanaf 1989 een export van 2,0 Mm^3/jr. Doordat bij een uitleveringspercentage van 20% de export wordt versterkt, wordt een trendbreuk aannemelijker. Bij een uitleveringspercentage van 0% is juist het omgekeerde het geval. Vóór 1970 veranderen de volumes nauwelijks als gevolg van een ander uitleveringspercentage. Deze gevoeligheidsanalyse is niet uitgevoerd op macrocelniveau.

Grootschalige zandverplaatsingen bij wrakopruimingen en stortingen van havenslib kunnen ook een bijdrage leveren aan veranderingen in het sedimentvolume in de Westerschelde. Deze zijn niet meegenomen in de zandbalans. Op mega-schaal worden deze uitgemiddeld, doordat het een interne verplaatsing betreft. Op macroschaal kunnen de onnauwkeurigheden niet worden gekwantificeerd.

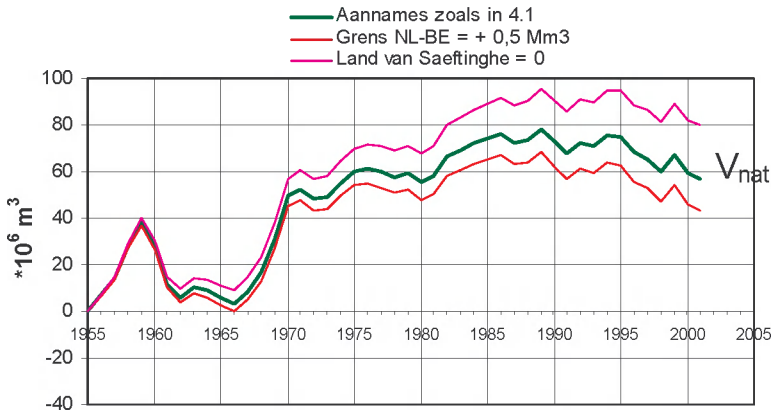
4.5.3 Aannames

De aannames voor het opstellen van de zandbalans zijn geformuleerd in paragraaf 4.1. Variatie in de A3 kan de zandbalans alleen op macroniveau beïnvloeden, terwijl A1 en A2 de zandbalans op zowel macro- als mega-schaal kunnen beïnvloeden.

A2 is gebaseerd op volumeberekeningen van het Land van Saeftinge uit 1931, 1962, 1992 (Krijger, 1993). Hieruit blijkt dat het Land van Saeftinge aanzandde tussen 1931 en 1962 met 0,5 Mm^3/jr en tussen 1962 en 1992 met 0,3 Mm^3/jr. A1 volgt uit een studie van Uit den Bogaard (1995). Hieruit volgt dat het sediment met 0,5 Mm^3/jr in landwaarste richting over de grens wordt getransporteerd. Deze studie is gebaseerd op bodemdata van de Zeeschelde in 1969 en 1991. Een landwaarts gericht transport lijkt waarschijnlijk, aangezien in de Zeeschelde veel gebaggerd wordt voor de Antwerpse haven. Het uitgewisselde sediment betreft waarschijnlijk voornamelijk slib (Van Maldegem, 1993). Het tekort aan sediment kan zorgen voor de aantrekking van sediment vanuit de Westerschelde. Specifieke studie naar de sedimentuitwisseling tussen Nederland en België is niet uitgevoerd.

De gevoeligheid van deze aannames op schaal van de gehele Westerschelde is onderzocht door Nederbragt en Liek (2004). Twee extra berekeningen zijn uitgevoerd door de volgende variaties toe te passen (Figuur 4.6):

- Uitwisseling tussen Land van Saeftinge en cel 5 is nul.
- Transport over de grens = 0,5 Mm^3/jr in landwaartse richting.



Figuur 4.6 Invloed variatie aannames op verloop van V_{nat}

Volgens Nederbragt en Liek (2004).

Indien wordt aangenomen dat het Land van Saeftinge niet sedimenteert, geeft dat een afname van de import over periode 1970 – 1989 tot 0,8 Mm^3/jr. De exporterende trend vanaf 1989 neemt juist toe tot 1,9 Mm^3/jr. De trendbreuk verschuift hierdoor naar voren in de tijd en een trendbreuk is duidelijker waar te nemen. De tweede berekening, met een transport over de grens met België, heeft een tegengesteld effect. De importerende trend tussen 1970 en 1989 is versterkt tot 2,0 Mm^3/jr en de export vanaf 1989 neemt af tot een gemiddelde van ongeveer 0,8 Mm^3/jr. De periode van stabilisatie van het natuurlijke volume (geen import/export) wordt hierdoor langer en de exporterende trend zet later in. De invloed van aannames op de V_{nat} heeft een soortgelijke invloed als het uitleveringspercentage: een landwaarts gericht transport maakt export naar de monding minder aannemelijk, terwijl een kleinere sedimentatie van het Land van Saeftinge juist een toename van de export laat zien.

Er is uitgegaan van een constante aanname in de tijd. Het is mogelijk dat de sedimentuitwisseling tussen cel 5 en Saeftinge en tussen de Westerschelde en Zeeschelde variëren in de tijd. De trends kunnen dan nog verder versterkt of verzwakt worden.

4.5.4 Conclusie en discussie

In Tabel 4.1 wordt een samenvatting gegeven van de invloed van fouten op de zandbalans.

Tabel 4.1 Samenvatting invloed fouten op natuurlijk zandvolume (V_{nat})

Component in zandbalans	Soort fout		Correctie voor Westerschelde	Correctie voor macrocellen	Geldig voor (niet ingevuld betekent gehele periode)
Lodingen	Stochastisch		uitgemiddeld	Cel 1 t/m 5: uitgemiddeld Cel 6 en 7: niet bekend	
	Systematisch	Squat	+ 0,4 Mm^3	+ 0,2 Mm^3	Vanaf 2002
		Openingshoek beam	+ 3,0 Mm^3	+ 0,1 – 0,3 Mm^3	Vanaf 1993
		Menselijke fouten of technische storingen	± 0,1 – 4 Mm^3 (uitschieter 10 Mm^3)	± 0,1 – 4 Mm^3 jaar (uitschieter 10 Mm^3)	Voor ieder, individueel jaar verschillend.
Ingreep gegevens	Stochastisch		Uitgemiddeld?	Uitgemiddeld?	
	Uitleveringspercentage		Lange termijn trend verzwakt of versterkt	Niet bekend	Vanaf 1970
	Wrakopruiming, storten van havenslib, etc		Valt weg, interne verdeling	Niet bekend	
Aannames			Versterking of verzwakking van trend	Niet bekend	Vanaf 1970

Op basis van genoemde en gekwantificeerde fouten kan een indicatie worden gegeven voor de betrouwbaarheid van de ontwikkeling van V_{nat} op mega-schaal (gehele Westerschelde). Het volume van een individueel jaar kan als gevolg van lodingsfouten afwijken in de orde van 1 tot 4 Mm^3 met een uitschieter naar 10 Mm^3. Aan de volumeontwikkeling op de korte termijn kan daarom geen waarde gehecht worden. Op de langere termijn zou dat wel kunnen, bijvoorbeeld op een tijdschaal van 5 tot 10 jaar. Dit is een tijdsperiode waar minstens 3 metingen achtereenvolgens hebben plaatsgevonden. Immers, de kans dat een gebied achtereenvolgens fout wordt gemeten is erg klein. De meettechnieken zijn in de loop der jaren wel verbeterd, zodat recente data over het algemeen betrouwbaarder is dan 50 jaar geleden.

In een aantal periodes (1955-1959, 1959-1962, 1966-1970) vinden sterke fluctuaties plaats in het netto volume. Dit vertaalt zich ook door in sterke fluctuaties van het natuurlijke volume doordat de menselijke ingrepen relatief klein zijn. Volgens bovenstaande inventarisatie (Tabel 4.1) kunnen de sterke volumevariaties in de orde van 10-40 Mm^3 van vóór 1970 niet het gevolg zijn van meetfouten. Het uitleveringspercentage en andere aannames hebben ook geen invloed op deze trends. Maar fysisch gezien zijn deze fluctuaties ook onverklaarbaar. De trends kunnen de oorzaak zijn van meetfouten die (nog) niet bekend zijn. In periode 1955-1970 zal de trend op een langere tijdschaal moeten worden bepaald; bijvoorbeeld tussen de 10 en 15 jaar.

Door de invloed van variatie van de aannames en het uitleveringspercentage is een nuancering noodzakelijk betreffende de ontwikkeling van het natuurlijke zandvolume in de laatste 10 à 15 jaar. In alle gevoeligheidsanalyses is waar te nemen, dat het systeem sediment importeert vanaf 1970. De jaarlijkse import is in de orde van 1 à 2 Mm^3 per jaar. In de periode van 1985 tot 1991 neemt deze importerende trend af. Op basis van meerjarige trends kan worden geconcludeerd dat vanaf die periode het natuurlijke volume zich stabiliseert en sindsdien geen import meer plaatsvindt. De laatste jaren lijkt een exporterende trend te zijn ingezet, maar de periode is te kort om dit met zekerheid te kunnen zeggen. Dit zal blijken uit toekomstige metingen.

Met betrekking tot de nauwkeurigheid van de V_{nat} van de macrocellen is weinig gekwantificeerd en onderzocht. Op basis van de geïnventariseerde lodingsfouten kan worden aangenomen dat gekeken moet worden naar lange-termijn trends tussen de 5 en 15 jaar. De betrouwbaarheid van de volumeontwikkeling neemt toe met de grootte van het balansgebied (stochastische fouten middelen uit), met de tijd (verbeterde technieken) en met afnemende fluctuaties. Met betrekking tot de sedimentuitwisseling tussen de macrocellen is de onnauwkeurigheid waarschijnlijk groter dan bij de volumeontwikkeling van een individuele macrocel, omdat twee getallen (V_{nat} en een getal die wordt berekend met V_{nat}) van elkaar worden afgetrokken. Voor de sedimentuitwisseling geldt dus ook dat de trends op de lange termijn moeten worden bepaald.

5 Opzet (model)onderzoek

5.1 Algemene opzet

De volgende trends kunnen in de Westerschelde worden onderscheiden:
- Vóór 1952: overwegend sedimentimport, ongeveer 1,3 Mm^3 per jaar.
- Tussen 1955 en 1962: periode van export gevolgd op een periode van import. In '62 is het volume met 10 Mm^3 gestegen t.o.v. '55.
- Tussen 1962 en 1966: nauwelijks import/export.
- Tussen 1966 en 1970: import van circa 10 Mm^3/jr.
- Tussen 1970 en 1985: import in de orde van 1 à 2 Mm^3/jr.
- Tussen 1985 en 1990: afname van import, totdat import = 0.
- Tussen 1989 en 1995 vindt mogelijk een trendbreuk plaats. Sindsdien exporteert het systeem in orde van 1 à 2 Mm^3/jr.

Variatie van de trends vóór 1970 is mogelijk, omdat hier nog grote onzekerheid bestaat met betrekking tot de meetdata.

Voor de beheerder is het interessant te weten wat de effecten zijn van de ingrepen op de morfologische ontwikkeling. De vaargeulverruimingen, het storten, fixatie van geulen en zandwinning (paragraaf 3.4.2) kunnen sturend zijn geweest in afname van de import (zowel rond '70 als rond '85-'90) en hebben mogelijk zelfs geleid tot export. Deze activiteiten kunnen invloed hebben gehad op het sedimenttransport via veranderingen van bijvoorbeeld getijstromen, meteorologische factoren (bijv. wind) en dichtheidsverschillen. Ook kan een overschot aan sediment zijn ontstaan, doordat meer wordt gestort in het westen met een toename van export tot gevolg.

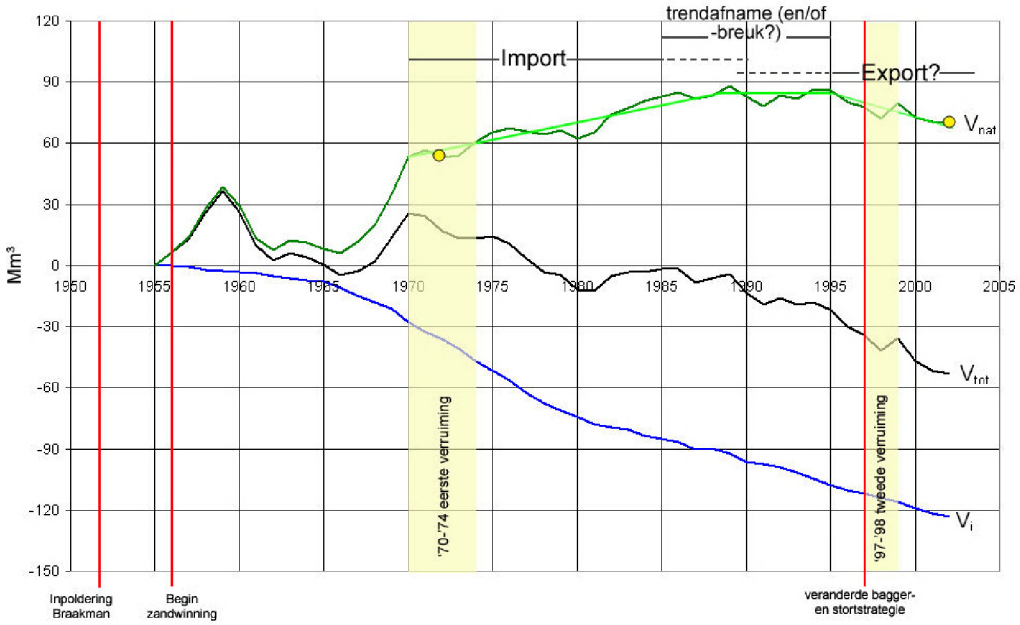
Met een numeriek model kan het effect van verschillende bodemliggingen worden onderzocht door de waterbeweging en sedimenttransport te simuleren met verschillende bodems. Voor de modellering worden een aantal aannames gedaan:
- Getijbeweging is de primaire hydrodynamische aandrijvingkracht voor morfologische ontwikkeling.
- De Westerschelde is een goed gemengd estuarium, waardoor geen (duidelijke) dichtheidsverschillen in de verticaal aanwezig zijn.
- Klimatologische en meteorologische gedreven transportprocessen hebben geen invloed op de morfologische ontwikkeling.
- Alleen grof sediment (zand) beïnvloedt de morfologische ontwikkeling in de Westerschelde en monding.

Wanneer alle condities in het model gelijk worden gehouden, behalve de bodem, kan het effect van de bodemligging op het getijgedreven transport worden onderzocht. Er wordt gebruik gemaakt van een waterbewegingsmodel. De opzet van het model (invoer en randvoorwaarden) wordt beschreven in paragraaf 5.2. Het sedimenttransport is gekoppeld aan de stroomsnelheden door gebruik te maken de vereenvoudigde transportformulering $S \propto \alpha u^n$. Het transport hangt af van de momentane stroomsnelheid en bevat geen morfologische

aanpassing in de tijd. Hoe het sedimenttransport precies is berekend in het model wordt beschreven in paragraaf 5.2.5.

De bodems waarmee de simulaties zijn uitgevoerd zijn gekozen op basis van de uitkomsten van de zandbalans (Figuur 5.1). Eén bodem is gekozen ten tijde van import (1972) en één bodem ten tijde van de mogelijke exporterende trend (2002). Er wordt aangenomen dat de lange termijn trend representatief is voor een individueel jaar. Indien de bodemligging een dominante invloed heeft op het getijgedreven sedimenttransport, zal de modeluitkomst uit 2002 een export moeten laten zien ten opzichte van 1972.

Figuur 5.1 Gekozen bodems in model op basis van verloop V_{nat}



5.2 WAQUA model

5.2.1 Algemeen

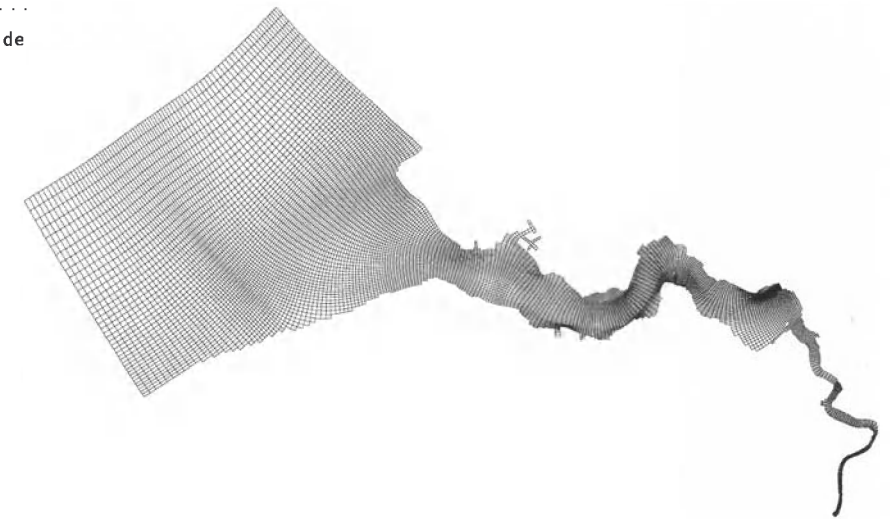
Het WAQUA model is een 2-dimensionaal waterbewegingsmodel. Voor ieder roosterpunt worden de dieptegemiddelde stromingscomponenten (in 2 richtingen) en waterstanden berekend door toepassing van de ondiepwatervergelijkingen (Vergelijking 2.2 t/m Vergelijking 2.4). WAQUA valt onder het kennissysteem SIMONA (Simulatie Modellen Natte waterstaat), dat is ontwikkeld en wordt beheerd door RWS RIKZ.

Voor het project ZEEKENNIS is begonnen met de ontwikkeling van een morfologische model van de Westerschelde. Daarvoor is het waterbewegingsmodel eerst gekalibreerd op waterstanden en debietmetingen uit 2000, 2001 en 2002 en gevalideerd op waterstanden uit 1972 en debietmetingen uit 1978 (van der Kaaij e.a., 2004a; van der Kaaij e.a., 2004b). Ook is een morfologisch getij van 24h en 50 minuten ontwikkeld (zie paragraaf 5.2.4). De modelschematisatie, de ruwheid en randvoorwaarden van dit model zijn gebruikt in deze modelstudie.

5.2.2 Schematisatie

Het model omvat de Westerschelde, het mondingsgebied en de Zeeschelde tot aan Schelle (Figuur 5.2). Het model heeft een kromlijnig rooster met ongeveer 12.500 roosterpunten waarvoor berekeningen kunnen worden gemaakt. De afmetingen van de roostercellen variëren van 800*800 m^2 op open zee tot 150*250 m^2 in het estuarium.

Figuur 5.2 Modelschematisatie voor de Westerschelde

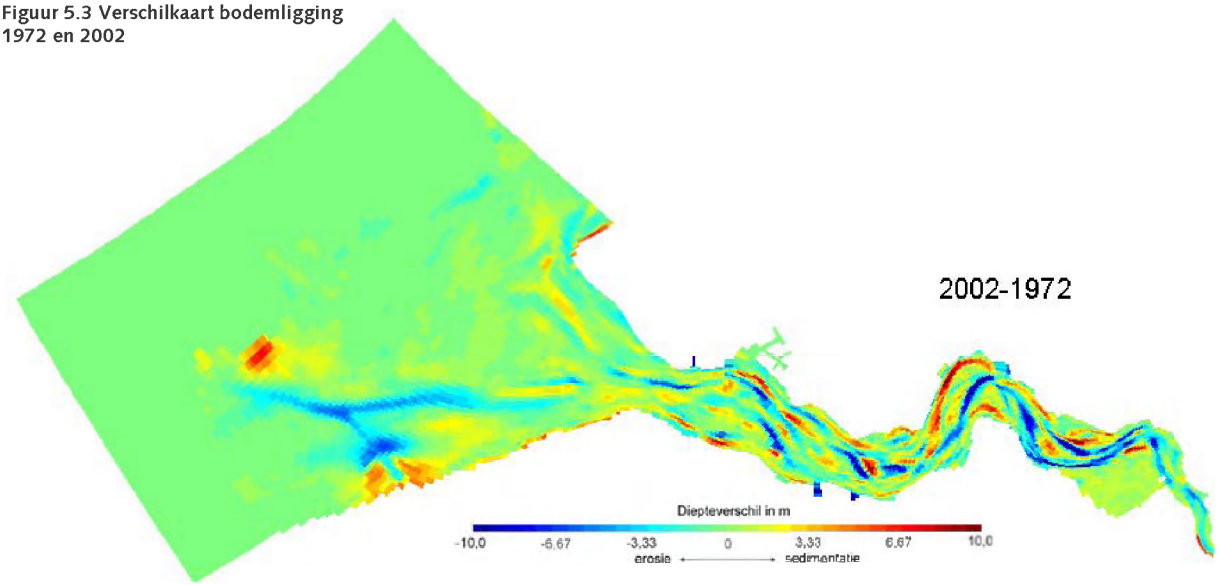


5.2.3 Invoer

Bodemligging

De bodemligging is het enige verschil tussen het model van 1972 en 2002. De geschematiseerde bodem in het model volgt uit dieptemetingen uit de jaren 1972 en 2002. Het verschil tussen beide bodems is te zien in Figuur 5.3.

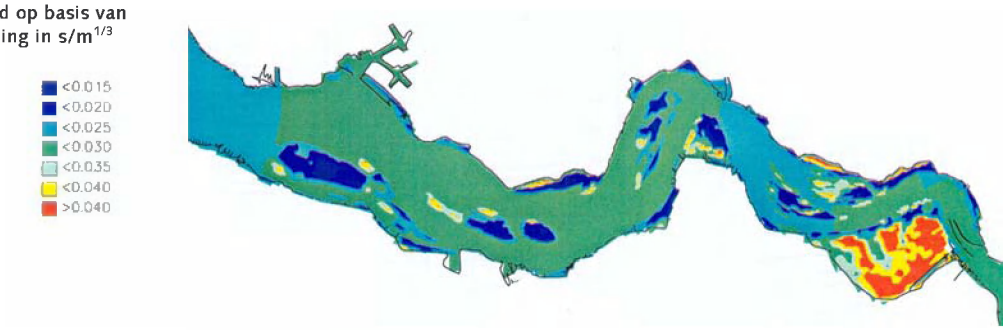
Figuur 5.3 Verschilkaart bodemligging 1972 en 2002



Wrijving

Wrijving wordt door middel van een ruwheidveld geschematiseerd. De ruwheid is gebaseerd op Manning en de waarde varieert in de ruimte (Figuur 5.4).

Figuur 5.4 Ruwheidsveld op basis van de parameter van Manning in $s/m^{1/3}$



In het model wordt de ruwheid om de 10 minuten omgerekend tot waarden van Chezy door middel van Vergelijking 5.1.

Vergelijking 5.1 Chezy parameter

$$C = \frac{h^{1/6}}{M}$$

Waarin;

C = wrijvingsparameter van Chezy [$m^{1/2}/s$]
h = waterstand [m]
M = wrijvingsparameter van Manning [$s/m^{1/3}$]

5.2.4 Randvoorwaarden

Per iedere 3 roosterpunten aan de zeerand worden Riemann randvoorwaarden opgelegd, dat wil zeggen een combinatie van waterstanden en stroomsnelheden. Voor de overige roosterpunten worden de randvoorwaarden verkregen door middel van interpolatie. De randvoorwaarden zijn opgelegd in de vorm van amplitudes en fasen van de belangrijkste harmonische componenten.

Van der Kaaij e.a. (2004b) hebben de gemiddelde eb- en vloedtransporten bepaald voor een gehele springtij/doodtij cyclus. Daarnaast zijn de gemiddelde transporten per getijcyclus (25 uur) bepaald. De getijcyclus die gemiddeld dezelfde sedimenttransporten geeft, wordt het karakteristieke getij of morfologisch getij genoemd. Het betreft het getij van 16/12/2000 12u50 tot 17/12/2000 13u50. In Bijlage E is het gemiddelde sedimentatie/erosie patroon met het morfologische getij gegeven en met de springtij/doodtij cyclus. Het morfologische getij is geconverteerd naar een cyclisch getij met een (herhalings)periode van 25 uur. Dit getij is toegepast in het model.

Bij de rivier is een debietrandvoorwaarde opgelegd, welke afkomstig is van berekeningen met het SCALWEST model. Een tijdreeks van een meting uit de periode 17/6/2000 tot 5/7/2000 is getransformeerd naar amplitudes en fasen van de belangrijkste getijcomponenten om een astronomische forcering te krijgen (Van der Kaaij e.a., 2004a).

De randvoorwaarden worden gelijk gehouden bij de simulaties. Er wordt vanuit gegaan dat de randvoorwaarden de laatste 30 jaar nauwelijks zijn veranderd. Daarnaast wordt, door *alleen* de bodemligging te variëren, inzicht verkregen in het effect van een veranderde bodemligging op de

waterbeweging en sedimenttransporten. Het effect als gevolg van een verandering van de randvoorwaarde wordt in deze studie niet onderzocht.

Voor de simulaties is een inspeeltijd van 225 uur aangehouden (= ruim 9 dagen).

5.2.5 Sedimenttransport

Het sedimenttransport is berekend met Vergelijking 5.2. Dit is een vereenvoudigde transportformulering waarbij het sedimenttransport direct gerelateerd is aan de stroomsnelheid (zie ook paragraaf 2.4.4).

Vergelijking 5.2 Formulering van sedimenttransport in het model

$$S \propto \alpha \cdot u^n$$

Waarin;

S = sedimenttransport [kg/m^2/s]
u = dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s]
n = constante, variërend tussen 3 en 5 [-]
α = schalingsfactor (functie van sediment- en stromingskarakteristieken, zie ook paragraaf 2.4.4).

Er wordt aangenomen dat de sediment- en stromingskarakteristieken gelijk zijn voor de gehele Westerschelde. Dat betekent dat de factor α constant is voor het gehele gebied. Bij berekening van het sedimenttransport in het model wordt de factor α achterwege gelaten. De sedimenttransporten worden dus niet gekwantificeerd, er worden alleen geschaalde vectoren berekend. Het berekende veld van sedimenttransporten zou met een factor α moeten worden vermenigvuldigd om kwantitatieve sedimenttransporten te verkrijgen.

In het model wordt de lokale, momentane stroomsnelheid weergegeven door twee componenten in het horizontale vlak (x en y). Ook het lokale, momentane sedimenttransport wordt weergegeven door de x- en y-component in het horizontale vlak (Vergelijking 5.3).

Vergelijking 5.3 Componenten in x- en y-richting van het geschaalde lokale, momentane sedimenttransport

$$(s/\alpha)_x = \left(u_x^2 + u_y^2\right)^{\frac{n-1}{2}} u_x$$

$$(s/\alpha)_y = \left(u_x^2 + u_y^2\right)^{\frac{n-1}{2}} u_y$$

Waarin;

$(s/\alpha)_x$, $(s/\alpha)_y$ = horizontale component in x- en y-richting van de (met α) geschaalde lokale, momentane sedimenttransportvector.
u_x, u_y = horizontale component in x- en y-richting van de lokale, momentane stroomsnelheidsvector [m/s]
n = constante, variërend tussen 3 en 5 [-]

In "Residueel sedimenttransport" in paragraaf 3.4.5 zijn de verschillende definities gegeven voor het lokale sedimenttransport op verschillende tijdschalen en het getijgemiddelde sedimenttransport op verschillende ruimteschalen. Het netto sedimenttransport (S_{netto}) is met Matlab berekend door de lokale, momentane sedimenttransporten (Vergelijking 5.3) eerst in de tijd te integreren. Hierna zijn de sedimenttransporten loodrecht op de

roosterlijnen bepaald (=evenwijdig aan de roosterlijn die evenwijdig is aan de lengteas van het estuarium). Vervolgens zijn deze sedimenttransporten geïntegreerd over de breedte van het estuarium. Hierbij is rekening gehouden met de breedte van de afzonderlijke roostercellen (Vergelijking 5.4).

Vergelijking 5.4 Berekening netto sedimenttransport in model

$$S_{netto} = \sum B_{rocel} * \left(\sum_{\Delta t} s(t) \right)_{\perp}$$

Waarin;

B_{rocel} = breedte roostercel loodrecht op de lengteas van het estuarium [m]
s(t) = (geschaalde) lokale, momentane sedimenttransport
Δt = tijdstap berekend sedimenttransport [s]

Voor het bruto sedimenttransport zijn de sedimenttransporten in ebrichting en vloedrichting apart uitgerekend (Vergelijking 5.5).

Vergelijking 5.5 Berekening bruto sedimenttransport in model

$$S_{bruto,eb} = \sum B_{rocel} * \left(\sum_{\Delta t} s(t) \right)_{\perp} \text{ voor } \left(\sum_{\Delta t} s(t) \right)_{\perp} < 0$$

$$S_{bruto,vloed} = \sum B_{rocel} * \left(\sum_{\Delta t} s(t) \right)_{\perp} \text{ voor } \left(\sum_{\Delta t} s(t) \right)_{\perp} > 0$$

5.3 Opzet analyses

In de volgende hoofdstukken (6, 7 en 8) worden de analyses van de meetdata en modelsimulaties beschreven. In deze paragraaf wordt de opzet van deze analyses gegeven en beschreven welke analyses zijn uitgevoerd.

- Zandbalans analyse (H6)
  Om de modelresultaten met een bodem uit 1972 en 2002 te kunnen vergelijken met de metingen, worden de trends omstreeks 1972 en 2002 in de zandbalans bepaald. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van de berekende natuurlijke volumeontwikkeling van de individuele macrocellen (Figuur 4.3) en van de berekende natuurlijke sedimentuitwisseling tussen de macrocellen (Figuur 4.4). De trends worden visueel geschat. Doordat de meetdata fluctueren in de tijd, kunnen soms meerdere trends worden waargenomen. De trends worden geclassificeerd op betrouwbaarheid van de uitspraak. Uiteindelijk wordt een 1-dimensionaal sedimenttransportpatroon uit 1972 en 2002 verkregen.

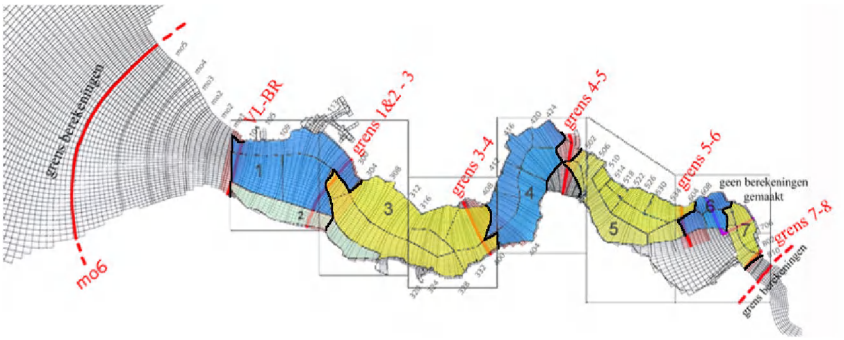
- Horizontale getij analyse (7.3)
  Het lokale sedimenttransport is direct gerelateerd aan de horizontale getij-asymmetrie. Het getijgemiddelde sedimenttransport op de lange termijn wordt bepaald door de interactie tussen het M_2-getij en de residuele stroming M_0 en door de interactie tussen het M_2-getij en de hogere harmonische componenten M_2, M_4, etc. (zie ook paragraaf 2.4.4). Door de veranderde bodemligging verandert het residuele

sedimenttransport. De *oorzaak* van het veranderde sedimenttransport kan worden onderzocht door de verschillende bijdragen (M_0M_2, M_2M_4 en $M_2M_4M_6$) te berekenen. Hiermee kan worden bepaald of de verandering van het getijgemiddelde sedimenttransport wordt veroorzaakt door de interactie van het M_2-getij met het residuele stromingsveld of met de hogere harmonischen.

- Analyse bruto transport (7.4)
  De eb- en vloedtransporten zijn berekend voor iedere raai door middel van Vergelijking 5.5. De modelresultaten met een bodem van 1972 kunnen worden vergeleken met die van 2002 door de eb- en vloedtransporten van 2002 te delen door de eb- en vloedtransporten van 1972. Wanneer het eb- of vloedtransport in 2002 kleiner is dan in 1972, is de uitkomst kleiner dan 1. Wanneer de eb- of vloedtransporten in 2002 groter zijn dan in 1972, is de uitkomst groter dan 1. In combinatie met de berekende verandering in het getijprisma (= ebdebiet + vloeddebiet) zou wellicht iets gezegd kunnen worden over een afname of toename van de stroomsnelheid in het algemeen. Bij de analyse wordt rekening gehouden met eventuele variatie in de bruto transporten als gevolg variatie in de transportformulering. De analyse is daarom uitgevoerd met n=3, n=4 en n=5.

- Netto sedimenttransporten (H8)
  De netto sedimenttransporten zijn berekend voor iedere raai door middel van Vergelijking 5.4. Om een vergelijking te kunnen maken tussen de metingen van de individuele macrocellen en de modelresultaten moeten de grenzen tussen macrocellen ook in het model worden gedefinieerd. Deze zijn bepaald op basis van de celranden in de zandbalans (Figuur 5.5).

Figuur 5.5 Bepaling celranden in model met behulp van celranden in zandbalans



Doordat de grenzen tussen cellen in de zandbalans niet altijd een roosterlijn volgen, is een grensgebied aangegeven. Dit vormt het overgangsgebied tussen twee cellen. In Figuur 5.6 is de nummering van de raaien en de grensgebieden tussen de macrocellen aangegeven. Een deel van cel 6 en 7 is niet berekend, omdat het modelrooster een hoek maakt ter hoogte van Bath. Het rooster volgt hier niet de stroomrichting van de geulen. Omdat het transport loodrecht op een roosterlijn wordt berekend, worden voor dat gebied onjuiste transporten verkregen. Zie Bijlage F voor de raainummers binnen de grensgebieden.

Figuur 5.6 Definitie grensgebieden tussen de individuele macrocellen

De rode, gearceerde stukken zijn de grensgebieden in het model.



Met de sedimenttransporten uit het model kan dezelfde type informatie worden verkregen als uit de zandbalans: sedimentuitwisseling tussen de verschillende macrocellen en sedimentatie/erosie van een bepaald cel. Hoe dat precies is gedaan, wordt beschreven in Hoofdstuk 8. Met deze informatie is het mogelijk de modelresultaten en de metingen één op één met elkaar te vergelijken. Indien het getijgedreven sedimenttransport wordt gedomineerd door de bodemligging, dan zullen de veranderingen die volgen uit deze data-analyse ook te zien moeten zijn in de modelresultaten.

Variatie van de transportformulering is mogelijk door verschillende macht n toe te passen (n=3, n=4 en n=5) en door wel/geen drempelsnelheid toe te passen (=kritische stroomsnelheid voor erosie). Voor de bepaling van het effect a.g.v. de veranderde bodem moet met deze variatie rekening worden gehouden.

6 Analyse van de zandbalans

6.1 Methode van analyse

Om de modelresultaten te kunnen vergelijken met de meetdata, zullen de sedimentatie/erosie trends en de transportrichtingen in 1972 en 2002 bepaald worden door middel van de zandbalans. De analyse van de data is visueel gedaan op basis van de zandbalans van de afzonderlijke macrocellen. De geconstateerde trends van de individuele jaren zijn beoordeeld op betrouwbaarheid volgens Tabel 6.1. Bij de beoordeling is rekening gehouden met de mate van variatie in de curve en of eventueel andere trends kunnen worden geobserveerd. Er is sprake van een duidelijke trend, als geen andere interpretatie mogelijk is. Soms is sprake van een duidelijke trend, maar kan een andere uitkomst volgen als de data over een andere tijdperiode wordt beschouwd.

Tabel 6.1 Classificatie beoordeelde trends omstreeks 1972 en 2002

Duidelijke trend
Duidelijke trend, maar eventueel andere trend mogelijk
Onduidelijke trend

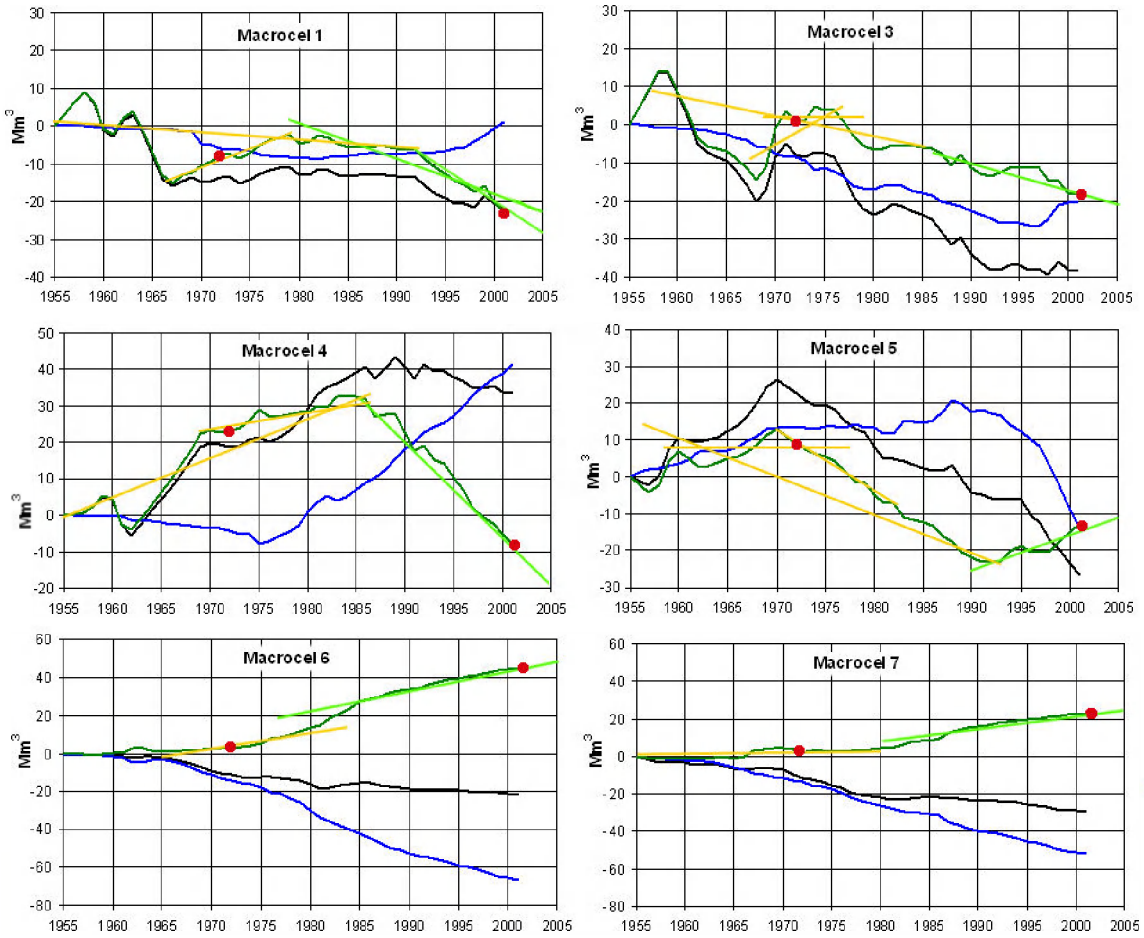
6.2 Zandbalans macrocellen

In Figuur 6.1 zijn de sedimentatie/erosie trends in 1972 en 2002 bepaald op basis van de gemeten natuurlijke volumeveranderingen (V_{nat}) van de afzonderlijke macrocellen. De volgende trends kunnen worden waargenomen:

- Cel 1: duidelijk trendverschil tussen 1972 en 2002. Sedimentatie in 1972 en erosie in 2002. Het trendverschil kan eventueel kleiner worden indien rekening wordt gehouden met een zekere bandbreedte en onnauwkeurigheid van de data vóór 1980.
- Cel 3: in 2002 vindt erosie plaats. Meerdere interpretaties zijn mogelijk m.b.t. de volumeontwikkeling in 1972. Afhankelijk van de beschouwde periode, kunnen de volgende trends worden waargenomen: erosie (1970-2000), sedimentatie (1969-1975) of geen verandering (1970 – 1977).
- Cel 4: sedimentatie in 1972 en erosie in 2002. Zeer duidelijk trendverschil tussen beide jaren. Er is geen andere interpretatie mogelijk.
- Cel 5: duidelijk trendverschil tussen 1972 en 2002. Erosie in 1972 en sedimentatie in 2002. Het trendverschil kan eventueel kleiner worden als rekening wordt gehouden met een zekere bandbreedte en onnauwkeurigheid van de data omstreeks 1972.
- Cel 6: in zowel 1972 als in 2002 vindt sedimentatie plaats. In 2002 is deze trend groter dan in 1972, maar ook hier is geen sprake van een duidelijk trendverschil.
- Cel 7: in 1972 is het sedimentvolume nagenoeg stabiel en in 2002 vindt sedimentatie plaats. In 2002 is de cel ten opzichte van 1972 meer gaan sedimenteren. Van een duidelijke trendverschil is geen sprake.

Figuur 6.1 Het bepalen van het natuurlijke sedimentvolume ontwikkeling in 1972 en 2002

V_{nat} is groen. V_i is blauw, V_{tot} is zwart. Mogelijke trendlijnen rond 1972 zijn geel, de trendlijnen rond 2002 groen. Een stijgende lijn is sedimentatie, een dalende lijn erosie. Let op: de figuur van cel 6 en 7 heeft een kleinere schaal.



In Tabel 6.2 zijn de waargenomen sedimentatie/erosie trends samengevat en beoordeeld op betrouwbaarheid van trends.

Tabel 6.2 Volumeontwikkeling in 1972 en 2002 op basis van meetdata

	1972	2002	Verschil 1972-2002
Cel 1	Sedimentatie (1Mm³/jr)	Erosie (0,5 - 1,5 Mm³/jr)	Meer erosie in 2002
	Variatie: Sedimentatie tot licht erosie		Variatie: meer erosie tot omslag van sedimentatie naar erosie in 2002
Cel 3	stabiel of erosie (tot 1,0 Mm³/jr)	Erosie (1,0 - 2 Mm³/jr)	Meer erosie in 2002
	Variatie: Sedimentatie tot erosie		Variatie: Omslag van sedimentatie naar erosie tot nauwelijks verschil
Cel 4	Sedimentatie (0,5 tot 1 Mm³/jr)	Erosie (2,5 Mm³/jr)	Meer erosie in 2002 (omslag)

Cel 5	Erosie ($1,5\ Mm^3/jr$)	Sedimentatie ($1\ Mm^3/jr$)	Meer sedimentatie in 2002
	Variatie: Stabiel tot erosie		Variatie: meer sedimentatie tot omslag van erosie naar sedimentatie in 2002
Cel 6	Sedimentatie ($0,5$ tot $1,0\ Mm^3/jr$)	Sedimentatie ($1\ Mm^3/jr$)	Meer sedimentatie in 2002
			Variatie: Nauwelijks verschil tot meer sedimentatie in 2002
Cel 7	Stabiel	Sedimentatie ($0,5$ - $1\ Mm^3/jr$)	Meer sedimentatie in 2002
		Variatie: stabiel tot sedimentatie	Variatie: Nauwelijks verschil tot meer sedimentatie in 2002

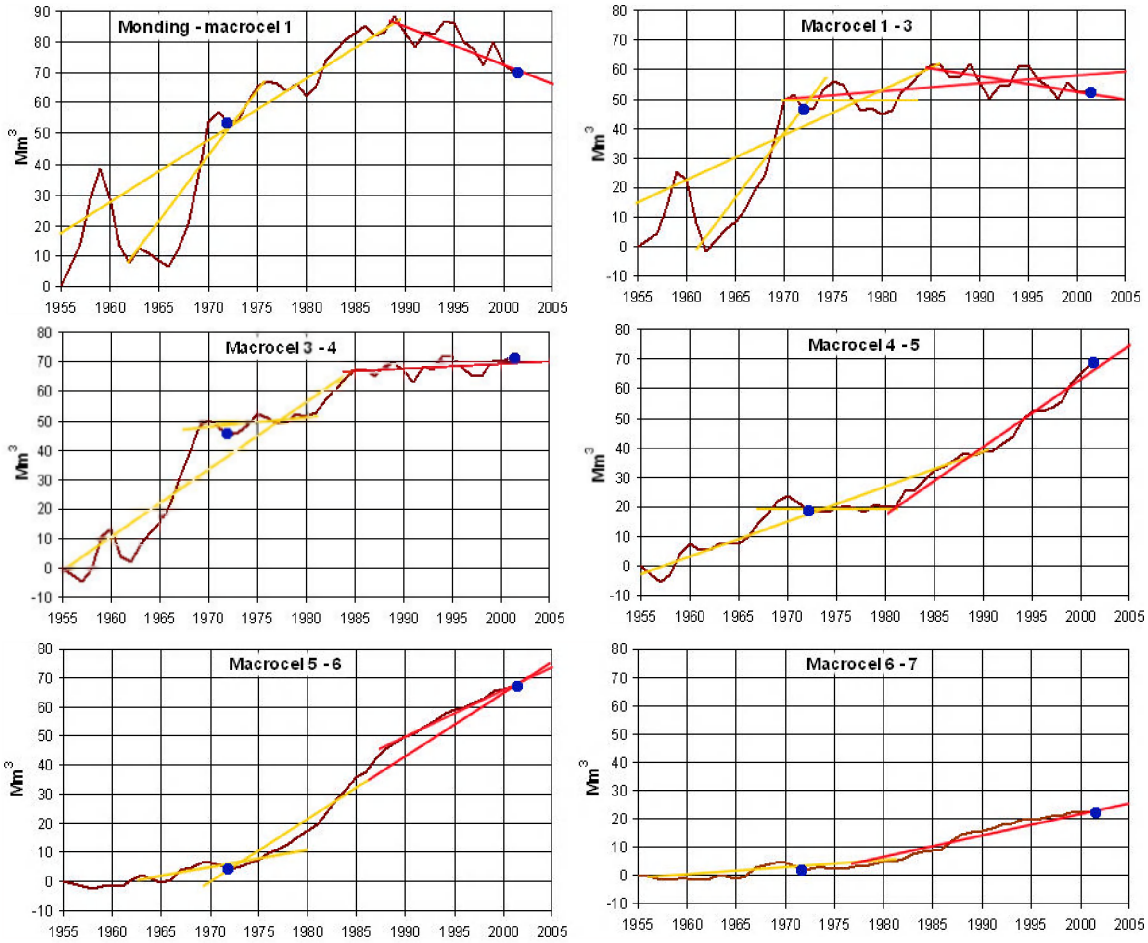
Over het algemeen zijn in 2002 de trends het duidelijkst waar te nemen. Wat betreft de trendverschillen laten cel 1, 4 en 5 een duidelijke omslag zien.

6.3 Sedimentuitwisseling tussen cellen

Voor de uitwisseling van sediment tussen de cellen is dezelfde analyse uitgevoerd als in paragraaf 6.2 (Figuur 6.2). Dit geeft een beeld van de natuurlijke verplaatsing van sediment door het estuarium in 1972 en 2002 en het verschil daartussen.

Figuur 6.2 Het bepalen van de sedimentuitwisseling tussen macrocellen in 1972 en 2002

Mogelijke trendlijnen rond 1972 zijn **geel**, de trendlijnen rond 2002 zijn **rood**. Een stijgende lijn is landwaarts transport, een dalende lijn is zeewaarts transport. Alle figuren hebben een gelijke schaal.



Monding – cel 1: Een duidelijk trendverschil is waar te nemen. Landwaarts gericht transport in 1972 en zeewaarts gericht transport in 2002.
Cel 1-3: In 1972 zijn meerdere trends waar te nemen: landwaarts gericht transport of geen uitwisseling. Ook in 2002 zijn meerder interpretaties mogelijk: landwaarts gericht of zeewaarts gericht transport. In eerste instantie lijkt het landwaarts gericht transport te zijn afgenomen in 2002, maar het zou ook kunnen dat de uitwisseling van sediment nauwelijks is veranderd. Van een zeer duidelijk trendverschil is geen sprake.
Cel 3-4: In zowel 1972 als in 2002 vindt een landwaarts gericht transport plaats. Er is nauwelijks een trendverschil tussen beide jaren. Eventueel kan de trend worden bepaald op basis van periode 1955 – 1985. In dat geval heeft een afname van landwaarts gericht transport plaatsgevonden.
Grens cel 4-5: Geen sedimentuitwisseling in 1972 tussen cel 4 en 5. In 2002 vindt landwaarts gericht transport plaats. Er is sprake van een duidelijk trendverschil. Het trendverschil kan eventueel kleiner worden als

in 1972 ook een landwaarts gericht transport heeft plaatsgevonden, maar deze is nog altijd minder groot dan in 2002.
Grens cel 5-6: Hier geldt hetzelfde als op grens cel 6-7.
Grens cel 6-7: In 1972 en 2002 is het transport landwaarts gericht. In 2002 is het transport groter dan in 1972. Van een duidelijk trendverschil is geen sprake.

In Tabel 6.3 zijn de transportrichtingen per grens tussen cellen samengevat en beoordeeld op betrouwbaarheid.

Tabel 6.3 Richting sedimenttransport tussen cellen in 1972 en 2002 volgens meetdata

	1972	2002	Verschil 1972-2002
Monding – Cel 1	Landwaarts (2,0 - 3,5 Mm^3/jr)	Zeewaarts (1,5 Mm^3/jr)	Meer zeewaarts in 2002 (omslag)
Cel 1-3	Landwaarts (tot 2,5 Mm^3jr) Variatie: stabiel tot landwaarts	Stabiel Variatie: 0,5 Mm^3/jr landwaarts tot 0,5 Mm^3/jr zeewaarts)	Minder landwaarts in 2002 Variatie: Nauwelijks verschil tot omslag van landwaarts naar zeewaarts
Cel 3-4	Landwaarts (0,5 - 2,0 Mm^3/jr)	Landwaarts (tot 1,0 Mm^3/jr) Stabiel tot landwaarts	Nauwelijks verschil Nauwelijks verschil tot minder landwaarts in 2002
Cel 4-5	Stabiel Variatie: Stabiel tot 1,5 Mm3/jr landwaarts	Landwaarts (2,5 Mm^3/jr)	Meer landwaarts in 2002
Cel 5-6	Landwaarts (0,5 – 2,3 Mm^3/jr)	Landwaarts (1,5 tot 2,3 Mm^3/jr)	Meer landwaarts in 2002 Variatie: nauwelijks verschil tot meer landwaarts in 2002
Cel 6-7	Stabiel Variatie: stabiel tot 0,5 Mm3/jr landwaarts	Landwaarts (0,5 tot 1 Mm^3/jr)	meer landwaarts in 2002 Variatie: Nauwelijks verschil tot meer landwaarts in 2002
Cel 7-België	0	0	0

Deze trends zijn mede gebaseerd op de aanname dat geen sedimentuitwisseling plaatsvindt tussen Nederland en België. In werkelijkheid vindt waarschijnlijk een landwaarts transport plaats. De focus moet daarom liggen op de (duidelijke) veranderingen tussen 1972 en 2002. Het sedimenttransport tussen cel 4 en 5 en tussen cel 1 en monding laten een duidelijk trendverschil zien tussen 1972 en 2002. De uitwisseling van sediment over de overige grenzen hebben meestal wel een duidelijke trend in een individueel jaar, maar laten geen grote trendverschillen tussen de jaren zien.

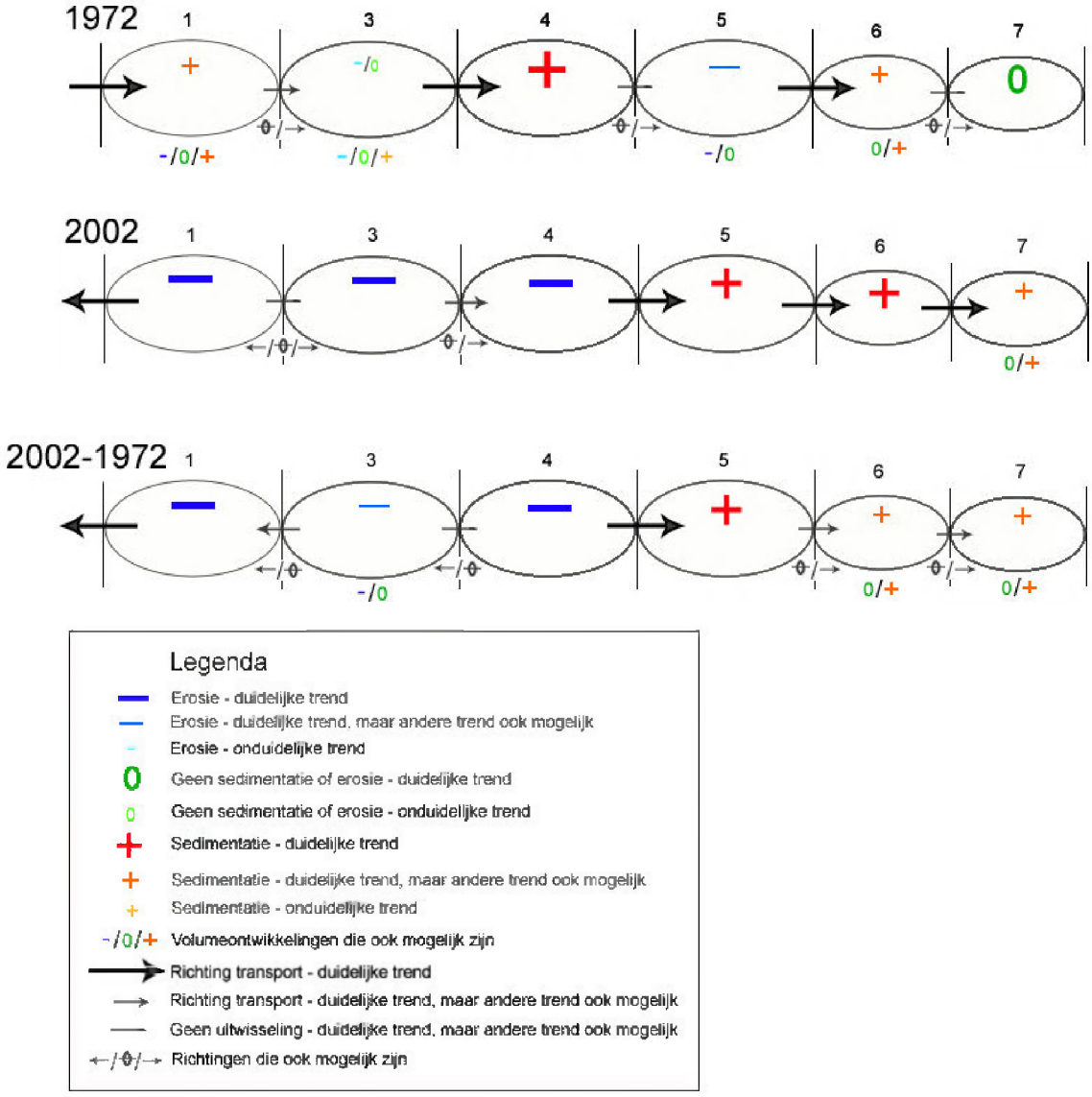
6.4 Conclusie data analyse

De uitkomsten van de data analyse in paragraaf 6.2 en 6.3 zijn geschematiseerd weergegeven in Figuur 6.3. De grootte van de symbolen geeft aan hoe betrouwbaar de waargenomen trend is. Indien eventueel

andere trends kunnen worden waargenomen, zijn deze ook weergegeven (onder de figuur).

In 1972 is het transport overwegend landwaarts gericht. Cellen 1, 4 en 6 zanden aan en cel 5 erodeert. In 2002 is het transport in het oostelijk deel landwaarts gericht en vindt sedimentatie plaats (cellen 5, 6 en 7). In het westelijk en midden deel is het transport voornamelijk zeewaarts gericht en vindt erosie plaats (cel 1, 3 en 4). De trends in 2002 zijn over het algemeen betrouwbaarder en duidelijker waarneembaar dan in 1972. Met betrekking tot de trendverschillen is het zandvolume in het oostelijk deel toegenomen (sedimentatie) en in het westelijk en midden deel afgenomen (erosie). In het westen wordt het sediment meer richting monding getransporteerd en in het oostelijk deel meer richting België.

Figuur 6.3 Geschematiseerde 1-dimensionale zandbalans voor 1972, 2002 en verschil tussen 1972 en 2002 op basis van meetdata



In cel 1, 4 en 5 is een duidelijk trendverschil waar te nemen wat betreft erosie/sedimentatie. Dit is met name het geval in cel 4. De sedimentuitwisseling op grenzen cel 1-monding en cel 4-5 laten ook een duidelijke trendverandering zien. Indien de bodemligging dominant is voor het getijgedreven transport zijn de volgende uitkomsten te verwachten uit de modelsimulaties:

- Grens cel 1 – monding: Omslag van landwaarts transport in 1972 naar zeewaarts transport in 2002 (of duidelijke afname van landwaarts transport of duidelijke toename van zeewaarts transport in 2002 t.o.v 1972).
- Cel 1: Omslag van sedimentatie in 1972 naar erosie in 2002 (of duidelijke toename van erosie of duidelijke afname van sedimentatie)
- Cel 4: Omslag van sedimentatie in 1972 naar erosie in 2002 (of duidelijke toename van erosie of duidelijke afname van sedimentatie)
- Grens cel 4 – 5: Toename landwaarts transport in 2002 (of duidelijke afname van zeewaarts transport).
- Cel 5: Omslag van erosie in 1972 naar sedimentatie in 2002, of duidelijke afname van erosie, of duidelijke toename van sedimentatie.

7 Analyse modelresultaten

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden een aantal modelresultaten van de waterweging met de bodem uit 1972 en 2002 gegeven (paragraaf 7.2). Dit geeft een indicatie van de betrouwbaarheid van het model en het geeft inzicht in de veranderingen van de waterbeweging als gevolg van de veranderde bodemligging. Ook is in dit hoofdstuk het horizontale getij geanalyseerd. De bijdragen van de verschillende interacties (bijvoorbeeld M_0M_2 en M_2M_4) aan het residuele sedimenttransport op de lange termijn zijn bepaald (paragraaf 7.3) en tevens is de invloed van de bodemligging op de veranderingen van de verschillende termen onderzocht. In paragraaf 7.4 zijn de bruto transporten (=transport in ebrichting + transport in vloedrichting) van 1972 en 2002 geanalyseerd en dan met name het verschil tussen deze jaren.

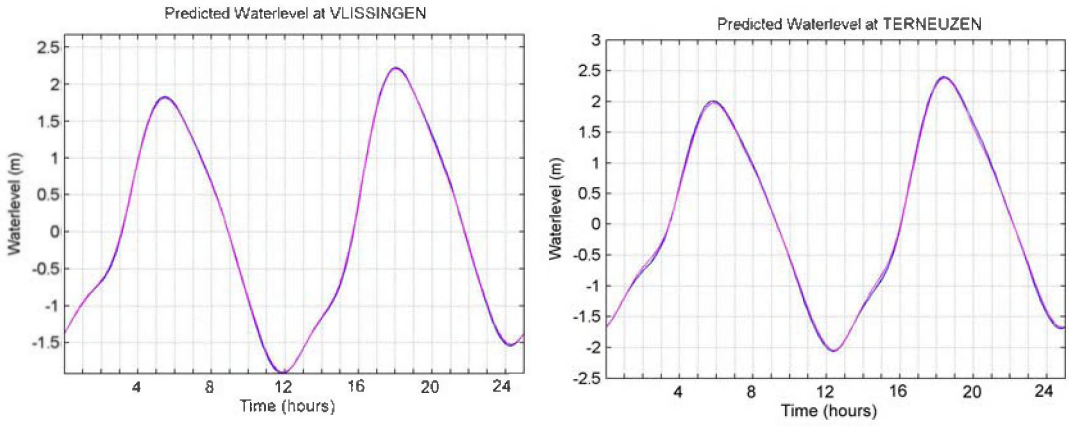
7.2 Waterbeweging 1972 en 2002

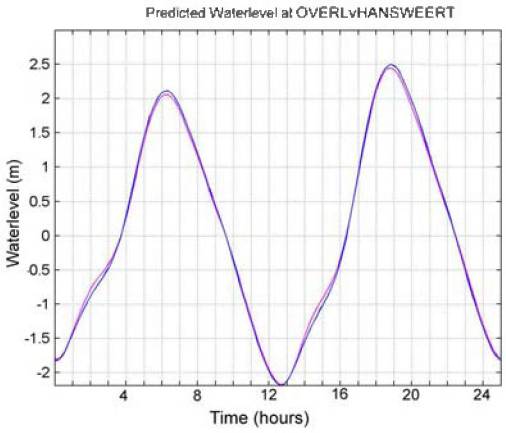
7.2.1 Verticaal getij

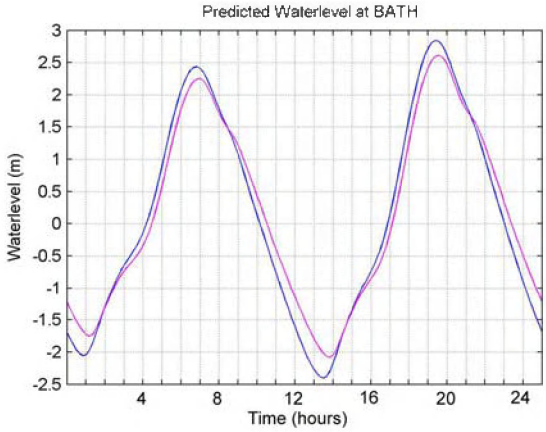
Het waterstandsverloop berekend met het model is gegeven in Figuur 7.1 voor de stations Vlissingen, Terneuzen, Overloop van Hansweert en Bath.

Figuur 7.1 Waterstandsverloop gedurende 25 uur in model voor een aantal stations

Roze is 1972, blauw is 2002.





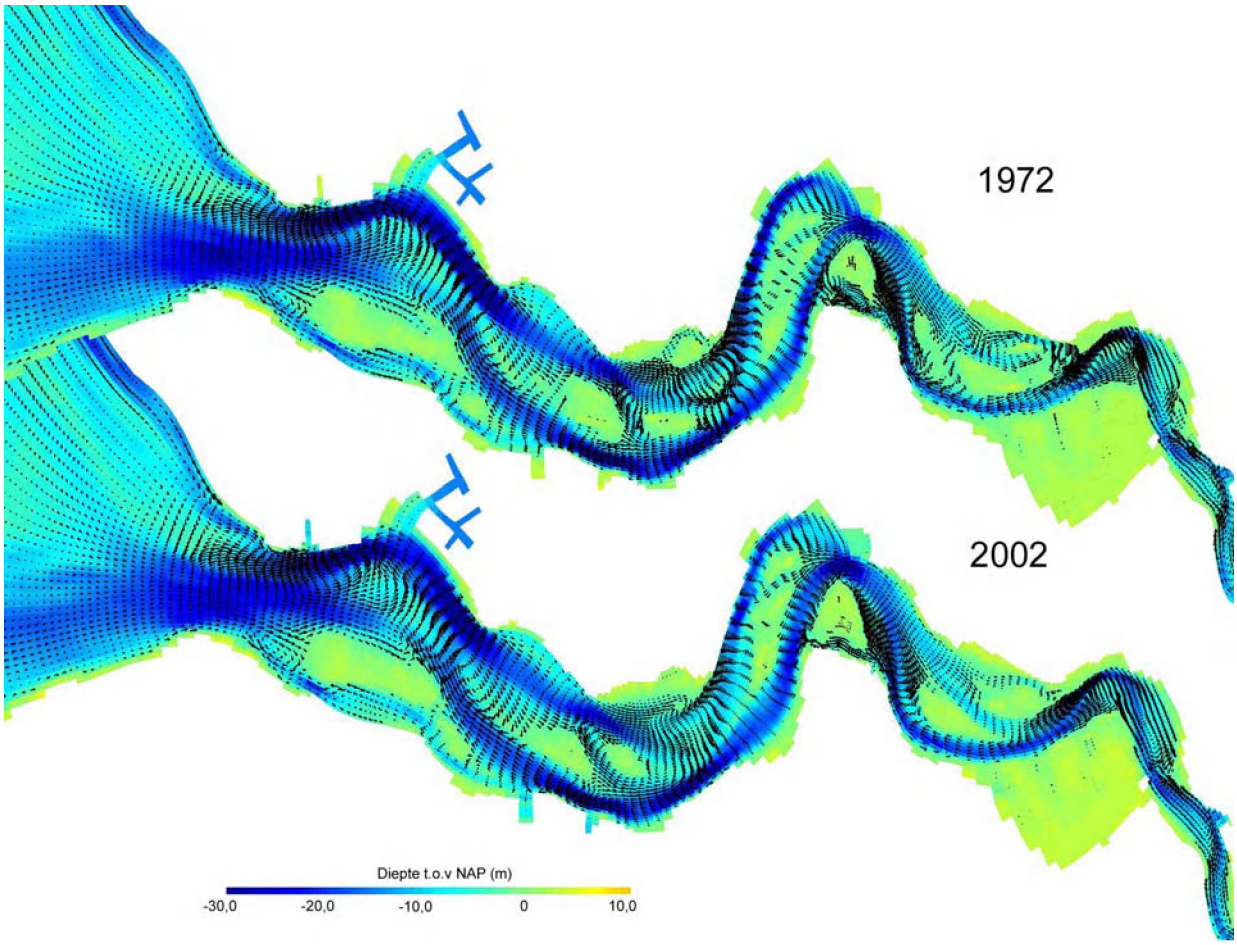


In het model is de getijslag bij Vlissingen ongeveer 3,7 meter. Dit geldt voor de simulatie met een bodem uit 1972 en met een bodem uit 2002. De getijslag in het model is bij Terneuzen circa 4,0 m en bij de Overloop van Hansweert circa 4,3 m. Deze zijn tussen 1972 en 2002 ook nauwelijks veranderd. Bij Bath heeft de bodemligging wel een effect op de getijslag. In 2002 is de getijslag met ongeveer 12% vergroot van circa 4,3 meter in 1972 naar 4,8 m in 2002. In werkelijkheid is de getijslag met ongeveer 6% vergroot. Ook treedt bij Bath de eb en vloed in 2002 eerder op dan in 1972. Terwijl het model gekalibreerd is, wijkt de getijslag dus af van de meetwaarden. Verdere onderzoek is gedaan (Bijlage G), maar wordt in het hoofdonderzoek buiten beschouwing gelaten.

7.2.2 Stromingspatronen

Wanneer de residuele stroming over twee getijperioden wordt berekend zijn de circulatiecellen met eb- en vloedgeulen duidelijk zichtbaar (Figuur 7.2). De maximale dieptegemiddelde vloed- en ebsnelheden zijn in de orde van 1,0 tot 1,5 m/s.

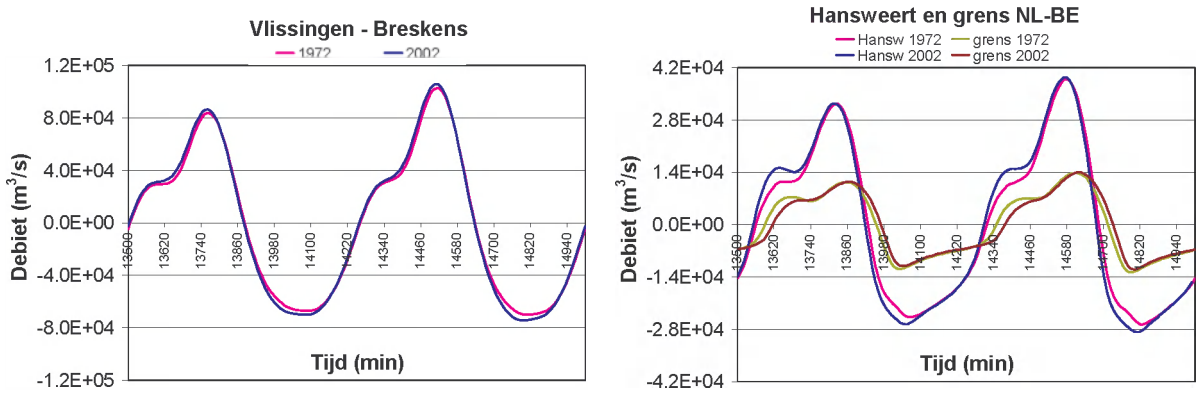
Figuur 7.2 Residuele stroming over twee getijperioden



7.2.3 Debiet

In Figuur 7.3 is het debietverloop gegeven ter hoogte van Vlissingen, Hansweert en op de grens tussen Nederland en België. In oostelijke richting nemen het eb- en vloeddebiet af. Bij Hansweert is het maximale debiet ongeveer een factor 2,5 kleiner dan het maximale debiet bij Vlissingen. Bij de grens Nederland-België is het maximale debiet ongeveer 7 keer kleiner dan bij Vlissingen.

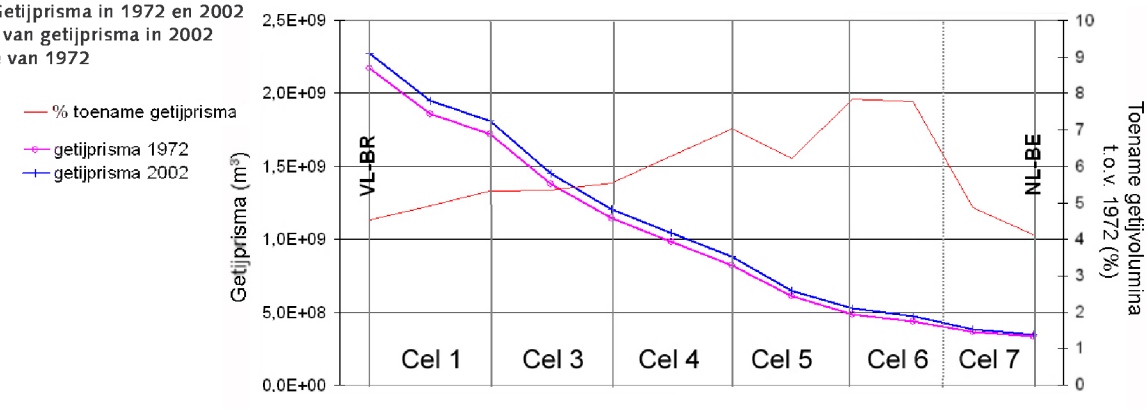
Figuur 7.3 Debiet door raaien ter hoogte van Vlissingen (links) en ter hoogte van Hansweert en de grens tussen Nederland en België (rechts)



Door de veranderingen in de bodemligging zijn het maximale eb- en vloeddebiet toegenomen. In het oostelijk deel (rechter figuur) is voornamelijk het maximale ebdebiet toegenomen. Bij de grens Nederland-België treden eb en vloed in 2002 eerder op dan in 1972. Bij Hansweert is dit niet waarneembaar.

Het getijprisma is berekend door de absolute waarden van het eb- en vloeddebiet te integreren in de tijd. Dit is voor een aantal raaien in het estuarium gedaan (Figuur 7.4).

Figuur 7.4 Getijprisma in 1972 en 2002 en toename van getijprisma in 2002 ten opzichte van 1972



Het getijprisma neemt af in oostelijke richting van ongeveer $2,2*10^9$ m^3 bij Vlissingen tot ongeveer $0,3*10^9 m^3$ bij de grens met België. Het getijprisma is in 2002 t.o.v 1972 toegenomen als gevolg van de veranderde bodemgeometrie. Deze toename varieert tussen de 4 en 8%.

7.3 Analyse horizontaal getij 1972 en 2002

7.3.1 Inleiding

Het lokale sedimenttransport is direct gerelateerd aan de horizontale getij-asymmetrie. Door Van der Kreeke en Robaczewska (1993) is aangetoond dat het getijgemiddelde (bodem)transport op de lange termijn,

geformuleerd door u^n, wordt bepaald door de componenten M_0, M_2 en hogere componenten (M_4, M_6, etc) in de stroomsnelheidcurve. Zie ook paragraaf 2.4.4. Het sedimenttransport op de lange termijn wordt bepaald enerzijds door de M_0M_2 interactie en anderzijds door de interactie van M_2 met hogere componenten. Uit een studie van Jeuken en Wang (2000) blijkt dat de M_0M_2-interactie een belangrijke bijdrage kan leveren aan het residuele sedimenttransport in de Westerschelde op zowel macro- als megaschaal. In deze studie zijn ook de bijdrage van de M_2M_4-interactie en de $M_2M_4M_6$-interactie onderzocht. Deze leveren mogelijk op mega-schaal een bijdrage.

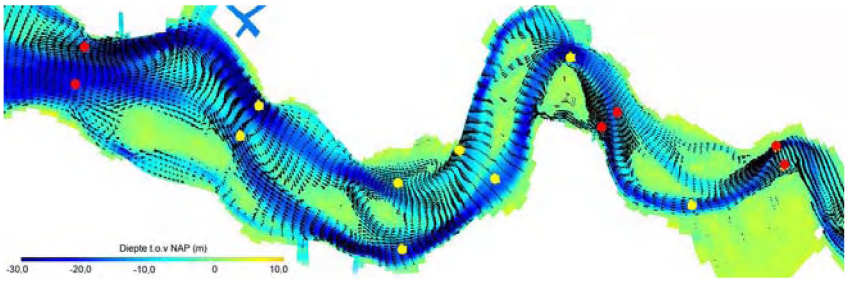
Voor een aantal locaties in de Westerschelde is de bijdrage van de M_0M_2-interactie, de M_2M_4-interactie en de $M_2M_4M_6$-interactie bepaald. Hiervoor is een harmonische analyse uitgevoerd van de lokale (stroom)snelheidscurve, zodat de amplitudes en fasen van de verschillende componenten berekend kunnen worden. Niet alleen de bijdragen van de verschillende interacties aan het sedimenttransport kunnen worden bepaald, maar ook het verschil tussen de uitkomsten bij de modelsimulatie van 1972 en 2002. Hierdoor kan worden onderzocht wat de invloed is van de bodemligging op de verschillende bijdragen.

7.3.2 Methode van analyse

Voor een aantal locaties in de Westerschelde is de analyse uitgevoerd (Figuur 7.5). De punten zijn gekozen in het midden van de geulen. In deze paragraaf worden de resultaten van de volgende locaties toegelicht:

- Twee punten op de raai Vlissingen-Breskens: in de ebgeul (Honte) en in de vloedgeul (Schaar van Spijkerplaat).
- Twee punten op een raai ter hoogte van Perkpolder (in cel 5): in de ebgeul (Zuidergat) en in de vloedgeul (Schaar van Waarde).
- Twee punten op een raai bij Bath (in cel 6): in de ebgeul (Nauw van Bath) en in de vloedgeul (Schaar van de Noord).

Deze punten zijn in het rood aangegeven in Figuur 7.5. De resultaten van de overige punten (in het geel) zijn gegeven in Bijlage G.



Figuur 7.5 Locaties waar de snelheidsvectoren zijn geanalyseerd

Locaties met rood aangegeven worden hier behandeld. Voor de overige locaties (geel) zie Bijlage G.

De resultaten kunnen representatief zijn voor de geul op deze raai, maar dit is niet met zekerheid te zeggen. Een punt naast of vlakbij een berekend punt kan andere uitkomsten geven. Er is geen rekening gehouden met een zogenaamde getij-ellips. Dat is de ellipsvormige weergave van de snelheidsvectoren gedurende een getijperiode. Alleen de snelheidscomponent evenwijdig aan de roosterlijn, die in de lengterichting van de geul loopt, wordt gebruikt bij de analyse.

De amplitudes en fasen van de afzonderlijke componenten worden verkregen door een tijdreeks van de stroomsnelheid harmonisch te analyseren. De amplitudes en fasen van de M_2-, M_4- en M_6-component worden gebruikt om de bijdragen met de transportformulering u^3 te berekenen (Vergelijking 7.1).

Vergelijking 7.1 Bijdragen aan het sedimenttransport (S/α) op de lange termijn door de M_0M_2-interactie, M_2M_4 –interactie en $M_2M_4M_6$-interactie

$$M_0M_2 = \hat{u}_2^2 \frac{3}{2} u_0$$

$$M_2M_4 = \hat{u}_2^2 \frac{3}{4} \hat{u}_4 \cos\varphi_{2-4}$$

$$M_2M_4M_6 = \hat{u}_2^2 \frac{3}{2} \hat{u}_4 \hat{u}_6 \cos(\varphi_{M2M4} - \varphi_{M2M6})$$

$$S/\alpha = M_0M_2 + M_2M_4 + M_2M_4M_6 = M_0M_2M_4M_6$$

Waarin;

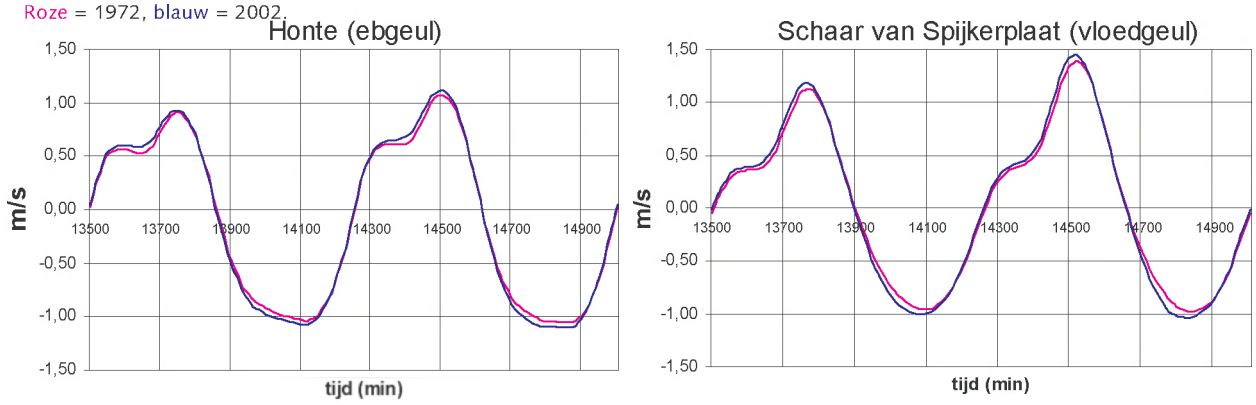
S = residueel sedimenttransport op de lange termijn [kg/m²/s]
α = schalingsfactor
u_0 = residuele stromingscomponent M_0 [m/s]
$\hat{u}_2$ = amplitude M_2-component [m/s]
$\hat{u}_4$ = amplitude M_4-component [m/s]
φ_{2-4} = faseverschil tussen M_2 en M_4-component [rad]
$= (\varphi_4 - 2*\varphi_2)$
φ_4 = fase M_4-component [rad]
φ_2 = fase M_2-component [rad]
$\hat{u}_6$ = amplitude M_6-component [m/s]
φ_{2-6} = faseverschil tussen M_2 en M_6-component [rad]
$= (\varphi_6 - 3*\varphi_2)$
φ_6 = fase M_6-component [rad]

7.3.3 Resultaat

Het horizontale getij voor de punten op de raai Vlissingen-Breskens en de bijdragen van de verschillen interacties zijn gegeven in Figuur 7.6 respectievelijk Figuur 7.7. In de ebgeul wordt het residuele sedimenttransport lokaal gedomineerd door de M_0M_2-interactie. In het punt in de vloedgeul is naast de M_0M_2-interactie tevens de $M_2M_4M_6$-interactie van belang voor het residuele sedimenttransport. Mogelijk speelt wrijving hier een grote(re) rol. De M_2M_4-interactie is in beide geulen ebdominant en de $M_2M_4M_6$ is in beide geulen vloeddominant. De interacties zijn nauwelijks veranderd als gevolg van de bodemverandering. In de ebgeul is een lichte toename van het ebtransport waar te nemen als gevolg van een lichte toename van de M_0M_2 interactie.

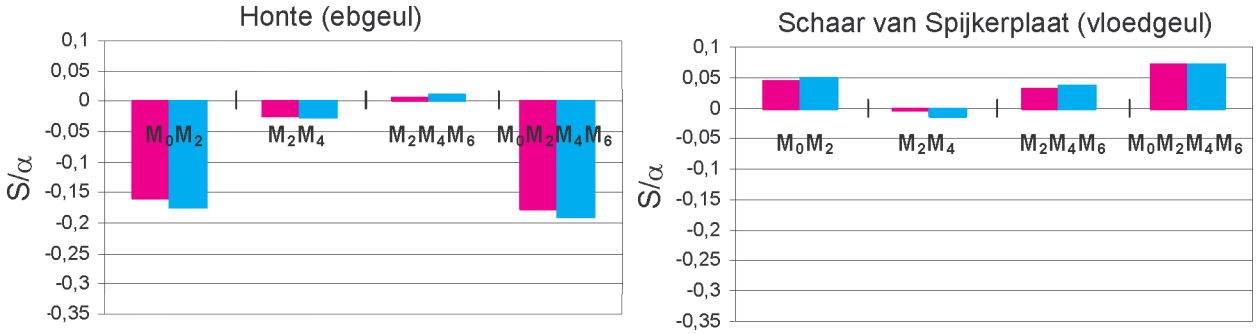
Figuur 7.6 Lokale stroomsnelheid in de eb- en vloedgeul op raai Vlissingen-Breskens berekend met model

Roze = 1972, blauw = 2002.



Figuur 7.7 Lokale bijdragen aan het sedimenttransport (S/α) op de lange termijn op raai Vlissingen-Breskens

Roze is 1972, blauw is 2002.



Wanneer de amplitudes en fasen van de afzonderlijke componenten wordt bekeken, vallen een aantal dingen op (Tabel 7.1). De lichte toename van de ebdominante M_0M_2-interactie in de Honte wordt veroorzaakt door een toename van de amplitude van de M_2-component. De M_0 is gelijk gebleven. Het snelheidsverloop van het punt in de ebgeul verschilt van die van het punt in de vloedgeul. Dit verschil wordt vooral veroorzaakt door een andere M_0 en door een andere M_4-component (zowel amplitude als relatieve fase).

Tabel 7.1 Amplitudes en faseverschillen van de verschillende componenten behorende bij de tijdreeksen van Figuur 7.6

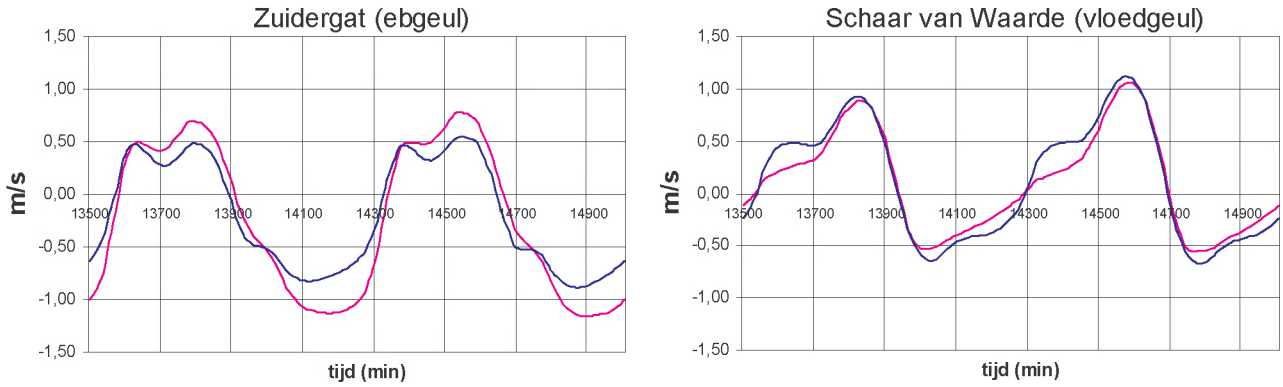
Honte (ebgeul)				
1972	u_0 = -0,10 m/s	$\hat{u}_2$ = 1,03 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,06 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,20 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = 2,08 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 0,8 rad
2002	u_0 = -0,10 m/s	$\hat{u}_2$ = 1,08 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,07 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,19 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = 2,03 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 1,05 rad
Schaar van Spijkerplaat (vloedgeul)				
1972	u_0 = 0,03 m/s	$\hat{u}_2$ = 0,99 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,19 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,16 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = 1,6 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 0,84 rad
2002	u_0 = 0,03 m/s	$\hat{u}_2$ = 1,05 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,20 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,15 m/s

	$\varphi_{2\text{-}4}$ = 1,65 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 0,94 rad

Dezelfde analyse is gedaan voor de twee punten in cel 5, ter hoogte van Perkpolder (Figuur 7.8 en Figuur 7.9).

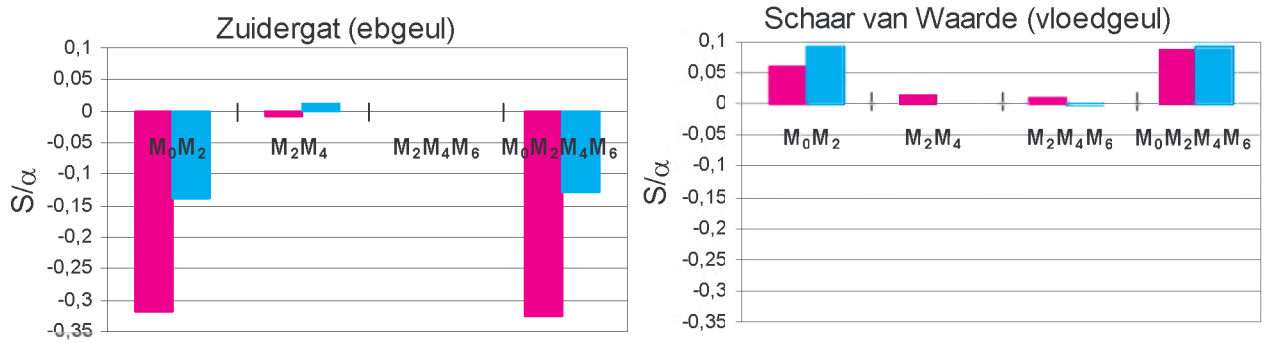
Figuur 7.8 Lokale stroomsnelheid in de eb- en vloedgeul op raai ter hoogte van Perkpolder (cel 5) berekend met model

Roze = 1972, blauw = 2002.



Figuur 7.9 Lokale bijdragen aan het sedimenttransport (S/α) op de lange termijn op raai ter hoogte van Perkpolder (cel 5)

Roze is 1972, blauw is 2002.



In deze punten is de M_0M_2-interactie dominant voor de grootte en richting van het residuele sedimenttransport. De bodemligging heeft in het punt in het Zuidergat een sterke afname van het ebgerichte sedimenttransport veroorzaakt. Dit komt doordat zowel de M_0 als de M_2-amplitude is afgenomen (Tabel 7.2). In de Schaar van Waarde wordt een verandering van de M_0M_2-interactie vrijwel geheel gecompenseerd door een verandering in de M_2M_4- en $M_2M_4M_6$-interacties. De getij-amplitude ($\hat{u}_2$) is toegenomen, net als de amplitude van het M_6-getij. De amplitude van de M_4 is juist afgenomen.

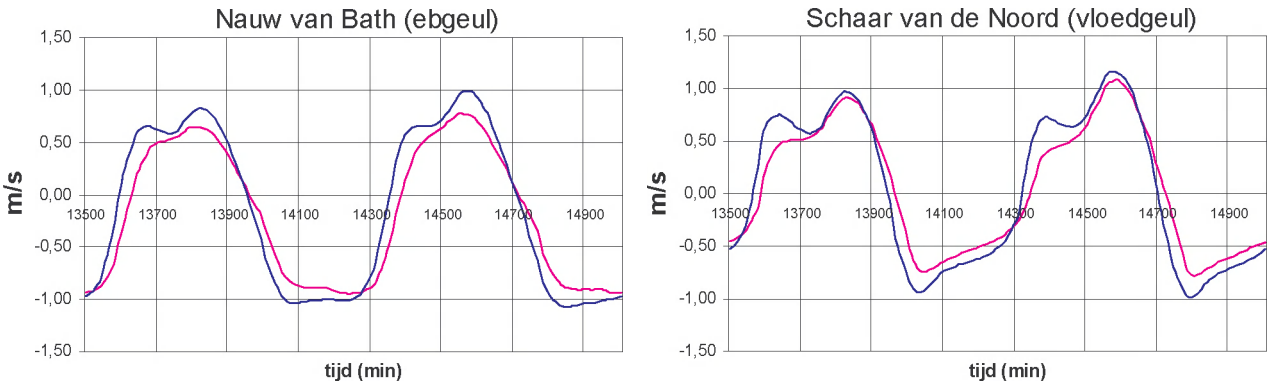
Tabel 7.2 Amplitudes en faseverschillen van de verschillende componenten behorende bij de tijdreeksen van Figuur 7.8

Zuidergat (ebgeul)				
1972	u_0 = -0,23 m/s	$\hat{u}_2$ = 0,96 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,07 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,13 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = -1,75 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 2,96 rad
2002	u_0 = -0,19 m/s	$\hat{u}_2$ = 0,70 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,03 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,13 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = -1,50 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 3,26 rad
Schaar van Waarde (vloedgeul)				
1972	u_0 = 0,11 m/s	$\hat{u}_2$ = 0,60 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,27 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,14 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = 1,34 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ =0,12 rad
2002	u_0 = 0,12 m/s	$\hat{u}_2$ = 0,72 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,20 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,19 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = 1,57 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = -0,02 rad

Tenslotte zijn ook de resultaten voor twee punten in cel 6 gegeven (Figuur 7.10 en Figuur 7.11).

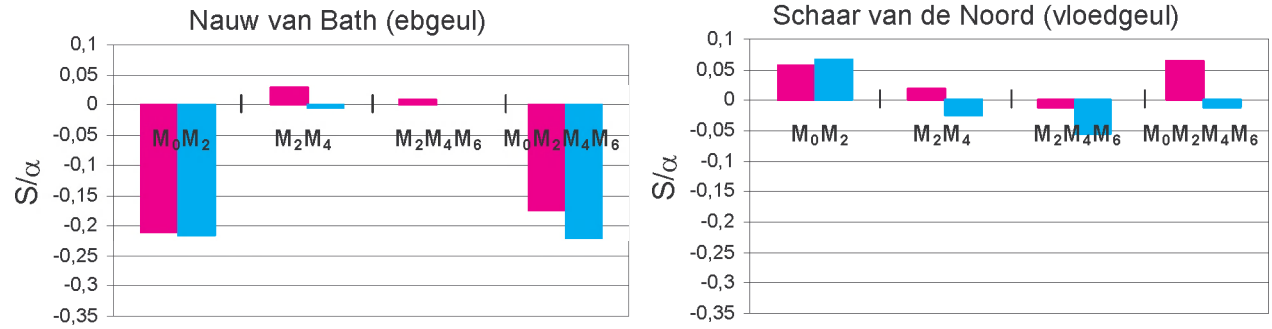
Figuur 7.10 Lokale stroomsnelheid in de eb- en vloedgeul op raai in cel 6

Roze = 1972, blauw = 2002.



Figuur 7.11 Lokale bijdragen aan het sedimenttransport (S/α) op de lange termijn door de verschillende interacties op raai in cel 6

Roze is 1972, blauw is 2002.



Hier speelt ook de M_0M_2-interactie een grote rol voor het sedimenttransport. In het punt in de Schaar van Noord kunnen ook de overige termen een rol spelen. Het verschil tussen 1972 en 2002 wordt op beide locaties veroorzaakt door een verandering in de interactie met de hogere harmonischen. In de ebgeul is dat vooral de M_2M_4-interactie en in de vloedgeul zijn dat beide termen. Het sedimenttransport in 2002 is in de Schaar van de Noord niet meer vloeddominant, maar ebdominant. Deze ebdominantie wordt veroorzaakt door het relatieve faseverschil tussen M_2-M_4 en tussen M_2-M_6 (Tabel 7.3).

Tabel 7.3 Amplitudes en faseverschillen van de verschillende componenten behorende bij de tijdreeksen van Figuur 7.10

Nauw van Bath (ebgeul)				
1972	u_0 = -0,18 m/s	$\hat{u}_2$ = 0,88 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,07 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,10 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = 0,40 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = -0,80 rad
2002	u_0 = -0,13 m/s	$\hat{u}_2$ = 1,05 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,01 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,17 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = -0,38 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 2,06 rad
Schaar van de Noord (vloedgeul)				
1972	u_0 = 0,06 m/s	$\hat{u}_2$ = 0,80 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,17 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,15 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = -0,53 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 1,34 rad
2002	u_0 = 0,05 m/s	$\hat{u}_2$ = 0,95 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,16 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,26 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = -0,88 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = 1,80 rad

De verandering van het transport in het punt in de Schaar van de Noord wordt mogelijk veroorzaakt door een geulverplaatsing. In 1972 ligt het gekozen punt midden in de geul, maar in 2002 ligt de vloedgeul wat noordelijker waardoor het punt mogelijk aan de rand van de geul ligt. Het transport in 1 punt hoeft dus niet representatief te zijn voor het transport in de gehele geul. Hiervoor moeten de transporten in de eb- en vloedgeul worden bekeken.

7.3.4 Conclusie

In Tabel 7.4 zijn de dominante interacties voor het residuele sedimenttransport in beide jaren samengevat. Ook is de oorzaak van het verschil tussen 1972 en 2002 (mits waarneembaar) opgenomen in de tabel.

Tabel 7.4 Samenvatting analyse van horizontaal getij in een aantal punten op basis van modelberekeningen

	Punt in...	Belangrijke bijdrage aan het lokale, residuele transport	Oorzaak verschil tussen 1972 en 2002
Vl-Br	ebgeul	M_0M_2	M_0M_2
	vloedgeul	M_0M_2, M_2M_4	-
Perkpolder (cel 5)	ebgeul	M_0M_2	M_0M_2
	vloedgeul	M_0M_2	M_0M_2, M_2M_4, $M_2M_4M_6$
Bath (cel 6)	ebgeul	M_0M_2	M_2M_4
	vloedgeul	M_0M_2, M_2M_4, $M_2M_4M_6$	M_2M_4, $M_2M_4M_6$

Op vrijwel alle locaties speelt de M_0M_2-interactie een dominante rol voor het residuele sedimenttransport op de lange termijn. Dit is ook het geval in de punten die zijn opgenomen in Bijlage G. De M_0M_2-interactie bepaalt in veel gevallen de grootte en richting van het sedimenttransport. Dit was ook geconcludeerd in de studie van Jeuken en Wang (2000). In een aantal gevallen (bijvoorbeeld grens 4-5 en 405, zie Bijlage G) is de M_2M_4-interactie en de $M_2M_4M_6$-interactie mede bepalend voor de grootte en richting van het residuele sedimenttransport.

Een andere bodemligging (2002 i.p.v. 1972) veroorzaakt in het ene punt een verandering in de residuele stromingsterm M_0M_2 en in een andere punt een verandering in de term(en) met de hogere harmonischen (M_2M_4 en/of $M_2M_4M_6$). Bij de punten die meer in het oosten liggen, lijkt de interactie met de hogere harmonischen een grotere rol te spelen bij een verandering in het horizontale getij als gevolg van een andere bodem. Dit geldt voor de punten bij Perkpolder en bij Bath, maar ook voor de punten in cel 5 uit Bijlage G. De bodemverandering heeft in de punten in het westen (zie Bijlage G voor de aanvullende punten in cellen 1 en 3) geresulteerd in een verandering van de M_0M_2-interactie, waardoor het residuele sedimenttransport is veranderd. In de beschouwde punten in het oosten heeft mogelijk een verandering van de wrijving en grote(re) rol gespeeld in de verandering van het residuele sedimenttransport. In het westen speelt mogelijk een verandering van het residuele stromingsveld een grotere rol. Maar dit is niet met zekerheid te zeggen, omdat de beschouwde punten niet representatief hoeven te zijn voor de gehele raai of betreffende geul. Verandering van het transport in het punt kan bijvoorbeeld ook worden veroorzaakt doordat de geul is verplaatst. De transporten in de gehele eb- en vloedgeul moeten worden bekeken om te weten te komen of het punt representatief is voor de gehele geul.

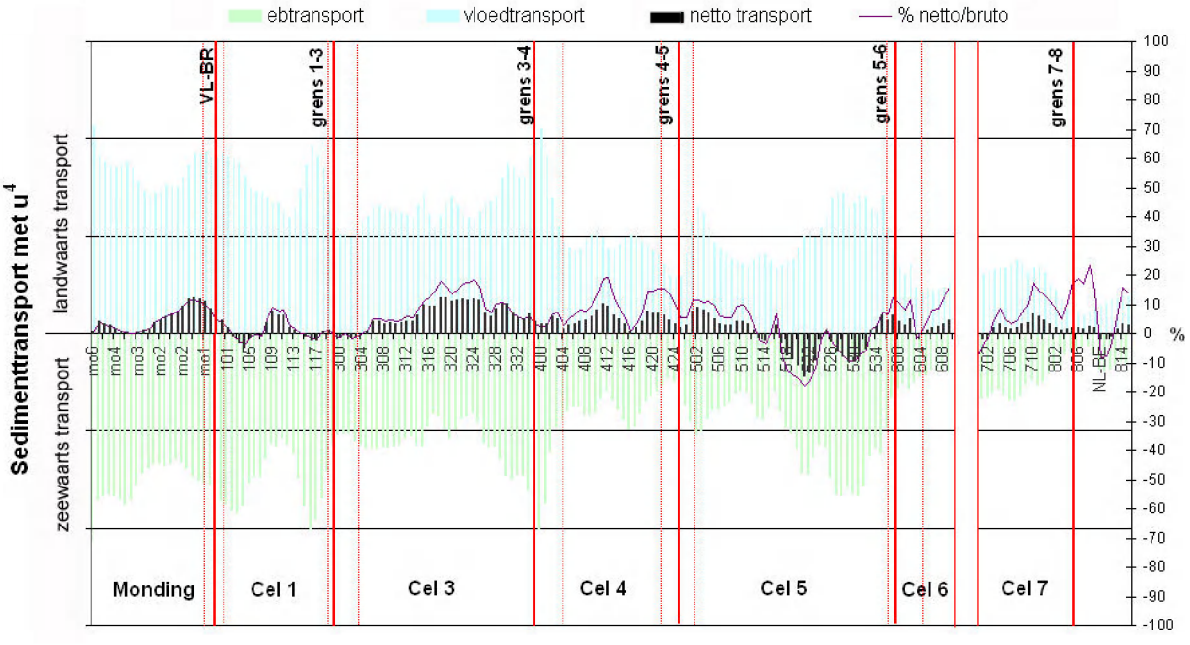
7.4 Eb- en vloedtransport 1972 en 2002 (S_{eb} en S_{vloed})

De lokale sedimenttransporten zijn geïntegreerd over de ebperiode en vloedperiode en over de breedte van het estuarium (zie Vergelijking 5.5 in paragraaf 5.2.5). Dit geeft het ebtransport en vloedtransport in het estuarium. De invloed van de bodemgeometrie op de eb- en vloedtransporten kan worden bepaald door de bruto transporten van 2002 en 1972 onderling met elkaar te vergelijken. De berekening van het bruto transport is uitgevoerd met u^3, u^4 en u^5.

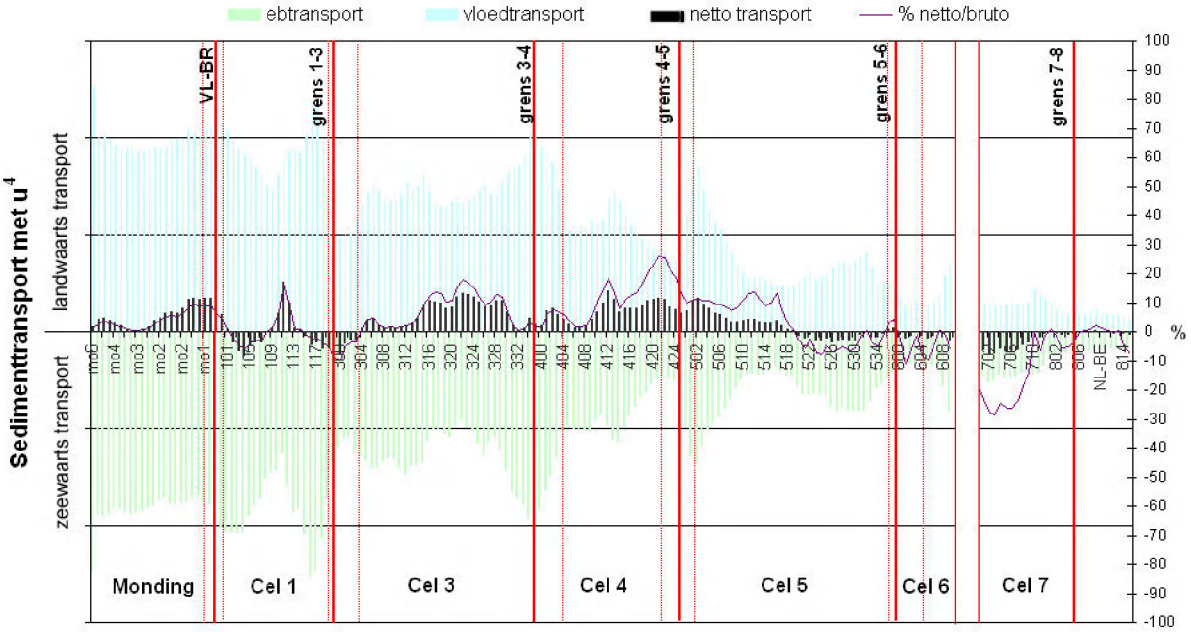
In Figuur 7.12 en . . . . . Figuur 7.13 zijn het berekende eb- en vloedtransport met macht n=4 weergegeven met de bodem van 1972 respectievelijk 2002. De som van het ebtransport en vloedtransport (netto sedimenttransport) is ook weergegeven in de figuur. De som van de *absolute* waarden van het eb- en vloedtransport wordt het bruto transport genoemd (zie ook paragraaf 3.4.5). Een positieve waarde betekent landwaarts transport (eb) en een negatieve waarde is zeewaarts transport (vloed). Op de verticale as is geen hoeveelheid of kwantificering voor de grootte van het transport gegeven, omdat de transporten slechts kwalitatief, d.w.z. ten opzichte van elkaar, moeten worden bekeken. De raainummers op de horizontale as corresponderen met de nummers in Figuur 5.6. De grens tussen twee cellen is weergegeven met een dikke rode lijn. Eigenlijk is sprake van een overgangsgebied of grensgebied tussen

twee cellen (zie paragraaf 5.3). De onderbroken lijnen komen overeen met de uiterste randen van dit grensgebied. In Bijlage H zijn de berekende eb- en vloedtransporten met u^3 en u^5 weergegeven.

Figuur 7.12 Eb- en vloedtransport in 1972 met u^4



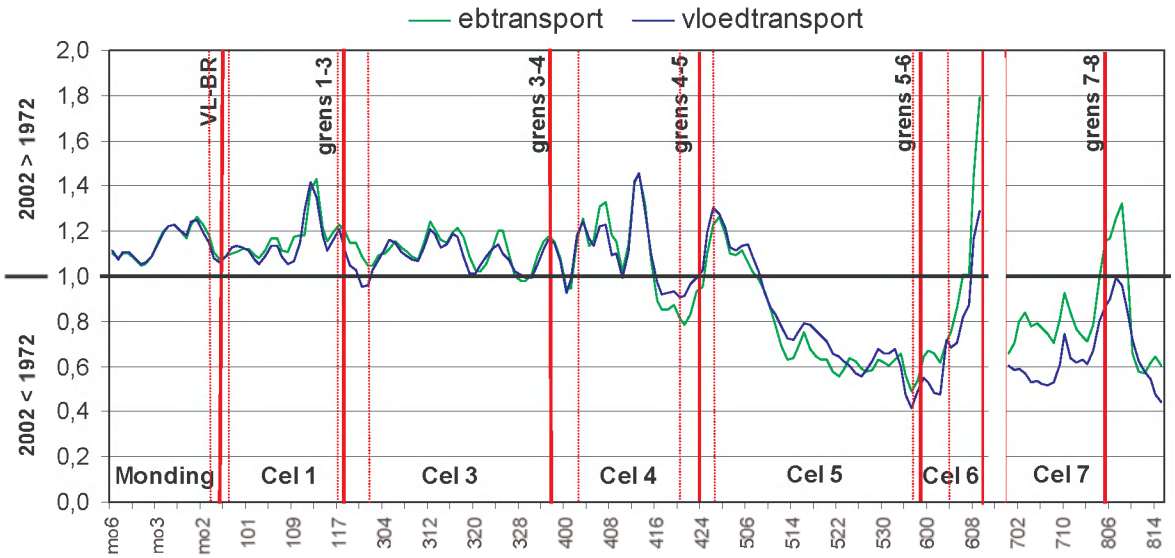
Figuur 7.13 Eb- en vloedtransport in 2002 met u^4



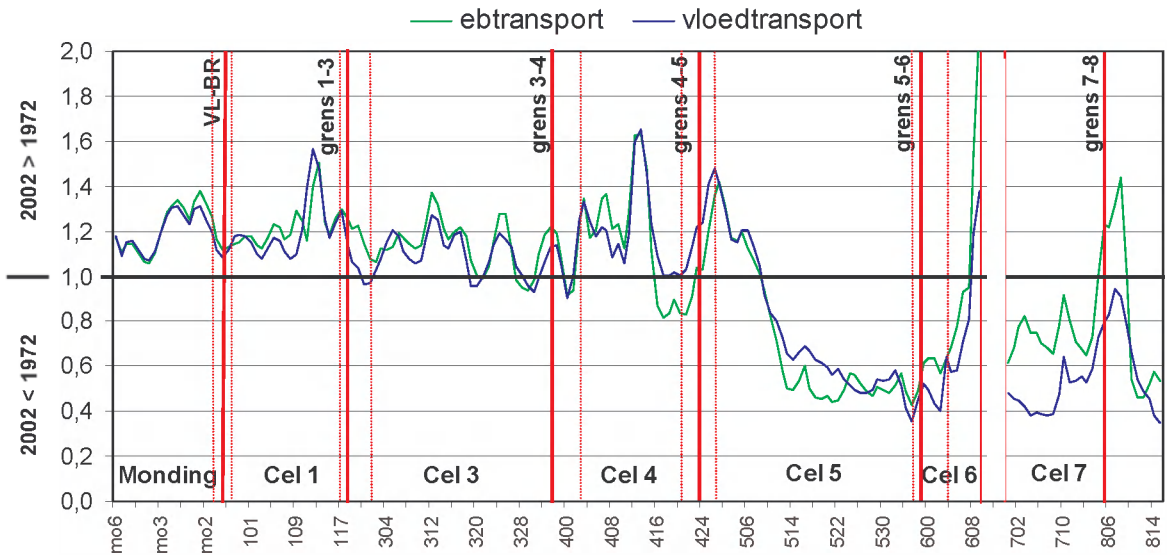
De invloed van een andere bodemligging op de eb- en vloedtransporten kan inzichtelijk worden gemaakt door de transporten van 2002 te delen door de transporten van 1972. Wanneer het transport in 2002 groter is dan in 1972, zal de uitkomst groter zijn dan 1. Een kleiner transport in

2002 t.o.v. 1972 geeft een uitkomst die kleiner is dan 1. Dit is gedaan voor u^3, u^4 en u^5 (Figuur 7.14 t/m Figuur 7.16).

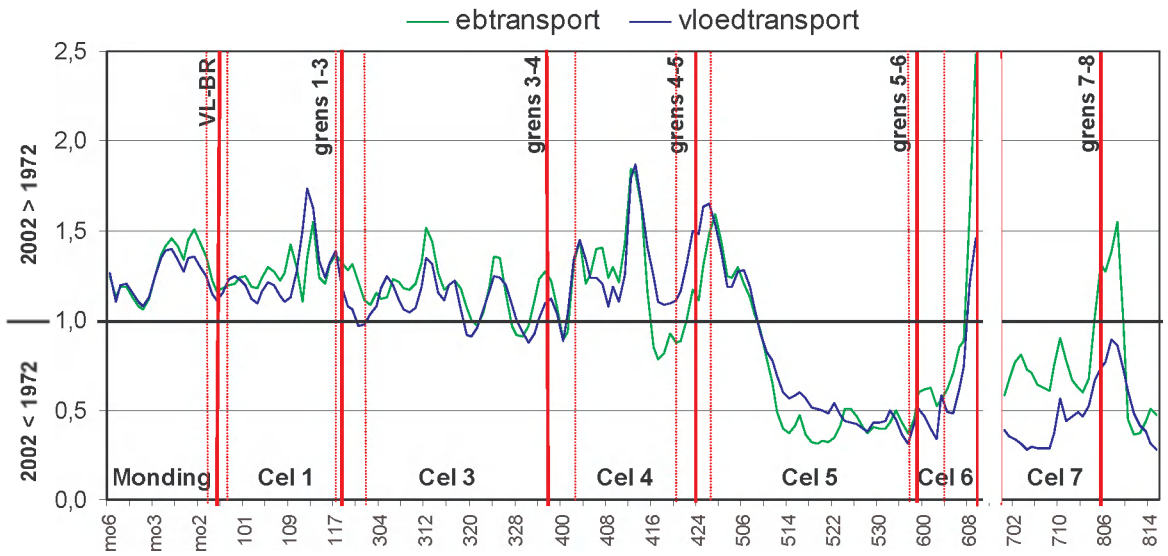
Figuur 7.14 Eb- en vloedtransport in 2002 gedeeld door het eb- en vloedtransport in 1972 met u^3



Figuur 7.15 Eb- en vloedtransport in 2002 gedeeld door het eb- en vloedtransport in 1972 met u^4



Figuur 7.16 Eb- en vloedtransport in 2002 gedeeld door het eb- en vloedtransport in 1972 met u[5]



Globaal gezien is het eb- en vloedtransport toegenomen in het westelijk deel en in het midden deel van de Westerschelde (monding, cel 1, cel 3 en cel 4). Dit geldt voor alle machten n. In het oostelijk deel (cel 5, cel 6 en cel 7) is het eb- en vloedtransport afgenomen. Uit paragraaf 7.2.3 blijkt dat het getijdebiet in het gehele estuarium is toegenomen met 4 tot 8% (Figuur 7.4). Het toegenomen debiet gaat in het westelijk en midden deel gepaard met een toename van 10 tot 30% van het bruto transport. In het oostelijk deel gaat de debiettoename gepaard met een afname van 20-50% van het bruto transport. Aan de hand hiervan kan worden geconcludeerd dat het stroomoppervlak in het oostelijk deel dusdanig is toegenomen (door bijvoorbeeld uitdieping en/of toename van de getijslag), dat de stroomsnelheden over het algemeen lager zijn geworden.

7.5 Conclusie

Aan de hand van de modelresultaten en modelanalyse in dit hoofdstuk kunnen onderstaande conclusies worden getrokken:

Met betrekking tot de waterbeweging:

- Door toepassing van een bodem uit 2002 in plaats van een bodem uit 1972 is de getijslag bij Bath toegenomen. Tot aan de Overloop van Hansweert (vanuit het westen gezien) is het waterstandsverloop nauwelijks veranderd.
- Bij Bath en verder stroomopwaarts treedt eb en vloed in 2002 eerder op dan in 1972.
- Het getijprisma neemt in het gehele estuarium toe met 4-8% als een bodem uit 2002 wordt toegepast in plaats van een bodem uit 1972.

Met betrekking tot de horizontale getij-asymmetrie:

- In vrijwel alle beschouwde punten speelt de interactie tussen de residuele stroming en het M_2-getij (M_0M_2-interactie) een grote rol bij de residuele sedimenttransporten op de lange termijn.
- In een aantal punten is de interactie tussen het M_2-getij en de hogere harmonischen (M_2M_4- en $M_2M_4M_6$-interactie) mede bepalend voor het residuele sedimenttransport.
- Veranderingen van het residuele sedimenttransport als gevolg van de bodemverandering tussen 1972 en 2002 worden in sommige punten veroorzaakt door alleen de M_0M_2-interactie en in andere punten door de M_2M_4- en/of $M_2M_4M_6$-interactie. Er lijkt een geografische verband te zijn. De veranderingen in het sedimenttransport in de westelijke punten (in cel 1 en 3) worden veroorzaakt door veranderingen in de M_0M_2-interactie. De verandering in het sedimenttransport wordt in een aantal punten in het oosten (cellen 4, 5 en 6) veroorzaakt door een verandering in de M_2M_4-en/of $M_2M_4M_6$-interactie. Mogelijk speelt verandering van de wrijving in het oostelijk deel van het estuarium een grote(re) rol, terwijl in het westen veranderingen van het residuele stromingspatroon bepalend zijn voor veranderingen in het residuele sedimenttransport. Maar dit is niet met zekerheid te zeggen, omdat de beschouwde punten niet representatief hoeven te zijn voor de gehele raai of (deel)gebied. Om een completer beeld te krijgen van de invloed van de bodemligging op de verschillende termen, zullen meer punten in beschouwing moeten worden genomen.

Met betrekking tot het bruto sedimenttransport:

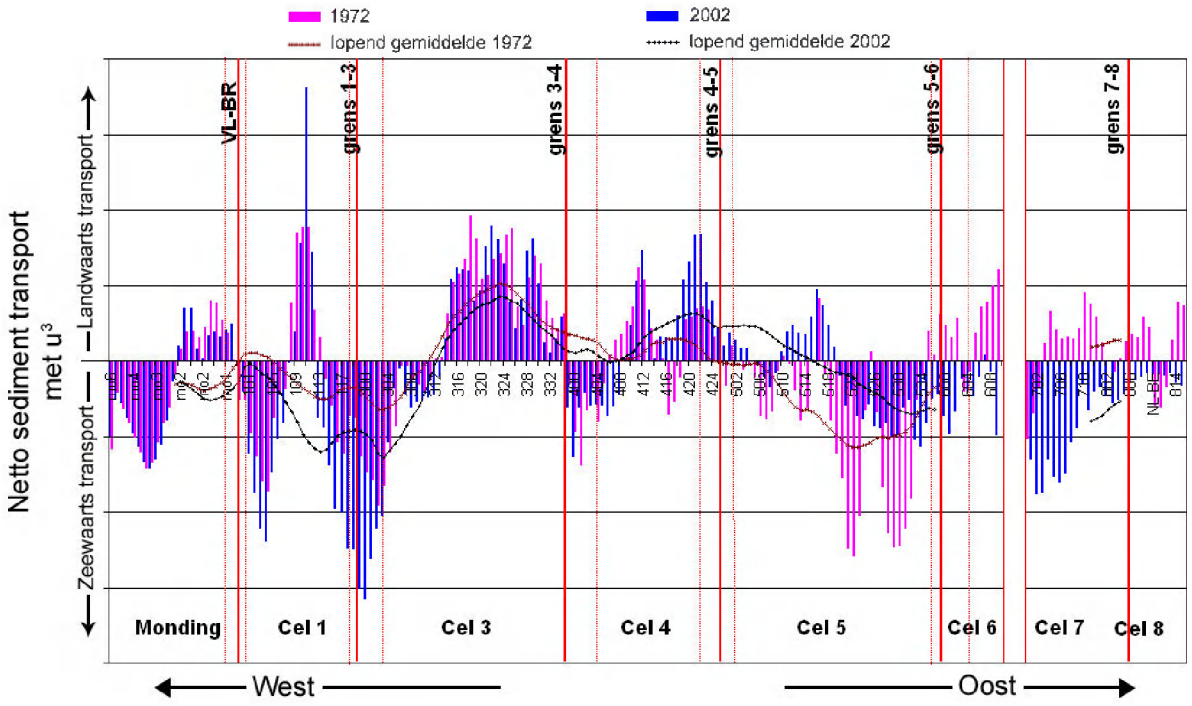
- De bodemverandering heeft in het westen en midden van het estuarium geleid tot een toename van het bruto transport (10-30%) en in het oosten geleid tot een afname van het bruto transport (20-50%). Dit betekent dat het doorstroomoppervlak in het oosten dusdanig is toegenomen, dat de stroomsnelheden over het algemeen zijn afgenomen.
- Het algemene beeld van het effect (d.w.z. toename of afname van bruto transport in de individuele cellen) blijft gelijk bij toepassing van verschillende macht n in de transportformulering.

8 Analyse netto sedimenttransporten (S_{netto})

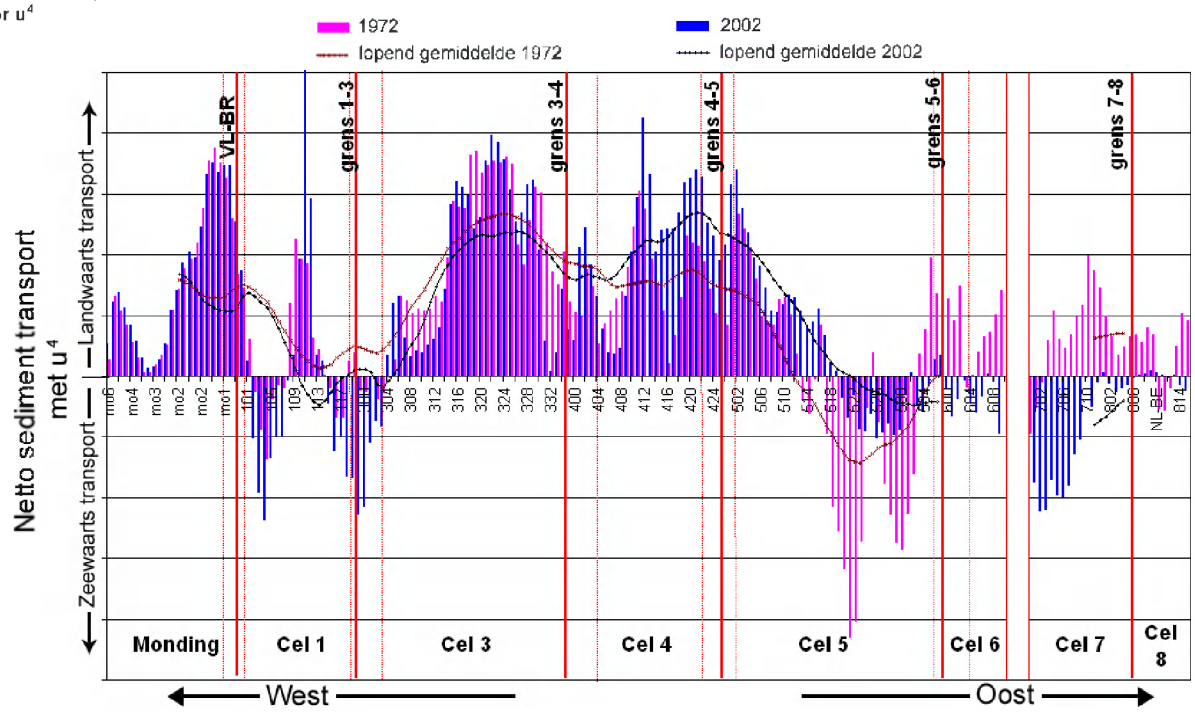
8.1 Uitkomst modelsimulaties

Het netto sediment transport (= lokale residuele transport geïntegreerd over de breedte) is voor iedere raai in het model berekend door middel van Vergelijking 5.4 in paragraaf 5.2.5 voor zowel u^3, u^4 als u^5 (Figuur 8.1 t/m Figuur 8.3). Ook is het lopende gemiddelde van 23 punten (11 voor en 11 na) van iedere raai gegeven. Een positieve waarde betekent een netto landwaarts transport en een negatieve waarde is een netto zeewaarts transport. Op de verticale as is geen hoeveelheid of kwantificering voor de grootte van het transport gegeven, omdat de transporten slechts kwalitatief, d.w.z. ten opzichte van elkaar, moeten worden bekeken. De raainummers op de horizontale as corresponderen met de nummers in Figuur 5.6. De grens tussen twee cellen is weergegeven met een dikke rode lijn. Eigenlijk is sprake van een overgangsgebied of grensgebied tussen twee cellen (zie paragraaf 5.3). De onderbroken lijnen komen overeen met de uiterste randen van dit grensgebied.

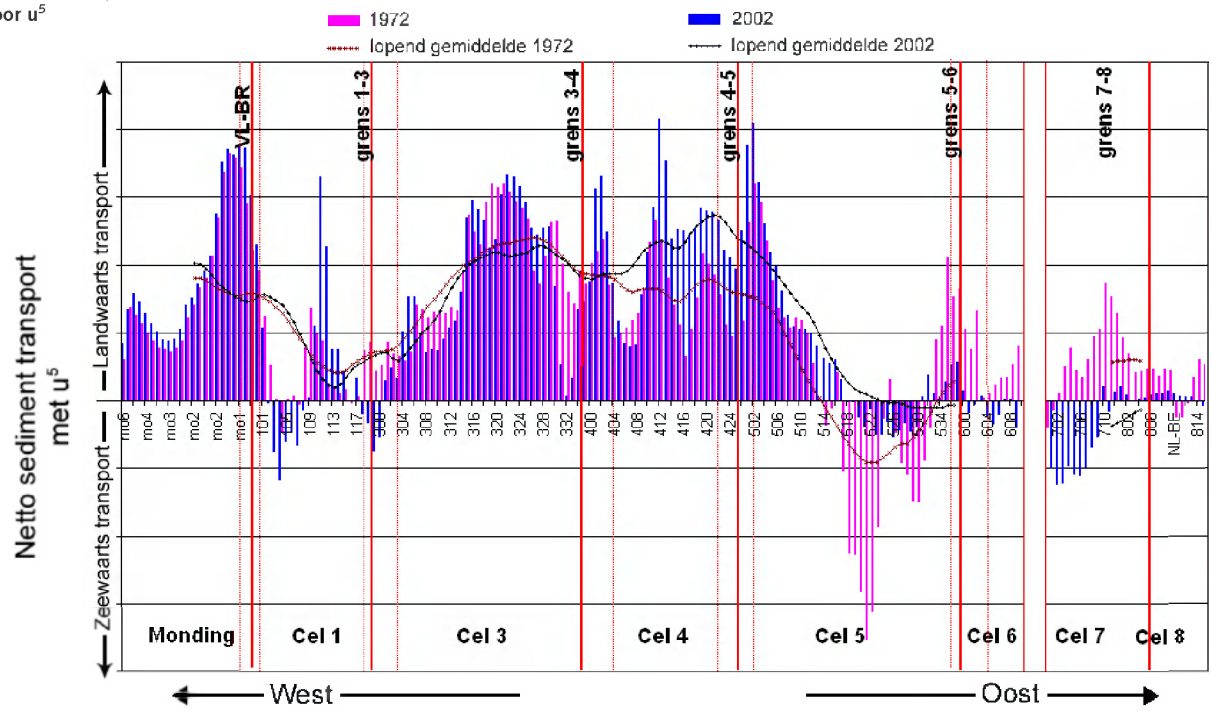
Figuur 8.1 Netto sedimenttransport in 1972 en 2002, berekend met model voor u^3



Figuur 8.2 Netto sedimenttransport in 1972 en 2002, berekend met model voor u^4



Figuur 8.3 Netto sedimenttransport in 1972 en 2002, berekend met model voor u^5

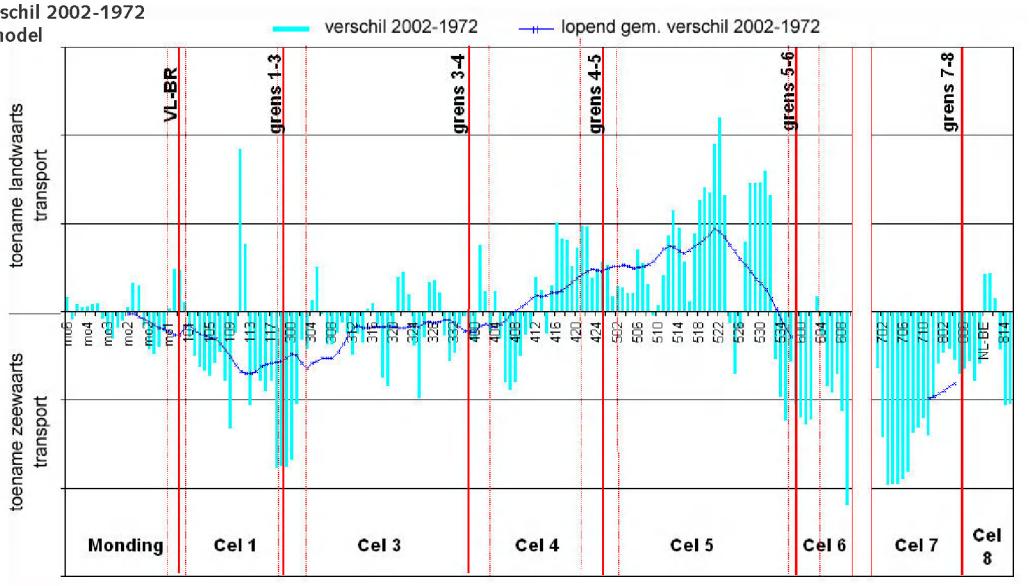


De sedimenttransporten berekend met machten n=4 en n=5 geven meer landwaarts gerichte transporten dan bij n=3. Dit is vooral in de monding, cel 1, cel 3, cel 4 en aan de westkant van cel 5 het geval. Ook valt op dat het

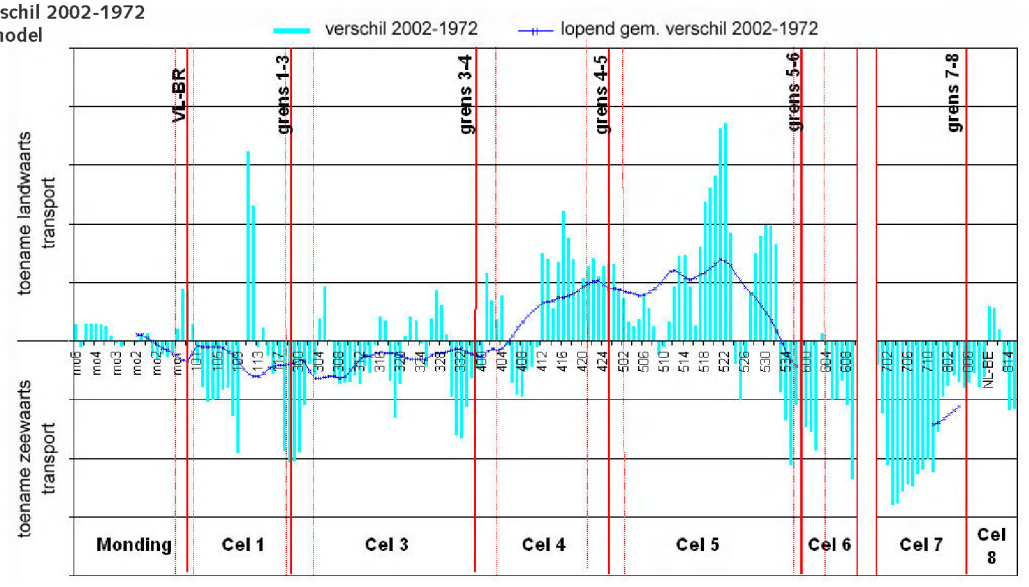
netto sedimenttransport sterk kan fluctueren. Het lopende gemiddelde geeft een meer algemeen beeld van de transporten door het estuarium. De grootste variatie wordt op deze manier weggemiddeld en geeft aan waar het zwaartepunt ligt van de dominante transportrichting(en). In Bijlage I zijn de lokale, residuele sedimenttransporten in het estuarium weergegeven voor u^3, u^4 en u^5.

Om het verschil tussen de transporten in 1972 en 2002 goed te kunnen waarnemen, zijn in Figuur 8.4 t/m Figuur 8.6 de grafieken weergegeven waarbij de transporten van 1972 zijn afgetrokken van de transporten in 2002. Dit is dus het effect op de sedimenttransporten veroorzaakt door de bodemligging uit 2002 in plaats van 1972.

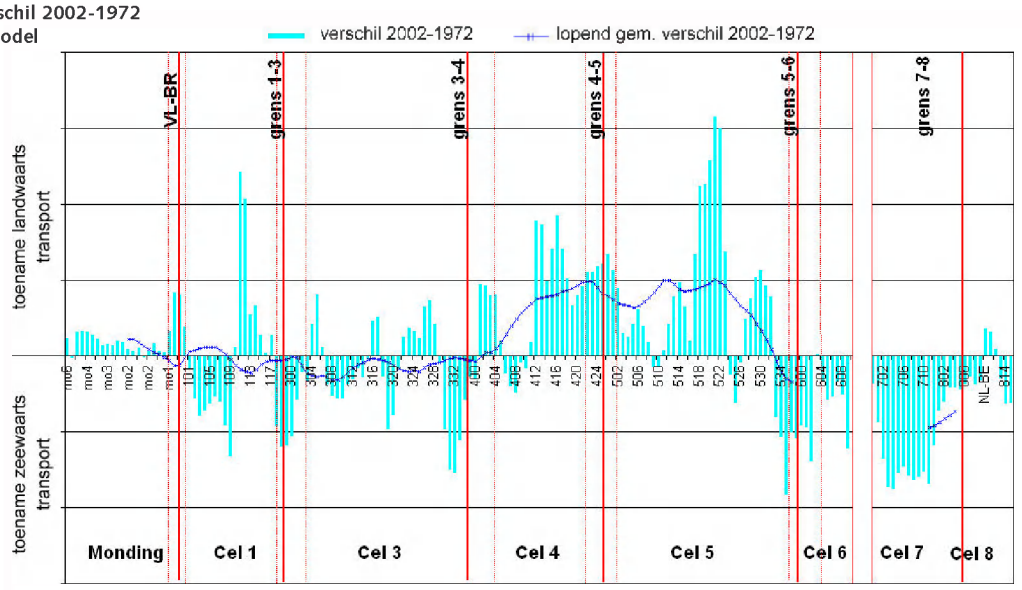
Figuur 8.4 Transportverschil 2002-1972 voor u^3 berekend met model



Figuur 8.5 Transportverschil 2002-1972 voor u^4 berekend met model



Figuur 8.6 Transportverschil 2002-1972 voor u^5 berekend met model

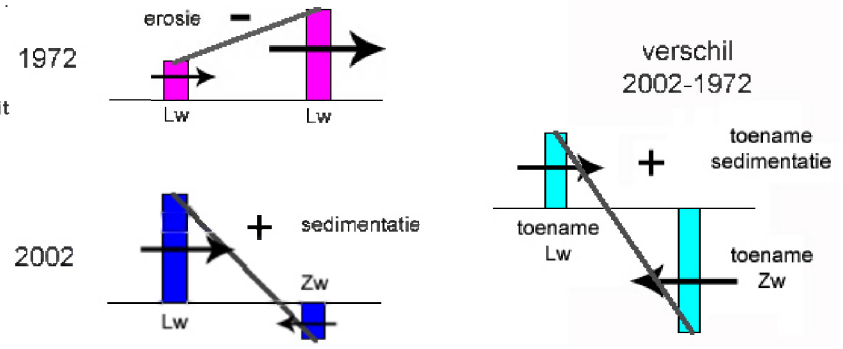


8.2 Effect bodemligging op netto sedimenttransport

8.2.1 Methode

Uit Figuur 8.1 t/m Figuur 8.6 kan dezelfde type informatie worden verkregen als met de meetdata in hoofdstuk 6: sedimentatie/erosie van een macrocel en sedimentuitwisseling tussen de macrocellen. De grootte en richting van het sedimenttransport op het grensgebied tussen twee macrocellen bepaalt wat de sedimentuitwisseling is tussen twee cellen. Wanneer het sedimenttransport binnen een macrocel in landwaartse richting toeneemt (stijgende lijn), dan vindt erosie plaats in de betreffende macrocel (zie 1972 in Figuur 8.7). Indien het sedimenttransport binnen een macrocel in landwaarts richting afneemt (dalende lijn), dan vindt sedimentatie plaats (zie 2002 in Figuur 8.7). Binnen een macrocel kan ook sediment worden verplaatst, maar dit heeft geen invloed op de sedimentuitwisseling tussen macrocellen en op het totale sedimentvolume van een cel. Alleen de sedimenttransporten op de grens tussen de macrocellen zijn van belang.

Figuur 8.7 Voorbeeld bepaling van sedimentuitwisseling tussen cellen en volumeontwikkeling van een macrocel en het verschil tussen 1972 en 2002 uit modelresultaten



Het effect van de verschillende bodemliggingen op het sedimenttransport wordt onderzocht en daarom is met name het *verschil* tussen beide modelsimulaties van belang. Dit kan worden bepaald door de sedimenttransporten van 1972 af te trekken van de sedimenttransporten van 2002 (zie verschil in Figuur 8.7).

Aan de hand hiervan kan worden bepaald of op de grens tussen twee cellen sprake is van een relatieve toename van het landwaarts of zeewaarts gericht transport in 2002 ten opzichte van 1972. Ook kan worden bepaald of een macrocel relatief meer is gaan aanzanden of relatief meer is gaan eroderen in 2002. Alleen in combinatie met de modeluitkomsten van de individuele jaren kan worden bepaald of inderdaad sprake is van een toename, of dat het gaat om een afname of om een omslag (Figuur 8.7). Hier wordt alleen het verschil tussen 1972 en 2002 geanalyseerd en zal alleen in termen van een toename worden gesproken. De modelresultaten van de individuele jaren worden dus niet geanalyseerd. De volgende definities worden aangehouden:

- Positief transportverschil betekent een relatieve toename van landwaarts gericht transport.
- Negatief transportverschil betekent een relatieve toename van het zeewaarts gericht transport.
- Een dalende lijn in landwaartse richting betekent een relatieve toename van sedimentatie in de macrocel.
- Een stijgende lijn in landwaartse richting betekent een relatieve toename van erosie in de macrocel.

De analyse van de modelresultaten en de vergelijking met de meetdata is uitgevoerd op het verschil van de netto transporten tussen 1972 en 2002. Het verschil tussen de sedimenttransporten in 2002 en de transporten in 1972 wordt ook wel "het effect" van de veranderde bodemligging genoemd.

Het effect per macrocel is bepaald door het gemiddelde te nemen van het transportverschil binnen de gedefinieerde grensgebieden. In paragraaf 5.3 zijn de grensgebieden gedefinieerd, deze bevatten meerdere raaien. Er wordt aangenomen dat de sedimenttransporten buiten de grensgebieden niet van invloed zijn op veranderingen van de volumeontwikkeling van een macrocel en niet op de sedimentuitwisseling tussen macrocellen. De verschillen buiten de grensgebieden worden daarom achterwege gelaten. Naast het gemiddelde is ook de bijbehorende standaarddeviatie bepaald, dit geeft de variatie binnen het grensgebied aan.

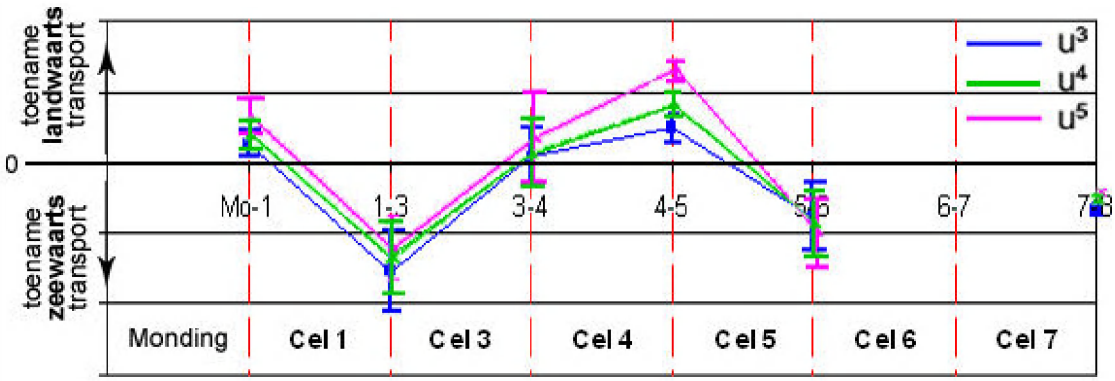
8.2.2 Resultaat

De verschillen in de grensgebieden zijn gemiddeld (Bijlage J) en de berekening is weergegeven in Figuur 8.8. In de figuur ontbreken de lijnen in cel 6 en 7. De relatieve toename van sedimentatie/erosie in de individuele cellen is onbekend. Dit komt doordat de netto transporten op de grensovergang cel 6-7 ontbreken. Het modelrooster maakt op de grens tussen cel 6 en 7 een hoek, waardoor het rooster niet evenwijdig aan de geulen loopt. Berekening van het netto transport wordt juist gedaan onder de aanname dat het rooster de geulen volgt (zie ook paragraaf 5.2.5). Het gemiddelde binnen het grensgebied kan niet worden bepaald. De netto transporten in cel 6 en 7, die wel bekend zijn, laten geen consistent beeld

zien (zie Figuur 8.1 t/m Figuur 8.3). Een schatting van de sedimentuitwisseling tussen cel 6 en 7 is niet te geven en onzekerheid blijft bestaan. De analyse is daarom gedaan voor de cellen samen (cel 6 + cel 7).

Figuur 8.8 Effect bodemligging op netto sedimenttransport, berekend door het gemiddelde te nemen van de transportverschillen tussen 2002 en 1972 binnen de grensgebieden

De lijnen zijn getrokken tussen de gemiddelden. Een dalende lijn betekent een relatieve toename van sedimentatie, een stijgende lijn betekent een relatieve toename van erosie. De bandbreedte op de grenzen is de standaarddeviatie.



De gemiddelde transportverschillen binnen de grenzen zijn aan elkaar verbonden. Op de grenzen is ook de bandbreedte weergegeven, dit geeft de variatie binnen het grensgebied aan. In principe zou de lijn ook kunnen variëren tussen de uiterste grenzen van de bandbreedte. In een aantal gevallen maakt variatie binnen de bandbreedte niets uit. De toename van landwaarts gericht transport op grens monding-cel 1 is bijvoorbeeld onafhankelijk van macht n en onafhankelijk van variatie binnen de bandbreedte. Alleen de grootte van het transport kan variëren. Dat geldt ook voor de toegenomen van sedimentatie in cel 1. Variatie binnen de bandbreedte resulteert altijd in een toename van sedimentatie. In cel 4 is dat bijvoorbeeld niet het geval. Variatie binnen de bandbreedte kan wél het effect verzwakken of versterken. Het gemiddelde geeft een toename van erosie aan (stijgende lijn), maar variatie binnen de bandbreedte kan resulteren in een andere effect. Verderop in deze paragraaf worden de effecten per cel en per grensgebied beschreven. Het gemiddelde wordt wel aangehouden als het "meest aannemelijke" effect dat optreedt.

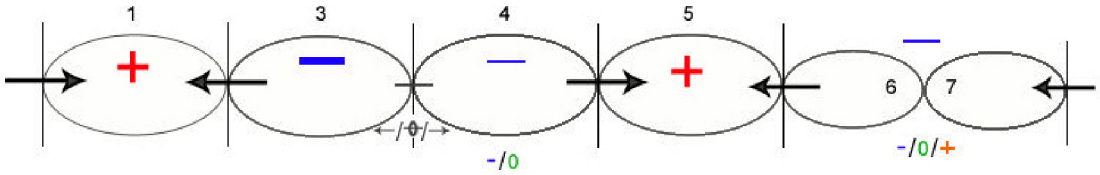
Wanneer de meest aannemelijke effecten van de individuele cellen worden beschouwd in Figuur 8.8, dan blijkt dat het niet uitmaakt welke macht n wordt genomen bij de beoordeling of een cel een toename van erosie of sedimentatie laat zien. Het maakt dus niet uit welke transportformulering wordt gebruikt; het geeft kwalitatief dezelfde effecten. In cel 4 en 5 neemt het effect wel relatief toe ten opzichte van de effecten in andere

macrocellen met toenemende macht n. Bij een hogere macht n heeft variatie binnen de bandbreedte minder invloed op het effect van cellen 4 en 5.

Met Figuur 8.8 kan dezelfde figuur worden opgesteld als voor de meetdata in hoofdstuk 6 (Figuur 8.9). Wanneer variatie binnen de bandbreedte niet resulteert in een ander effect, dan is de modeluitkomst zekerder (een dik gedrukt symbool), dan wanneer wél een ander effect waar te nemen is. De mogelijke variatie staat onder de figuur afgebeeld.

Figuur 8.9 Effect veranderde bodemligging op netto sedimenttransport op basis van Figuur 8.8

Voor legenda zie Figuur 6.3.



Naar aanleiding van Figuur 8.8 en Figuur 8.9 heeft een andere bodemgeometrie het volgende effect:

- Grens monding-cel 1: toename van landwaarts gericht transport.
- Cel 1: toename van sedimentatie. Dit wordt vooral veroorzaakt door een toenemende sedimentaanvoer vanuit cel 3.
- Grens 1-3: toename van zeewaarts gericht transport.
- Cel 3: toename van erosie. Dit wordt veroorzaakt doordat meer sediment naar cel 1 wordt getransporteerd.
- Grens 3-4: Het gemiddelde is vrijwel nul en er is dus nauwelijks een effect waarneembaar. De bandbreedte geeft aan dat het effect eventueel kan variëren tussen een toename van landwaarts gericht transport en tussen een toename van zeewaarts gericht transport. Dit betekent dat als de grens gedefinieerd zou zijn door één enkele raai, de uitkomst van het effect sterk afhankelijk zou zijn van de locatie van de grens. Een kleine verschuiving van de grens binnen het grensgebied kan resulteren in een omgekeerd effect.
- Cel 4: toename van erosie. Dit wordt veroorzaakt doordat meer sediment naar cel 5 wordt getransporteerd. Het effect wordt relatief groter bij toenemende macht n (t.o.v. de effecten in andere macrocellen). Variatie binnen de bandbreedte(s) kan het effect doen afnemen naar nul.
- Grens 4-5: toename van landwaarts gericht transport. Het effect neemt relatief toe (t.o.v de effecten in andere macrocellen) met toenemende macht n.
- Cel 5: toename van sedimentatie. Dit wordt veroorzaakt door een toenemende sedimentaantrekking vanuit de aangrenzende macrocellen, cel 4 en 6. Het effect neemt relatief toe (t.o.v de effecten in andere macrocellen) met toenemende macht n.
- Grens 5-6: toename zeewaarts gericht transport.
- Cel 6&7: nauwelijks een effect tot een toename van erosie. Variatie binnen de bandbreedte kan het effect doen afnemen en zelfs resulteren in een toename van sedimentatie in het gebied.
- Grens 7-Belgie: toename van zeewaarts gericht transport.

Als we uitgaan van het "meest aannemelijke" effect, d.w.z. het gemiddelde in Figuur 8.8, dan zorgt de veranderde bodem voor een grotere (getijgedreven) aanzanding in cel 1 en 5. Deze macrocellen zanden aan ten koste van de omringende gebieden. Cel 1 zandt aan ten koste van met name cel 3, maar voor een deel ook ten koste van de monding. Cel 5 zandt aan ten koste van cel 4 en cel 6/7. Het getijgedreven sedimenttransport over de grens tussen Nederland en België is in zeewaartse richting toegenomen als gevolg van de veranderde bodem.

8.2.3 Lokaal effect versus regionaal effect

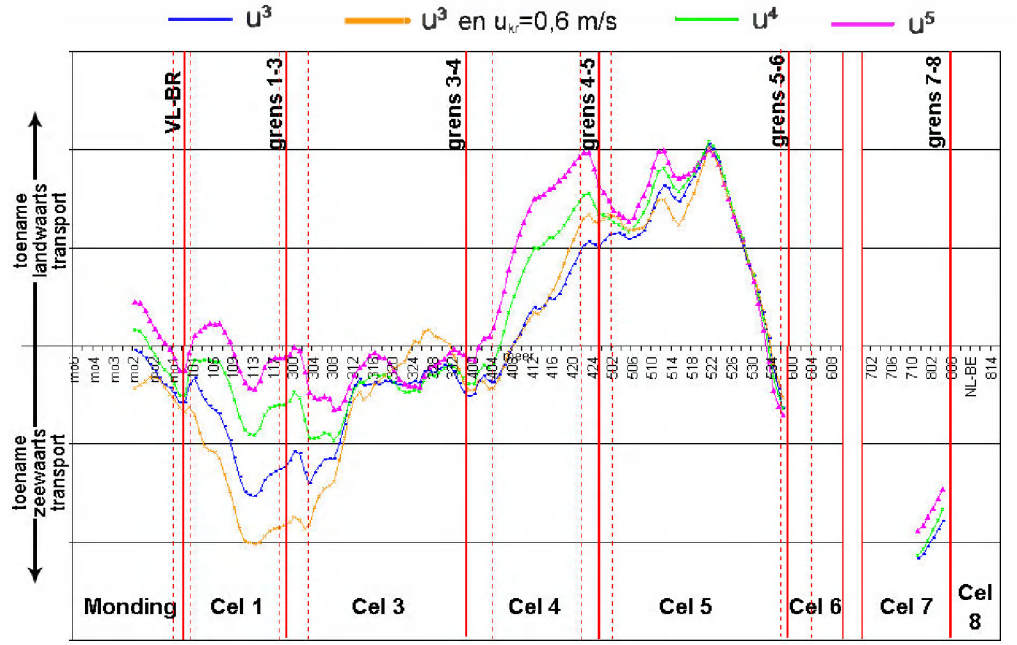
De bepaling van het effect van een andere bodemgeometrie is gedaan op basis van het gemiddelde van de transporten binnen de grensgebieden. Maar de transporten kunnen sterk fluctueren, zoals in Figuur 8.1 t/m Figuur 8.3 is waar te nemen. Onduidelijk is of de fluctuaties het gevolg zijn van fouten in de modelresultaten of dat ze reëel zijn. Door middel van het nemen van het lopende gemiddelde kan een meer algemeen beeld worden verkrijgen van de transporten in de Westerschelde en in de macrocellen. Door de lopende gemiddelden van 1972 en 2002 van elkaar af te trekken wordt ook een algemeen beeld van het effect verkregen (Figuur 8.10). Op deze manier krijgen de sedimenttransporten buiten de grensgebieden ook een gewicht toegekend en wordt het effect op meer regionaal niveau bepaald. Er kan een vergelijking worden gemaakt tussen de effecten in Figuur 8.8 en Figuur 8.10. Wanneer de effecten van elkaar verschillen, wijkt het effect binnen het grensgebied (lokaal) blijkbaar af van het effect buiten het grensgebied (regionaal). In dat geval spelen lokale effecten mogelijk een grote(re) rol in de morfologische ontwikkeling volgens het model. Dit betekent tegelijkertijd dat het effect gevoelig is voor variatie van het grensgebied in de ruimte. Wanneer de effecten overeenkomstig zijn, is het effect op lokaal niveau gelijk aan het effect op regionaal niveau en is het effect minder gevoelig voor variatie van de locatie van het grensgebied in de ruimte. De effecten in de vorige paragraaf worden in principe aangehouden als *het* effect, maar wanneer deze afwijkt van het effect in deze paragraaf, kan dat gezien worden als een eventuele variatie in de modeluitkomst.

Ook is in Figuur 8.10 het lopende gemiddelde gegeven voor u^3 met een kritische snelheid van 0,6 m/s. In Bijlage K is de invloed van een kritische stroomsnelheid in de transportformulering op het netto sedimenttransport en op de transportverschillen bij verschillende macht n onderzocht. Uit Bijlage K blijkt dat een dieptegemiddelde drempelsnelheid van 0,6 m/s alleen invloed heeft op de netto sedimenttransporten met n=3 en dan vooral in het westelijk deel. Op machten n=4 en n=5 heeft een drempelsnelheid $\leq$ 0,6 m/s nauwelijks invloed op het netto sedimenttransport.

In Figuur 8.10 ontbreekt het effect op de volumeontwikkeling van cel 6 en 7. Doordat een deel van de transporten in cel 6 en 7 niet is berekend, is de datareeks onderbroken en ontstaat er een gat in het lopend gemiddelde. De analyse is gedaan voor de cellen samen (cel 6 + cel 7).

Figuur 8.10 Effect bodemligging op netto sedimenttransport, berekend met het lopende gemiddelde

Een dalende lijn is een toename van sedimentatie, een stijgende lijn is een toename van erosie.



Vooral in het westelijke deel van de Westerschelde (cel 1 en 3) wijkt het effect af van de effecten in Figuur 8.8 en Figuur 8.9. Ook in de overige gebieden zijn verschillen waar te nemen, maar dan een versterking of verzwakking van het effect. Lokale effecten spelen dus een rol bij de bepaling van de trends in de macrocellen. In hoeverre het algemene beeld van het effect afwijkt van het effect op basis van de transporten binnen de grensgebieden hangt ook af van de gebruikte transportformulering. Bijvoorbeeld bij u^3 zonder drempelsnelheid is op de grens 1-3 het lokale effect nagenoeg gelijk aan het regionale effect, terwijl dat bij u^5 niet het geval is.

Binnen het overgangsgebied tussen monding en Westerschelde laat Figuur 8.10 een toename van export zien. Dit is tegengesteld aan het effect in de vorige paragraaf. Dit betekent dat de transportverschillen rondom het grensgebied een toename van export laten zien, terwijl binnen het grensgebied een toename van import plaatsvindt. Een kleine verschuiving van de grens in oostwaartse of westwaartse richting kan een ander effect opleveren.

Het effect in macrocellen 1 en 3 heeft dezelfde trend als in de vorige paragraaf: een toename van sedimentatie in cel 1 en een toename van erosie in cel 3. Hierbij moet wel opgemerkt worden, dat het effect bij machten n=4 en n=5 mogelijk veel kleiner kan zijn dan in de vorige paragraaf is gesteld. Wanneer de fluctuaties zijn uitgemiddeld is vooral de toename van zeewaarts gericht transport op de grens 1-3 minder groot dan wanneer alleen het lokale effect binnen de grens in rekening wordt gebracht.

In cel 4 en cel 5 is het effect (toename van erosie respectievelijk toename van sedimentatie) versterkt ten opzicht van het effect in de vorige paragraaf. Dit betekent dat de toename van landwaarts gericht transport op de grens 4-5 niet alleen geconcentreerd is in het grensgebied, maar in een veel groter gebied plaatsvindt.

Net als in de vorige paragraaf is het transport op de grens tussen cel 5 en 6 en op de grens tussen Nederland en België in zeewaartse richting toegenomen. De toename van zeewaarts transport vindt dus niet alleen binnen het grensgebied maar ook buiten het grensgebied plaats.

In Figuur 8.10 is in de cellen 6 en 7 een toename van sedimentatie te zien. Op basis van de effecten binnen de grensgebieden is dat effect veel minder groot of zelfs omgekeerd.

8.2.4 Vergelijking met meetgegevens

Een kwalitatieve vergelijking tussen meetdata en modelresultaat is mogelijk. Hierbij wordt het modelresultaat uit paragraaf 8.2.2 aangehouden als het meest aannemelijke effect met als eventuele variatie de resultaten uit paragraaf 8.2.3. Bij de vergelijking is een classificatie aangehouden voor de mate waarin de meetdata en de modeluitkomst met elkaar overeenkomen (Tabel 8.1).

Tabel 8.1 Classificatie van de mate waarin meetdata en modelsimulaties met elkaar overeenkomen

Modeluitkomst komt overeen met meetdata
Overeenkomsten te vinden tussen modeluitkomst en meetdata, maar het trendverschil is bij de meetdata niet zeer duidelijk
Mogelijk een overeenkomst, maar te veel onzekerheid in modelresultaat en/of meetdata om een uitspraak te kunnen doen
Modeluitkomst komt in geen geval overeen met meetdata

In Tabel 8.2 zijn de effecten van de veranderde bodemligging volgens het model samen met de volumeveranderingen volgens de meetdata weergegeven en met elkaar vergeleken. De trendverschillen volgens de metingen is overgenomen uit hoofdstuk 6. Vetgedrukt zijn de grensgebieden of macrocellen waar een duidelijk trendverschil is waar te nemen in de meetdata.

Tabel 8.2 Vergelijking van het effect van de bodemligging op netto sedimenttransport volgens modelberekeningen met de transportrichting en volumeontwikkeling op basis van metingen

Het "meest aannemelijke" effect is gegeven *boven* de stippellijn (de effecten uit Figuur 8.8). Indien eventueel een andere uitkomst mogelijk is (door bandbreedte in Figuur 8.8 en/of effecten uit Figuur 8.10), is deze gegeven *onder* de stippellijn. Vetgedrukt zijn de gebieden waar, in de meetdata, het trendverschil tussen 1972 en 2002 het duidelijkst waarneembaar is.

	Meting	Model	Overeen-komst?
grens mond-cel 1	**Toename zeewaarts transport**	Toename landwaarts transport	?
		Toename zeewaarts transport / geen effect	
Cel 1	**Toename erosie**	Toename sedimentatie	**Nee**
		Geen effect	
grens 1-3	Toename zeewaarts transport	Toename zeewaarts transport	Ja
	Geen effect	Geen effect	
Cel 3	Toename erosie	Toename erosie	Ja
	Geen effect	Geen effect	
grens 3-4	Geen effect	Geen effect	Ja
	Toename zeewaarts transport	Toename landwaarts / zeewaarts transport	
Cel 4	**Toename erosie**	Toename erosie	**Ja**
		Geen effect	
grens 4-5	**Toename landwaarts transport**	Toename landwaarts transport	**Ja**
Cel 5	**Toename sedimentatie**	Toename sedimentatie	**Ja**
grens 5-6	Geen effect	Toename zeewaarts transport	Nee
	Toename landwaarts transport		
Cel 6&7	Toename sedimentatie	Toename erosie	?
	Geen effect	Toename sedimentatie of nauwelijks verschil	
grens 7-België	Geen effect	Toename zeewaarts transport	Nee

Het netto sedimenttransport binnen het grensgebied tussen monding en Westerschelde is door de veranderde bodemligging in landwaartse richting toegenomen. In de meetdata is juist een duidelijke toename van export waar te nemen. Volgens deze resultaatinterpretatie zou de bodemligging geen invloed hebben op een toename van export. Maar in paragraaf 8.2.3 bleek dat, wanneer gemiddeld wordt over een veel groter gebied, eventueel wél een toename van export is te zien. Wat de invloed nu precies is van de bodemligging op de sedimentuitwisseling bij de keel van het estuarium is in de volgende paragraaf nader onderzocht.

Wel kan een conclusie worden getrokken met betrekking tot de invloed van de bodemligging op de ontwikkeling van het zandvolume in cel 1. Uit metingen volgt dat een toename van export samengaat met een toename van erosie in cel 1. Vanuit cel 3 is de aanvoer van sediment naar cel 1 toegenomen, maar deze toename is kleiner dan het toegenomen zeewaartse transport naar de monding. (zie Figuur 6.3 in paragraaf 6.4). De erosie in cel 1 is volgens de meetdata dus toegenomen. In het model is een toename van

erosie in geen geval te zien, ook niet wanneer de transporten op grotere (ruimte)schaal worden gemiddeld. Een eventuele toename van sedimentexport naar de monding, volgend uit de modelsimulaties, is daarvoor relatief te klein t.o.v de toename op grens 1-3. Er kan worden geconcludeerd, dat de bodemverandering in combinatie met het getijgedreven sedimenttransport wellicht een lichte toename van export heeft veroorzaakt, maar zeker niet doorslaggevend is voor de toegenomen erosie van cel 1.

Uit de meetdata volgt dat de sedimentuitwisseling tussen cel 1 en 3 in zeewaartse richting waarschijnlijk is toegenomen. Zeer duidelijk is deze trend alleen niet. Deze (mogelijke) toename veroorzaakt ook de toename van erosie in cel 3, omdat de sedimentuitwisseling tussen cel 3 en 4 nauwelijks is veranderd. Een andere interpretatie van cel 3 is dat nauwelijks een verschil is te zien. In beide gevallen (toename zeewaarts gericht transport en toename van erosie óf nauwelijks een verschil) is een overeenkomst te vinden met de modelresultaten. Waaruit geconcludeerd kan worden, dat de veranderde bodemligging waarschijnlijk invloed heeft gehad op de morfologische ontwikkeling van cel 3 en op de sedimentuitwisseling tussen cel 3 en de aangrenzende cellen.

Met betrekking tot de ontwikkeling van het zandvolume van cel 4 is in de metingen een duidelijk trendverschil waar te nemen. In 2002 is de erosie sterk toegenomen ten opzicht van 1972 en komt voornamelijk door een toegenomen transport naar cel 5. Deze toename van landwaarts gericht transport op grens 4-5 heeft tegelijkertijd gezorgd voor een toename van sedimentatie in cel 5. De modelsimulaties laten dezelfde trends zien. Enige onzekerheid bestaat er betreffende de trend in cel 4 zoals dat in paragraaf 8.2.2 is bepaald, maar het meest aannemelijke effect komt overeen met de meetdata. Het effect is niet alleen lokaal, maar het effect strekt zich uit over een groot gebied. Er is dus een aanwijzing dat de veranderde bodemligging in combinatie met getijgedreven transporten een belangrijke rol hebben gespeeld bij de toegenomen erosie van cel 4 en de toegenomen sedimentatie van cel 5.

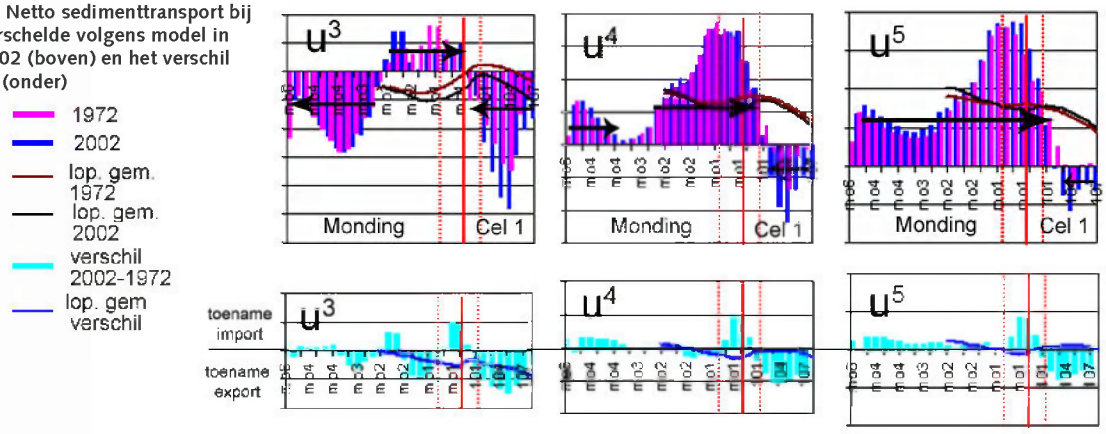
In het model zijn de netto transporten op de grenzen 5-6 en grens 7-8 in zeewaartse richting toegenomen. Dit komt in geen geval overeen met de metingen, waarin juist een meer landwaarts gericht transport wordt waargenomen. Over het effect op de volumeontwikkeling van de cellen 6 en 7 bestaat in het model onduidelijkheid. Echter, doordat de transportrichtingen in het model tegengesteld zijn aan wat de metingen aangeven (zeewaarts gericht transport respectievelijk landwaarts gericht transport) kan worden geconcludeerd dat in het meest oostelijk deel van het estuarium waarschijnlijk andere processen een doorslaggevende rol spelen bij de morfologische ontwikkeling dan de bodemgeometrie in combinatie met getij gedreven transporten.

8.2.5 Netto sedimenttransporten bij keel Westerschelde

Het effect in het overgangsgebied tussen de Westerschelde en monding is nauwkeuriger bekeken met de netto transporten van de individuele jaren en de (absolute) verschillen daartussen. In Figuur 8.11 zijn de transporten in de monding en over de grens met cel 1 weergegeven voor u^3, u^4 en u^5. In de onderste figuren is het verschil tussen de transporten weergegeven (2002

minus 1972). De schaal van de transporten bij 2002, 1972 en het verschil daartussen is gelijk bij een bepaalde macht, dus bij n=3 óf n=4 óf n=5.

Figuur 8.11 Netto sedimenttransport bij keel Westerschelde volgens model in 1972 en 2002 (boven) en het verschil 2002-1972 (onder)

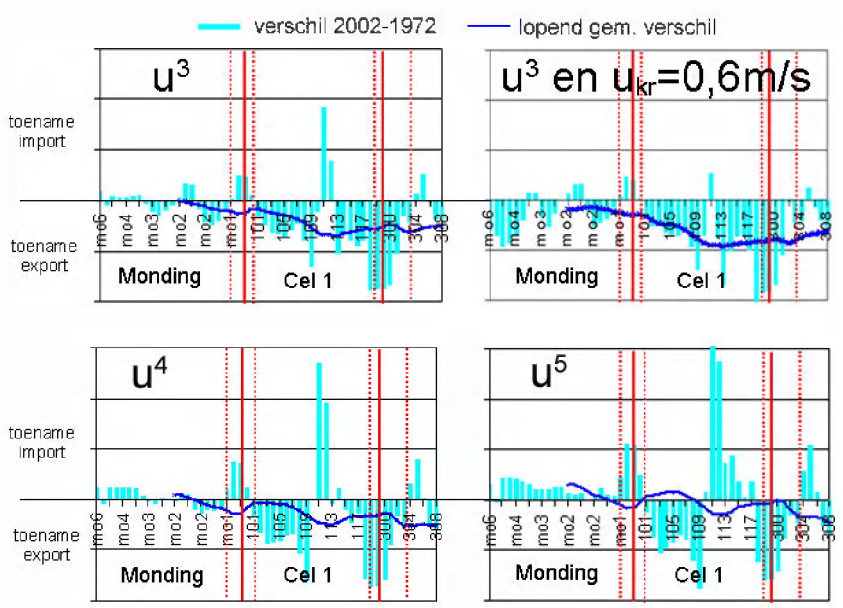


Het effect bij de keel van het estuarium kan verschillen, afhankelijk van de volgende factoren:

- Locatie van het grensgebied
  Binnen het grensgebied laten alle machten n een toename van import zien. Ten oosten van het grensgebied is juist een toename van export zien. Bij n=3 is ten westen van het grensgebied ook een toename van export waar te nemen. Een kleine verschuiving van de grens kan een ander effect opleveren. Het effect in het model hangt dus af van de locatie van de grens of grensgebied. De volgende vraag rijst: wat is de gevoeligheid van de grenzen bij metingen? Als het balansgebied wat groter of kleiner wordt gekozen, is het trendverschil bij de zandbalans dan hetzelfde?
- Resultaatinterpretatie
  Gemiddeld over een aantal raaien kan het effect anders zijn dan bij 1 raai of bij het gemiddelde over een veel groter gebied. De modeluitkomst kan in grote mate worden bepaald door lokale effecten.
- Transportformulering
  Bij n=4 en n=5 vindt in de monding en in het grensgebied geen toename van export plaats, terwijl bij n=3 in het mondingsgebied wel een toename van export is waar te nemen.

In het model kan de uitkomst van het effect bij de keel van het estuarium worden "gestuurd" met behulp van bovengenoemde factoren.

Uit de metingen volgt dat een toename van export gepaard gaat met een toename van erosie in cel 1. Stel dat de pessimistische inschatting uit Tabel 8.2 wordt beschouwd en een toename van export wordt geconstateerd in de modelresultaten (bijvoorbeeld bij een lichte verschuiving van het grensgebied), ook dan is een toename van erosie in cel 1 geenszins te observeren (Figuur 8.12). Mogelijk heeft de veranderde bodemligging voor een klein deel bijgedragen aan een toename van export of een afname van import, maar het veroorzaakt geen toename van erosie in cel 1.



Figuur 8.12 Effect bodemverandering op netto sedimenttransport in cel 1 met u^3, u^4, u^5 en u^3 met een drempelsnelheid van 0,6 m/s

8.3 Voorlopige conclusie en discussie

8.3.1 Voorlopige conclusie

Het verschil tussen de berekende sedimenttransporten in 1972 en 2002 maakt inzichtelijk wat de invloed is van een andere bodemgeometrie op het getijgedreven sedimenttransportpatroon. Het verschil wordt "het effect" genoemd.

Gebruik van verschillende macht n in de transportformulering (n=3, n=4 en n=5) en toepassing van wel of geen drempelsnelheid (≤ 0,6 m/s) heeft een relatief kleine invloed op het effect in de macrocellen. Variatie binnen de formulering kan het effect van een macrocel versterken of verzwakken. Het effect is wel gevoelig voor de locatie van het grensgebied tussen twee macrocellen. Dit komt doordat de transportverschillen sterk kunnen fluctueren per raai. Een kleine verschuiving van het grensgebied kan een ander effect opleveren. Ook kan het effect lokaal binnen het grensgebied anders zijn dan op "regionaal niveau". De sedimentuitwisseling tussen twee cellen en de volumeontwikkeling van een cel wordt in dat geval bepaald door lokale effecten.

De veranderde bodemligging heeft in de meeste berekeningen de volgende effecten:

- Grens monding-Westerschelde: toename landwaarts gericht transport (eventueel een lichte toename van zeewaarts gericht transport)
- Cel 1: toename sedimentatie (eventueel geen effect)
- Grens 1-3: toename zeewaarts gericht transport (eventueel geen effect)
- Cel 3: toename erosie (eventueel geen effect)
- Grens 3-4: geen of nauwelijks effect
- Cel 4: toename erosie (eventueel geen effect)
- Grens 4-5: toename landwaarts gericht transport
- Cel 5: toename sedimentatie

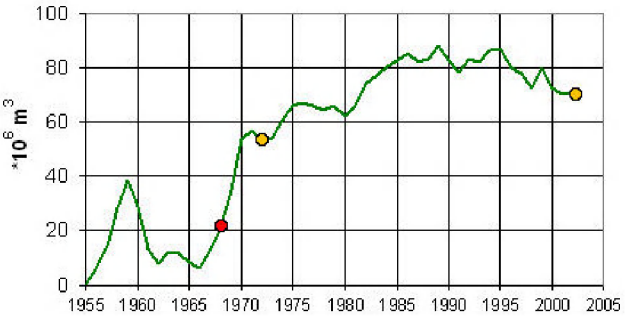
- Grens 5-6: toename zeewaarts gericht transport
- Grens 7-Belgie: toename zeewaarts gericht transport

Wanneer deze effecten worden vergeleken met de meetdata, kan het volgende worden geconcludeerd:

- Een relatieve toename van export gepaard met een toename van erosie van cel 1 is niet te observeren in het model. Dus in het meest westelijke deel, bij de overgang tussen monding en Westerschelde, komen de data en modelresultaten niet met elkaar overeen.
- Er zijn overeenkomsten zijn te vinden tussen de modelresultaten en meetdata in cel 3 en op de celranden van cel 3. Erg duidelijk zijn de trends in meetdata en model alleen niet.
- In cellen 4 en 5 komen de modelresultaten en meetdata met elkaar overeen.
- Helemaal in het oosten (cellen 6 en 7) is het effect in het model tegengesteld aan het trendverschil in de meetdata. Hier is dus geen overeenkomst te vinden tussen model en meting.

8.3.2 Discussie

Een toename van export of een afname van import in 2002 ten opzichte van 1972 kan niet worden waargenomen in de modelsimulaties. Mogelijk is de bodemverandering in combinatie met getijgedreven transporten niet bepalend voor de toegenomen export. Maar het kan ook zijn dat het trendverschil tussen 1972 en 2002 niet duidelijk genoeg is om een toename van export te verwachten in het model (Figuur 8.13). Het trendverschil tussen 2002 en 1965-1970 is veel groter. Mogelijk is het effect weggevallen in de "ruis" van het model. Om deze onzekerheid weg te nemen is ook een simulatie uitgevoerd met een bodem uit 1968. Met deze simulatie kan tevens inzicht worden verkregen in het effect op het sedimenttransportpatroon van de twee grootschalige geulverdiepingen samen.



Figuur 8.13 Extra gekozen bodem in model op basis van natuurlijke volumeverloop (V_{nat})

Aangestipt zijn de jaren 1972 en 2002 (geel) en 1968 (rood).

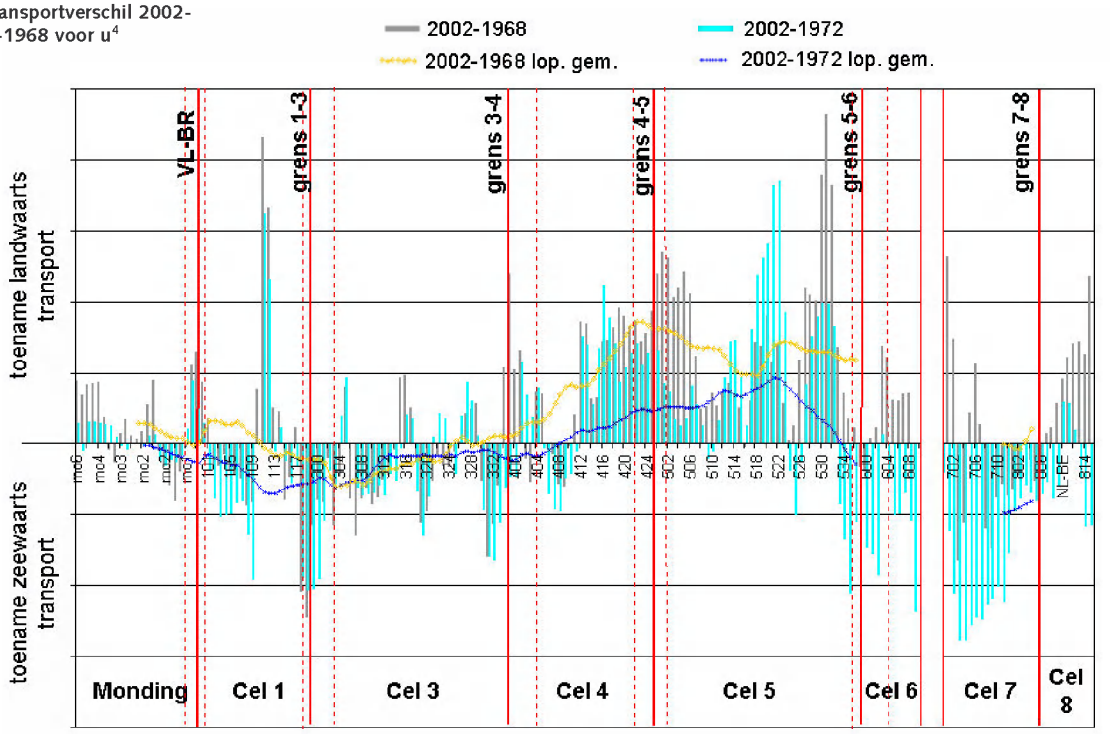
8.4 Analyse modelsimulatie 1968

Voor de simulatie van 1968 zijn dezelfde invoerwaarden en randvoorwaarden gebruikt als bij 1972 en 2002 met het enige verschil dat een bodem uit 1968 is toegepast. De sedimenttransporten zijn berekend met u^4 zonder drempelsnelheid. Omdat macht n en toepassing van een drempelsnelheid nauwelijks invloed heeft op het verschil tussen twee modelsimulaties (zie paragraaf 8.2.2 en Bijlage K) wordt ervan uitgegaan dat de simulatie met u^4 representatief is voor alle transportformuleringen van de vorm u^n.

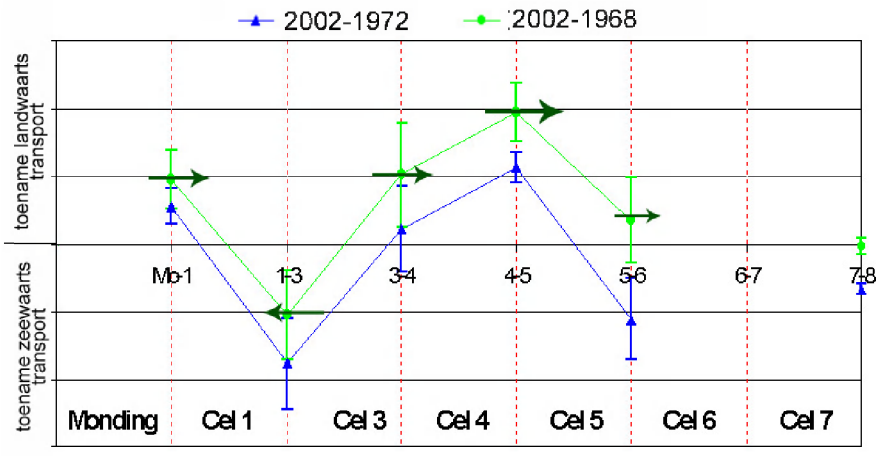
In 8.3.1 is geconcludeerd dat de meetdata en modelresultaten van cel 4 en 5 met elkaar in overeenstemming zijn. Dit is niet het geval in het meest oostelijk deel van de Westerschelde: cellen 6 en 7. Deze conclusies kunnen worden geverifieerd met de simulatie van 1968.

Het effect van de veranderde bodemligging op de sedimenttransporten is bepaald door het verschil tussen de transporten te nemen (Figuur 8.14). Hieruit blijkt dat ook bij de simulatie met 1968 geen sprake is van een duidelijke toename van export (of afname van import).

Figuur 8.14 Transportverschil 2002-1972 en 2002-1968 voor u[4]



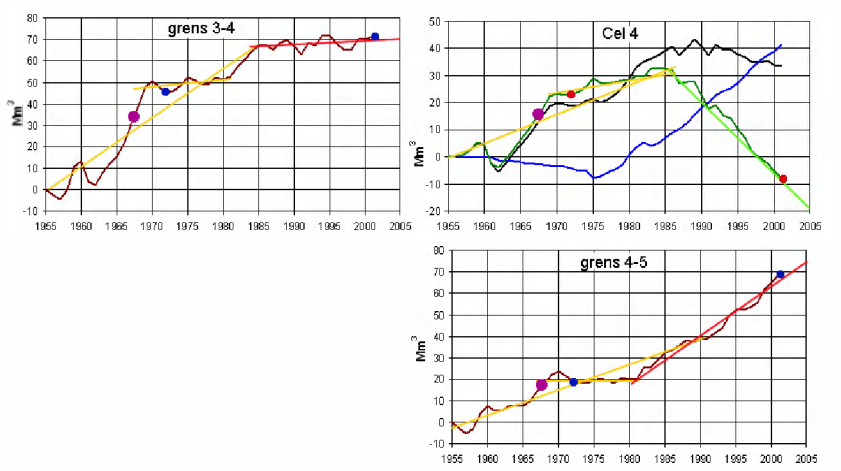
Het effect per macrocel is bepaald door de transportverschillen te middelen binnen de grensgebieden (Figuur 8.15). Daaruit volgt dat in het grensgebied tussen de monding en cel 1 zelfs een toename van import is waar te nemen. Wat betreft de sedimentuitwisseling tussen monding en Westerschelde komen de modelresultaten dus niet overeen met de meetdata.



Figuur 8.15 Effect bodemligging voor 2002-1972 en 2002-1968, berekend door binnen de grensgebieden het gemiddelde te nemen

Een stijgende lijn betekent een toename van sedimentatie, een dalende lijn betekent een toename van erosie.

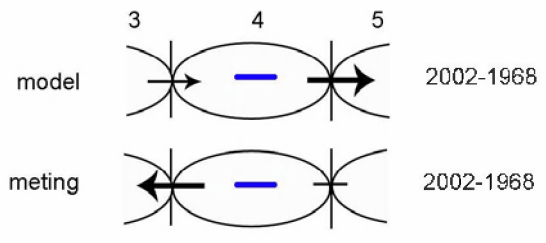
Het effect in de overige macrocellen kan ook worden vergeleken met de trendverschillen tussen 1968 en 2002 uit de metingen. In 8.3.1 is geconcludeerd dat de modelresultaten van 1972 en 2002 in cel 4 in overeenstemming zijn met de meetdata. Hier is onderzocht of dat ook geldt voor de simulatie van 1968. In Figuur 8.16 is de geanalyseerde meetdata van cel 4 uit paragraaf 6.2 en 6.3 nogmaals gegeven met daarin aangestipt het jaar 1968.



Figuur 8.16 Meetdata van cel 4 en randen van cel 4 met mogelijke trendlijnen rond 1968, 1972 en 2002

De figuren linksboven en rechtsonder geven de sedimentuitwisseling (Mm^3) tussen cel 4 en 3 resp. cel 4 en 5 weer. Een stijgende lijn betekent landwaarts transport, een dalende lijn zeewaarts transport. De figuur rechtsboven geeft de cumulatieve zandvolumes (Mm^3) van cel 4. De groene lijn is het natuurlijke zandvolume (V_{nat}). Een stijgende lijn betekent sedimentatie, een dalende lijn erosie.

In 2002 is de erosie relatief toegenomen ten opzichte van 1968 (figuur rechtsboven). De modelsimulaties laten ook een toename van erosie zien in cel 4. In eerste instantie is er een dus een overeenkomst tussen model en meting, maar dat is toch niet helemaal correct. Want waardoor wordt de toename van erosie veroorzaakt? In het model wordt de toename van erosie veroorzaakt door een sterke toename van landwaarts gericht transport op grens 4-5. Als dit wordt vergeleken met de meetdata, komt dat niet overeen. In de meetdata is op de grens 4-5 nauwelijks een trendverschil te zien tussen 1968 en 2002. De toegenomen erosie van cel 4 in de meetdata wordt namelijk veroorzaakt door een afname van landwaarts gericht transport op grens 3-4. (zie figuur linksboven in Figuur 8.16). Het verschil tussen meetdata en model is geïllustreerd met Figuur 8.17.

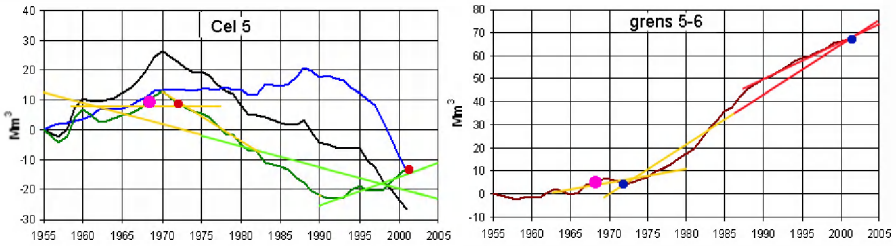


Figuur 8.17 Verschil 2002-1968 in cel 4 en randen van cel 4 volgens model en meting

Eventueel kan de data over een langere periode worden geïnterpreteerd, wanneer rekening wordt gehouden met een bandbreedte. Als de trendlijn over periode 1955-1985/1990 wordt beschouwd, zoals aangegeven in Figuur 8.16, is het trendverschil 2002-1968 in alle drie de figuren nagenoeg gelijk aan het trendverschil 2002-1972. Ook dat is niet overeenkomstig met de modelresultaten; het verschil tussen 2002-1972 en 2002-1968 in het model is verschillend op grenzen 3-4 en 4-5.

Dus ook al is een toename van erosie in cel 4 te zien in de modelresultaten en de meetdata, van een overeenkomst is geen sprake. Hieruit kan geconcludeerd worden dat, op basis van vergelijking tussen 1968 en 2002, de bodemligging in combinatie met getijgedreven transporten geen dominante invloed heeft op de morfologische ontwikkeling. Dit is tegenstrijdig aan de conclusie uit 8.3.1.

Voor cel 5 is een zelfde analyse gedaan. In Figuur 8.18 is de cumulatieve volumeontwikkeling van cel 5 (links) en de sedimentuitwisseling op de grens tussen cel 5 en 6 (rechts) gegeven.



Figuur 8.18 Meetdata van cel 5 en zeewaartse rand van cel 5 met mogelijke trendlijnen rond 1968, 1972 en 2002

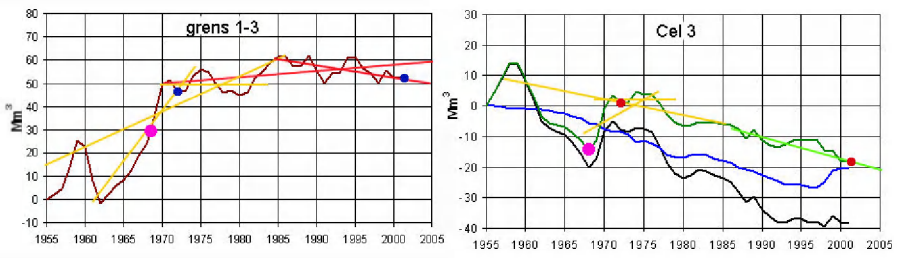
De linker figuur geeft de cumulatieve zandvolumes (Mm^3) van cel 5 weer. De groene lijn is het natuurlijke zandvolume (V_{nat}). Een stijgende lijn betekent sedimentatie, een dalende lijn erosie. De rechter figuur geeft de sedimentuitwisseling (Mm^3) tussen cel 5 en 6 weer. Een stijgende lijn betekent landwaarts transport, een dalende lijn zeewaarts transport.

Cel 5 zandt in 1968 aan, net als in 2002. Het trendverschil tussen 1968 en 2002 is in de meetdata dus klein. De modelsimulaties laten juist een toename van sedimentatie zien. Meetdata en model zijn ook hier niet in overeenstemming, terwijl dat bij 1972-2002 wel het geval was. Eventueel kan de meetdata over een andere periode wordt geïnterpreteerd (zie trendlijnen in Figuur 8.18). Het effect van 2002-1972 en 2002-1968 zou in het model dan nagenoeg hetzelfde moeten zijn om overeenkomsten te vertonen met de meetdata. Ook dat is niet het geval. Er kan dus geconcludeerd worden, dat ook hier geen overeenkomsten zijn te vinden tussen model en metingen bij vergelijking van 1968 en 2002, terwijl dat bij vergelijking van 1972 en 2002 wel het geval was.

Op de grens 5-6 was de transportrichting in het model tegengesteld aan de transportrichting uit metingen bij vergelijking van 1972 en 2002. Wanneer het modelresultaat 2002-1968 vergeleken wordt met het trendverschil 2002-1968 in de meting is juist wél een overeenkomst te zien. In beide gevallen is een lichte toename van landwaarts gericht transport of nauwelijks

een verschil waarneembaar. Ook op de grens tussen Nederland en België is het transportverschil in het model tussen 2002-1968 vrijwel nihil, wat ook dichter bij de verwachte uitkomst licht. Dit betekent dat, op basis van de uitkomsten van 1968 en 2002, geconcludeerd kan worden dat in het oosten de bodemligging en het getijgedreven transport mogelijk wél invloed heeft op de morfologische ontwikkeling.

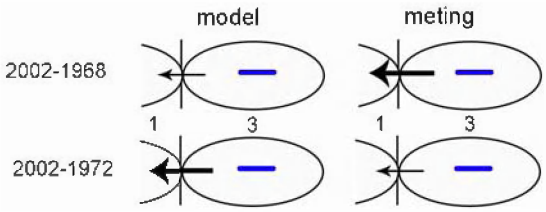
Als laatste is de volumeontwikkeling van cel 3 en de sedimentuitwisseling tussen cel 1 en 3 vergeleken met de aanvullende modelresultaten. In Figuur 8.19 is de zandbalans van cel 3 (rechts) en de sedimentuitwisseling tussen cel 1 en 3 (links) gegeven.



Figuur 8.19 Meetdata van cel 3 en landwaartse rand van cel 3 met mogelijke trendlijnen rond 1968, 1972 en 2002

De linker figuur geeft de sedimentuitwisseling (Mm^3) tussen cel 3 en 1 weer. Een stijgende lijn betekent landwaarts transport, een dalende lijn zeewaarts transport. De rechter figuur geeft de cumulatieve zandvolumes (Mm^3) van cel 3 weer. De groene lijn is het natuurlijke zandvolume (V_{nat}). Een stijgende lijn betekent sedimentatie, een dalende lijn erosie.

Cel 3 zandt aan in 1968 en erodeert in 2002. Er valt dus een toename van erosie te verwachten in de modelresultaten. Dit is inderdaad het geval, maar er moet een opmerking bij geplaatst worden. In het model is de toegenomen erosie tussen 1968 en 2002 gelijk aan de toegenomen erosie tussen 1972 en 2002, terwijl dat in de meetdata alleen is waar te nemen als een trendlijn over een langere periode wordt bepaald (bijvoorbeeld over periode 1968-1977). Mogelijk is hier een overeenkomst, maar dan moeten de trendverschillen op de randen van cel 3 ook overeenkomsten vertonen. Grens 3-4 is al eerder behandeld en gaf tegengestelde trendverschillen tussen meetdata en model. Op de grens 1-3 heeft de bodemverandering tussen 1972 en 2002 gezorgd voor een *grotere* toename van zeewaarts gericht transport dan de bodemveranderingen tussen 1968 en 2002 (Figuur 8.15). In de meetdata is juist het omgekeerde het geval: het trendverschil tussen 1968 en 2002 is groter dan tussen 1972 en 2002 (Figuur 8.19). Dit kan geïllustreerd worden met Figuur 8.20. Op de randen van cel 3 is dus geen overeenstemming tussen model en data.



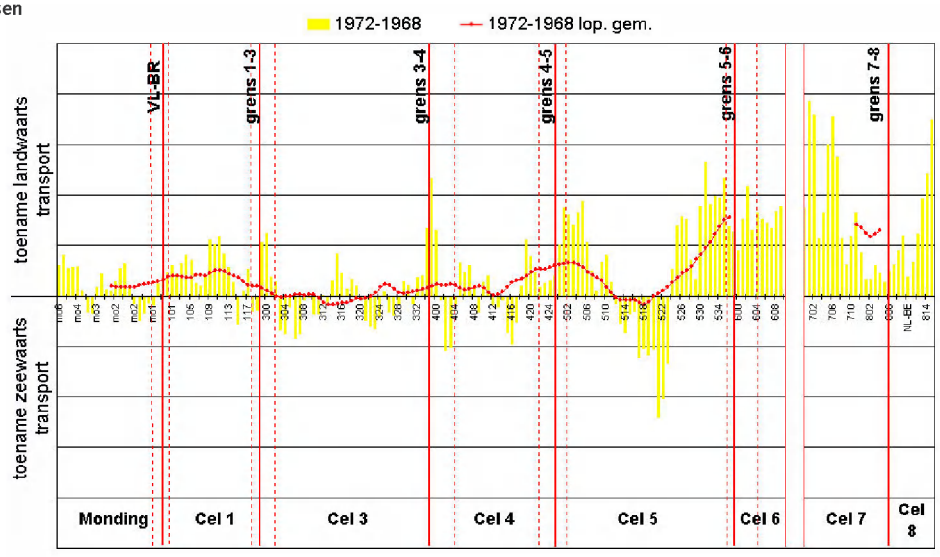
Figuur 8.20 Verschil 2002-1968 en 2002-1972 in cel 3 en grens 1-3 volgens model en meting

Samengevat komt het erop neer dat bij vergelijking van het trendverschil 2002-1968 tussen meetdata en model alleen in het oosten (cel 6 en 7) overeenkomsten zijn te vinden. In een aantal cellen lijken de trends van de volumeontwikkeling van individuele cellen wel overeenkomsten te vertonen, maar wanneer gekeken wordt naar de oorzaak van deze trends (de sedimentuitwisseling tussen cellen), komen de trends niet overeen. De uitkomsten van de vergelijking tussen meting en model bij 1972-2002 en 1968-2002 spreken elkaar dus tegen.

De bodemveranderingen gedurende de periode 1968-1972 heeft de volgende invloed gehad op de sedimenttransporten in de Westerschelde (afgeleid uit Figuur 8.21):

- Vanuit de monding wordt relatief meer sediment geïmporteerd, maar de toename van import is niet groot.
- In cellen 1 en 3 is geen of nauwelijks een effect.
- In cel 4 vindt een lichte toename van erosie plaats als gevolg van een toegenomen landwaarts transport op grens 4-5.
- Toename van erosie in cel 5 als gevolg van een toename van de landwaarts gerichte transporten op grens 5-6.
- In het meest oostelijke deel is het effect het grootst. In cellen 6 en 7 is het sedimenttransport in landwaarts richting sterk toegenomen.

Figuur 8.21 Transportverschil tussen 1968 en 1972 voor u[4]



Door de bodemveranderingen gedurende de periode 1972-2002 (inclusief voltooiing eerste geulverdieping, tweede geulverdieping en recente bagger- en stortstrategie) zijn de volgende aanvullende effecten waarneembaar (afgeleid uit Figuur 8.14):

- De sterke toename van landwaarts gerichte transporten in het meest oostelijk deel (cellen 6 en 7) is niet meer waar te nemen. Deze is dus weer afgenomen. Het effect door de veranderingen in de bodem gedurende 1968-1972 lijkt tijdelijk te zijn.
- Het transport bij Hansweert (grens 4-5) is in landwaartse richting nog verder toegenomen. Het effect wordt dus nog verder versterkt.
- In het westelijk deel van de Westerschelde is een lichte toename van zeewaarts gericht transport waarneembaar tot ongeveer halverwege cel 1.

8.5 Conclusie

De invloed van de verschillende bodemliggingen op het netto sedimenttransport is onderzocht. Omdat het gaat om het effect, is de analyse vooral gericht op het *verschil* tussen de modelsimulaties.

Met betrekking tot de sedimentuitwisseling tussen Westerschelde en monding, laat de modelsimulatie met een bodem uit 2002 géén relatieve toename van export zien, vergeleken met een bodem uit 1972. Omdat het trendverschil tussen 1972 en 2002 in de meting wellicht niet groot genoeg was om te kunnen worden opgemerkt door het model, is ook een simulatie gedaan met een bodem uit 1968. Het trendverschil in de meetdata is tussen 1968 en 2002 veel groter. Maar ook tussen deze twee modelsimulaties (1968-2002) is geen toename van export waar te nemen. Er is zelfs sprake van een relatieve toename van import.

Met betrekking tot het sedimenttransportpatroon van de gehele Westerschelde zijn in een aantal deelgebieden overeenkomsten te vinden tussen de metingen en modelresultaten. Maar er is een inconsistentie te constateren. De deelgebieden waar het gemeten trendverschil overeenkomt met de berekeningen bij vergelijking van 1972 en 2002, komt het trendverschil bij 1968 en 2002 niet overeen. Het omgekeerde geldt ook: in een aantal gebieden komt het verschil tussen 1968 en 2002 in de meting overeen met de modelresultaten, maar dat is dan niet het geval voor 1972-2002.

Mogelijk oorzaken voor de afwijking tussen modelresultaten en meting zijn:

- De bodemligging in combinatie met getijgedreven sedimenttransporten is niet (als enige) doorslaggevend voor de lange termijn morfologische ontwikkeling van de Westerschelde en voor de sedimentuitwisseling met de monding. Andere processen spelen wellicht een rol.
- In de modellering worden niet de juiste processen meegenomen, zoals (wind)golven en dichtheidsstromen. Een verandering van de bodemligging heeft mogelijk wel invloed op de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde en de sedimentuitwisseling tussen monding en Westerschelde als deze processen worden meegenomen.
- De transportformulering met $S \propto u^n$ representeert niet de sedimenttransporten in de Westerschelde. Mogelijk moet een andere transportformulering worden toegepast.
- De berekende sedimenttransporten representeren de morfologische ontwikkeling op de korte termijn, maar niet de morfologische ontwikkeling op de lange(re) termijn. Een terugkoppeling van de veranderingen in de morfologie (a.g.v. de berekende sedimenttransporten) naar een verandering in de hydrodynamica ontbreekt.

Binnen de grenzen van de modelaannamen (d.w.z. het eerste punt van hierboven beschreven mogelijke oorzaken) heeft de bodemverandering tussen 1968 en 1972 wél de volgende invloed op het netto sedimenttransport:

- Lichte toename sedimentimport vanuit de monding.
- Relatieve toename van landwaarts gerichte transporten in cellen 5, 6 en 7 en rondom het grensgebied tussen cel 4 en 5. Hierdoor is cel 4 en 5 meer gaan eroderen en vindt in het meest oostelijk deel (cel 7) een toename van aanzanding plaats.

De bodemverandering tussen 1968 en 2002 heeft de volgende invloed op het netto sedimenttransport:

- Een lichte toename van sedimentimport vanuit de monding, gelijk aan die van 1968-1972. Gedurende 1972-2002 vindt nauwelijks een verandering van de sedimentuitwisseling bij de monding plaats.
- De sterke toename van landwaarts gerichte transporten in het meest oostelijk deel (cellen 6 en 7) is tussen 1968 en 2002 niet waar te nemen. Het effect door de veranderingen in de bodem gedurende 1968-1972 lijkt tijdelijk te zijn. Tussen 1972 en 2002 is dan ook een sterke toename van zeewaarts gericht transport te zien.
- De relatieve toename van landwaarts gericht transport is tussen 1968 en 2002 groter dan tussen 1972 en 2002. Het transport op de grens 4-5 is tussen 1972 en 2002 in landwaartse richting dus nog verder toegenomen.
- In het westelijk deel van de Westerschelde is een lichte toename van zeewaarts gericht transport waarneembaar tussen 1968 en 2002 tot ongeveer halverwege cel 1. Doordat tussen 1968 en 1972 een lichte toename van landwaarts gericht transport is waar te nemen, is in datzelfde gebied het transport tussen 1972 en 2002 nog verder toegenomen in zeewaartse richting dan tussen 1968 en 2002.
- De relatieve toename van sedimentatie in cel 1 en de relatieve toename van erosie in cel 3 is gedurende 1968-2002 en 1972 en 2002 nagenoeg gelijk.

Binnen de grenzen van de modelaannamen geldt ook het volgende:

- Gebruik van verschillende macht n in de transportformulering (n=3, n=4 of n=5) en toepassing van wel of geen dieptegemiddelde drempelsnelheid ($\leq$ 0,6 m/s) heeft een relatief kleine invloed op het effect. Variatie binnen de formulering kan het effect van een macrocel wel versterken of verzwakken.
- Doordat de transporten sterk kunnen fluctueren per raai is het effect gevoelig voor de locatie van de grens of grensgebied tussen twee macrocellen. De sedimentuitwisseling tussen twee cellen en de volumeontwikkeling van een cel kan grotendeels worden bepaald door lokale effecten.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

De conclusies worden geformuleerd aan de hand van de doelstellingen uit paragraaf 1.3.2.

1) Vergroot de kennis met betrekking tot de betrouwbaarheid van de data; of gesproken kan worden van een zandvolume toenemende en zandvolume afnemende trend a.g.v. natuurlijke processen in de periode vóór 1989 respectievelijk na 1989.

Gedurende de periode 1955-1970 fluctueert het zandvolume sterk, terwijl daar geen fysische verklaring voor is. De gemeten trends kunnen daarom alleen op de lange termijn (10-15 jaar) worden vertrouwd. Vóór 1985 vond een natuurlijke sedimentimport plaats in de Westerschelde. In de periode 1985-1991 stabiliseert het natuurlijke zandvolume en sindsdien importeert de Westerschelde geen zand meer op natuurlijke wijze. Begin jaren negentig lijkt zelfs een exporterende trend te zijn ingezet, maar of deze trend doorzet is onduidelijk. Dit zal blijken uit toekomstige metingen.

2) Bepaal of de veranderingen in de bodemgeometrie de dominante factor is voor de onttrekking of aanvulling van zand door de natuur.

Een modelsimulatie met de bodem van 2002 laat geen toename van sedimentexport zien (of een afname van import) vanuit de Westerschelde naar de monding ten opzichte van de modelsimulatie met een bodem van 1968 of 1972. Oftewel, binnen de grenzen van de modelaannamen is de bodemligging in combinatie met getijgedreven transporten niet bepalend voor de sedimentuitwisseling tussen Westerschelde en monding. Mogelijke oorzaken voor de afwijking tussen modelresultaten en metingen zijn:

- De meerjarige trends in de zandbalansdata zijn toch niet nauwkeurig. Deze onnauwkeurigheden zijn onbekend en kunnen zijn veroorzaakt door fouten in lodingsdata, ingreepgegevens en door onjuiste aannamen.
- De transportformulering die is gebruikt (u^n op basis van de dieptegemiddelde stroomsnelheid) representeert niet het sedimenttransport in de Westerschelde. De vraag is: kan een complex systeem zoals de Westerschelde wel worden gerepresenteerd door een relatief simpele transportformulering zoals $S \propto u^n$?
- De berekende sedimenttransporten bepalen de sedimentuitwisseling tussen monding en Westerschelde op de korte termijn, maar niet de sedimentuitwisseling op de lange termijn. Een terugkoppeling van de veranderingen in de morfologie (a.g.v. de berekende sedimenttransporten) naar een verandering in de hydrodynamica ontbreekt.
- In het model zijn niet genoeg processen meegenomen, zoals (wind)golven of dichtheidstromen. Wanneer deze processen worden meegenomen in de modelberekening, is het mogelijk dat de bodemverandering wel van invloed is op de sedimentuitwisseling tussen monding en Westerschelde.

Wat in ieder geval wél kan worden geconcludeerd is dat het effect van een andere bodemgeometrie niet zo significant is, dat een toename van export of een afname van import boven de modelruis en andere modelonnauwkeurigheden uitkomt.

3) Bepaal wat, in het algemeen, de invloed is van de bodemgeometrie op de sedimenttransportpatronen en het sedimenttransport in de Westerschelde.

In geen enkel deelgebied van de Westerschelde komen de trendverschillen tussen 1968, 1972 en 2002 van de modelsimulaties overeen met de trendverschillen in de metingen. In een aantal deelgebieden zijn wel overeenkomsten te vinden tussen 1972 en 2002, maar dan wijkt het trendverschil tussen 1968 en 2002 (of tussen 1968 en 1972) af. Het omgekeerde komt ook voor. De verklaringen hiervoor zijn hetzelfde als genoemd na doelstelling 2, dus:

- De meerjarige trends in de zandbalansdata zijn niet nauwkeurig.
- De bodem in combinatie met getijgedreven transporten is niet (als enige) bepalend voor de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde en van deelgebieden in de Westerschelde.
- De transportformulering die is gebruikt (u^n op basis van de dieptegemiddelde stroomsnelheid) representeert niet het sedimenttransport in de Westerschelde.
- De berekende sedimenttransporten representeren mogelijk wel de morfologische ontwikkeling van de deelgebieden op de korte termijn, maar niet de morfologische ontwikkeling op de lange termijn.
- In het model zijn niet voldoende processen meegenomen.

Doordat de berekende trendverschillen de ene keer wel overeenkomen met de gemeten waarden (bijv. tussen 1972 en 2002) en de andere keer niet (bijv. tussen 1968 en 1972), bestaat het vermoeden dat de modelresultaten in een aantal gevallen "toevallig" overeenkomen met de meetdata. Waarschijnlijk is de gebruikte methode niet geschikt om dit probleem op te lossen. Er is in ieder geval te veel onzekerheid met betrekking tot de methode om de hypothese (bodemligging heeft via de getijgedreven transporten een afname van import of toename van export veroorzaakt) echt te kunnen verwerpen. Wat in ieder geval wél kan worden geconcludeerd is dat het effect van de bodemgeometrie, ook in deelgebieden van de Westerschelde, niet zo significant is dat de effecten boven de modelruis en modelonnauwkeurigheid uitkomen.

Binnen de grenzen van de modelaannamen heeft de bodemgeometrie de volgende invloed:

- De eerste verdieping van 1972 veroorzaakt een toename van (getijgedreven) sedimenttransporten in landwaartse richting, vergeleken met een berekening met een bodem van 1968. In het oostelijk deel zijn de sedimenttransporten het meest toegenomen. Hier is het effect dus het grootst. In het westelijke gedeelte is het sedimentatie/erosie patroon nauwelijks veranderd. Vanuit het midden van het estuarium, rondom Hansweert, vindt een relatieve toename van erosie plaats. Ter hoogte van Bath vindt relatief meer aanzanding plaats.
- De twee verdiepingen en de recente bagger- en stortstrategie (2002) veroorzaken in het midden en oostelijk gedeelte van de Westerschelde een toename van landwaarts gericht transport ten opzichte van de

transporten berekend met de bodem van vóór de grootschalige verdiepingen (1968). In het westen is een relatieve toename van zeewaarts gericht transport waarneembaar, maar dit effect is veel minder groot dan in het oosten. Rondom Hansweert en verder oostwaarts tot en met de Platen van Valkenisse is het effect op de sedimenttransporten het grootst. In het gebied tussen Borssele en Hansweert (cellen 3 en 4) vindt een relatieve toename van erosie plaats. Vanuit dit gebied wordt relatief méér sediment naar cel 1 (ter hoogte van de haven van Vlissingen) en naar het oosten getransporteerd. Deze gebieden zanden daardoor relatief meer aan.

- Helemaal in het oosten van het estuarium, ten noorden en oosten van het Land van Saeftinge, zijn de transporten tussen 1968 en 1972 relatief sterk toegenomen in landwaartse richting. Dit lijkt een tijdelijk effect te zijn, omdat tussen 1972 en 2002 de transporten in zeewaartse richting weer toenemen. Rondom Hansweert wordt het effect groter. Hier zijn de transporten gedurende periode 1968-1972 in landwaartse richting toegenomen. Tussen 1972 en 2002 zijn deze transporten nog veel verder toegenomen.
- Het getijprisma is in het gehele estuarium toegenomen als gevolg van veranderde bodemligging tussen 1972 en 2002. De debiettoename gaat in het westelijk en midden deel van de Westerschelde gepaard met een toename van 10 tot 30% van het bruto transport. In het oostelijk deel gaat de debiettoename gepaard met een afname van 20-50% van het bruto transport. Het doorstroomoppervlak in het oostelijk deel is dus zodanig toegenomen tussen 1972 en 2002 (door bijvoorbeeld uitdieping en/of toename van de getijslag), dat de stroomsnelheden over het algemeen lager zijn geworden.
- De interactie tussen het M_2-getij en het getijgemiddelde stromingsveld speelt een dominante rol voor het residuele sedimenttransport op de lange termijn. Ook de interactie tussen het M_2-getij en de hogere componenten kan mede bepalend zijn voor de grootte en richting van het residuele sedimenttransport. De *veranderingen* van het (getijgemiddelde) sedimenttransport op de lange termijn als gevolg van de bodemverandering tussen 1972 en 2002 kunnen worden veroorzaakt door veranderingen van de interactie tussen het M_2-getij en de residuele stroming (M_0) en/of door de interactie tussen het M_2-getij en de hogere harmonischen (M_4, M_6). Het residuele sedimenttransport a.g.v. de bodemligging wordt op de beschouwde locaties in het oostelijk deel vooral beïnvloedt door de M_2M_4-interactie en de $M_2M_4M_6$-interactie en op de locaties in het westelijk deel door de M_0M_2-interactie.

9.2 Discussie

De importerende trend vóór 1985 en de exporterende trend van de laatste jaren is in de orde van 1 á 2 Mm^3 per jaar. Het is mogelijk dat de sedimentuitwisseling op de grens tussen Nederland en België in de loop der tijd is veranderd. Dit kan ook gelden voor de sedimentuitwisseling met het Land van Saeftinge. Veranderingen van 1 á 2 Mm^3 in de loop der tijd zijn niet ondenkbaar. Dit kan betekenen dat de import/export trend sterk kan worden afgezwakt. Zodoende, blijft onzekerheid bestaan met betrekking tot de nauwkeurigheid van de data.

Ook kan de vraag worden gesteld of het sedimenttransport in een complex systeem, zoals de Westerschelde, wel kan worden gerepresenteerd door een simpele formulering als $S \propto u^n$. Wanneer wordt geconcludeerd dat deze methode waarschijnlijk niet geschikt is om doelstelling 2 en 3 te bewerkstelligen, op welke manier kan dat dan wel? Andere modellen, ontwikkeld voor de Westerschelde, zijn mogelijk inzetbaar.

In 2004 is in opdracht van Rijkswaterstaat een morfologisch model ontwikkeld voor de Westerschelde op basis van Delft3D. Er wordt gebruik gemaakt van de Van Rijn formulering, waarbij rekening wordt gehouden met zowel suspensie- als bodemtransport, variatie in korreldiameter, bovenstroomse condities, advectie en diffusie en condities eerder in de tijd. Ook is er een terugkoppeling tussen bodemverandering en waterbeweging. Tot op heden blijkt ook dit model niet geschikt om de morfologische ontwikkeling van deelgebieden van de Westerschelde te modelleren en ook niet om de zandimport/export te reproduceren. Modelaanpassingen zoals verdichting van de roosterresolutie, kalibratie/validatie op stroomsnelheden en toepassing van gegradeerd sediment moet de voorspelkracht van het model in de toekomst vergroten.

Ook zijn twee ééndimensionale netwerkmodellen toegepast op de Westerschelde: het procesgeoriënteerde model SOBEK en het semi-empirische model ESTMORF. De modellen worden toegepast om morfologische ontwikkelingen op de lange termijn (decennia) berekenen. Het SOBEK model is alleen (nog) niet gekalibreerd en het ESTMORF model is niet gevalideerd. Een project om deze modellen te verbeteren en aan te passen zal begin 2005 van start gaan.

9.3 Aanbevelingen

Met betrekking tot de conclusie dat andere processen dan de bodemligging in combinatie met getijgedreven sedimenttransport waarschijnlijk een rol spelen bij de afname van import en/of toename van export, kan de volgende aanbeveling worden gedaan:

- De Oosterscheldekering is in gebruik genomen vanaf 1987. Omstreeks deze periode is ook een afname van de import te zien. Het zandvolume van de buitendelta van de Oosterschelde is de laatste jaren afgenomen (De Bok, 2002). De buitendelta's van de Westerschelde en Oosterschelde hebben (waarschijnlijk) een interactie met elkaar. Het sedimenttekort van de buitendelta van de Oosterschelde zou kunnen worden aangevuld door sediment van de buitendelta van de Westerschelde en door sediment uit de Westerschelde zelf. Dit kan (uiteindelijk) leiden tot een sedimentonttrekking van de Westerschelde. Hier zal nader onderzoek naar moeten worden gedaan.

Om de nauwkeurigheid van de zandbalans te vergroten zijn de volgende punten aan te bevelen:

- De zandbalans kan worden aangevuld met de data van de laatste jaren (2003 en 2004). Hieruit kan volgen of de exporterende trend zich doorzet. Mogelijk is de export maar tijdelijk.
- Aanvullend onderzoek naar de betrouwbaarheid van de (historische en huidige) lodingsdata en ingreepgegevens om een beter beeld te krijgen van de bandbreedte.

- Onderzoek naar de sedimentuitwisseling tussen Nederland en België. Een deel van de waargenomen export kan over de grens met België verdwijnen. Ook kan de sedimentuitwisseling in de tijd zijn veranderd. Om de aanname (transport over grens NL-BE = 0) te verifiëren of aan te passen, moet hier meer onderzoek naar worden verricht.
- Onderzoek naar de sedimentuitwisseling tussen Land van Saeftinge en de Westerschelde.

Procesgeoriënteerde modellen zijn niet nauwkeurig genoeg om de dynamische (evenwichts)relaties te kunnen reproduceren. Een ander model of een andere modelmethode is noodzakelijk om de hypothese (bodemgeometrie is dominant voor sedimentuitwisseling tussen Westerschelde en monding) te kunnen verwerpen of aanvaarden. De volgende aanbevelingen kunnen worden gedaan:

- De sedimenttransporten en morfologische veranderingen zullen eerst op kleinere schaal correct moeten worden gemodelleerd, bijvoorbeeld op geulniveau. Modellen als ESTMORF en SOBEK kunnen hierbij worden ingezet om de uitkomsten te verifiëren.
- Grondige en structurele aanpak bij het opzetten van een procesgeoriënteerd morfologisch model. Hierbij zal stapje voor stapje moeten worden bekeken wat de invloed is van afzonderlijke processen en factoren op de sedimentuitwisseling tussen Westerschelde en monding. Hierbij kan gedacht worden aan de getijrandvoorwaarden, zeespiegelrijzing, zandbeschikbaarheid op de randen, rivierafvoer, 2D/3D, (wind)golven, uitgevoerd bagger- & stortbeleid en uitgevoerd zandwinbeleid. Mogelijke invloeden op de sedimentuitwisseling tussen monding en Westerschelde kunnen op deze manier worden onderzocht en structureel worden afgewerkt.

Tenslotte wordt nog een aanbeveling gedaan met betrekking tot de grenzen van (deel)gebieden in de Westerschelde:

- Er wordt aanbevolen om de grens tussen deelgebieden in de Westerschelde niet te presenteren door één enkele raai, omdat sprake is van een grens*gebied*. Mogelijk fluctueren de sedimenttransporten in en rondom het grensgebied sterk, waardoor niet zeker is of het sedimenttransport in de beschouwde raai wel representatief is voor de sedimentuitwisseling tussen (deel)gebieden.

10 Referenties

Berg, J.H. van den, C.J.L. Jeuken, A.J.F. van der Spek, 1996
Hydraulic processes affecting the morphology and evolution of the Westerschelde estuary. In: Nordstrom, K.F. and Roman, C.T, eds., Estuarine shores: Evolution, Environments and Human Alterations. London, J. Wiley, p157-184.

Bok, C. de, 2002
Zandbalans van het deelsysteem "Delta". Werkdocument RIKZ/OS/2002.114x. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Bollebakker P., C. van der Male, 1993
Invloed stochastische fout op inhoudsberekeningen. Rapport: GWWS-93.831X. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren.

Dalrymple, R.W., B.A. Zaitlin, R. Boyd, 1992
Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications, Journal of Sedimentary Petrology.

Dronkers, J., 1986
Tidal asymmetry and estuarine morphology. Netherlands Journal of Sea Research, 20(2/3); p117-131.

Friedrichs, C.T., Aubrey, D.G., 1988
Non-lineair tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis, estuarine. Continental Shelf Science 27, 521-545.

Hibma, A., 2004
Morphodynamic modelling of estuarine channel-shoal systems. Technische Universiteit Delft, proefschrift.

Holland, A.M.B., H. Smit, 1994
Zoet water in het Schelde-estuarium: veranderingen in de saliniteit. Rapport DGW-93.057. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

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

Jeuken, C., Z.B., Wang, 2000
Tidal asymmetry and sediment transport in the Westerschelde estuary, a desk study, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z2864.

Jeuken, C., G. Ruessink, Z.B. Wang, 2002
Adviezen voor het maken van een gezamelijke zandbalans voor Westerschelde en monding, Bureau- en literatuurstudie. WL | Delft Hydraulics, Rapport Z3213.

Jeuken, M.C.J.L., Z.B. Wang, D. Keiller, I. Towned, G.A. Liek, 2003

Morphological response of estuaries to nodal tide variation. Verslag van de International Conference on Estuaries and Coasts, 9-11 Nov., 2003, Hangzhou, China, pp. 166-174.

Kaaij, T. van der, D.Roelvink, K.Kuijper, 2004a
Morphological modelling of the Western Scheldt. Intermediate report Phase I: Part I: Hydrodynamic model set-up, calibration and verification. Part II: wave model set-up. WL | Delft Hydraulics en Alkyon, Rapport Z3648/A1198.

Kaaij, T. van der, D.Roelvink, K.Kuijper, 2004b
Morphological modelling of the Western Scheldt. Intermediate report Phase II: Calibration of the morphological model. WL | Delft Hydraulics en Alkyon, Rapport Z3648/A1198.

Kreeke, J. van der, K. Robaczewska, 1993
Tide-induced residual transport of coarse sediment; application to the Ems estuary. Netherlands Journal of Sea Research, 31(3), p209-220.

Krijger, G.M., 1993
Het verdronken land van Saeftinge komt weer boven water. Werkdocument GWWS-93.838x, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren.

Li, C., J. O'Donnell, 1997
Tidally driven residual circulation in shallow estuaries with lateral depth variation. Journal of Geophysical Research 102 (C13), p27915-27929.

Liek, G.A, G. Nederbragt, C. van der Male, 2003.
Resultaten zandbalans Westerschelde en monding. Werkdocument RIKZ/OS/2003.163x. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Maldegem, D.C. van, 1993.
De slibbalans van het Schelde-estuarium. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren, Nota GWAO-91.081.

Marijs K., E. Parée, 2004
Nauwkeurigheid vaklodingen Westerschelde en –monding: "de praktijk". Notitienummer ZLMD-04.N.004. Rijkswaterstaat, meetinformatiedienst Zeeland.

Nederbragt G., G. Liek, 2004
Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding. Rapport RIKZ-2004.020. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

NRC, 2005
Krantenbericht 21 januari: Akkoord uitbaggeren van Schelde
Krantenbericht 11 maart: Breda en Den Haag toch bij HSL-net

O'Brien, M.P., 1969
Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts. J. Waterw. Harbors. Div., ASCE, 95(WW1): 43-52.

Rijkswaterstaat, Directie Noordzee, 2004
Noordzee-atlas. Initiatief van Interdepartementaal Directeuren Overleg Noordzee (IDON).

Rijkswaterstaat, Directie Zeeland, 1994
Verdieping Westerschelde, Getijberekeningen Scaldis100, Rapport AX 94.042.

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

Rijkswaterstaat en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2001
Lange Termijnvisie Schelde-estuarium. Directie Zeeland (Nederland) en Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Waterwegen en Zeewezen (België).

Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2003
User's Guide WAQUA, SIMONA-report 92-10, version number 10.30. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2003.

Roelse, P. en A. Arends, 2000
Mogelijkheden voor zandwinning in de Westerschelde, Werkdocument RIKZ/AB/2000.806x., Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Spek, A. van der, 1994
Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Universiteit van Utrecht, proefschrift.

Speer, P.E., 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, 207-224.

Speer, P.E., Aubrey, D.G., Friedrichs, C.T., 1991
Nonlinear hydrodynamics of shallow tidal inlet/bay systems. In: Tidal Hydrodynamics, Wiley, New York.

Stikvoort, E. , C. Berrevoets, M. Kuijper, F. Lefèvre, G-J. Liek, M. Lievaart, D. van Maldegem, P. Meiniger, B. Peters, A. Pouwer, H. Schippers, J. Wijsman, 2003.
Monitoring van de effecten van de verruiming 48'-43'. MOVE-rapport 7: MOVE Hypothesedocument 2003. Onderliggende rapportage bij MOVE-rapport 8 (deel A en B) Evaluatierapport 2003. Rapport RIKZ/2003.009. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Storm, C., P.Bollebakker, J. de Jong, G. Mol, 1993
Nauwkeurigheid zandbalans 1965-1990 en aanbevelingen ter optimalisatie. Rapport RIKZ-94.008. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee en Directie Zeeland.

Tank, F.T.G., 1995
Empirische relaties tussen de plaat- en slikhoogte en getijkarakteristieken in de Westerschelde. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Uit den Boogaard, L.A., 1995
Resultaten zandbalans Westerschelde 1955 – 1993. R. 95-08. Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht.

Van Eck, 1999
De ScheldeAtlas, een beeld van een estuarium. Rijkswaterstaat, Schelde Informatie Centrum.

Veen, J. Van, 1950
Eb- en vloedschaar systemen in de Nederlandse getijdenwateren. Herdruk ter ere van waddensymposium (2001). Oorspronkelijk gepubliceerd in Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap Vol. 67, p303-325.

Velden, E.T.J.M. van der, 2000
Coastal Engineering Volume II, Dictaat CT5309, TU Delft, Faculteit Civiele Techniek

Vriend, de R.J., J.S. Ribberink, 1996
Mathematical modelling of meso-tidal barrier islands coasts, part I and II.

Vriend, H.J. de, J. Dronkers, M.J.F. Stive, A. van Dongeren, J.H Wang, 2002
Coastal inlets and tidal basins. Dictaat CT5303, TU Delft, Faculteit Civiele Techniek.

Vroon, J., K. Storm, J. Coosen, 1997
Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het Project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rapport RIKZ-97.023. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken, H.J. de Vriend, 1999
Tidal asymmetry and residual transport in estuaries, a literature study and application tot the Western Scheldt, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z2749.

Wang, Z.B., M.C.J.L Jeuken, H Gerritsen, H.J. de Vriend, B.A Kornman, 2002
Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary. Journal of Continental Shelf Research 22 (2002) p.2599-2609.

Winterwerp, J.C., M.C.J.L Jeuken, M.A.G. van Helvert, C.Kuijper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen, Z.B.Wang, 2000
Lange Termijnvisie Schelde-estuarium, cluster morfologie, Uitvoeringsfase. WL |Delft Hydraulics, Rapport Z2878.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Rijkswaterstaat

Westerschelde: import of export?

Invloed van bodemligging op sedimenttransport in de Westerschelde

Juni 2005

Werkdocument RIKZ/KW/2005.114W
Bijlagen

Inhoudsopgave

Bijlage A **Niet-lineaire interacties van M_2-getij** **5**

Bijlage B **Bagger-, stort- en zandwinhoeveelheden** **8**
B.1 Jaarlijks gebaggerd sediment (m^3) 8
B.2 Jaarlijks gestort sediment (m3) 9
B.3 Jaarlijks gewonnen zand (m3) 11

Bijlage C **Gemiddelde D_{50} en slibgehalte** **12**
C.1 Gemiddelde korreldiameter D50 in Westerschelde 12
C.2 Percentage slib in Westerschelde 12

Bijlage D **Onnauwkeurigheden en onzekerheden in lodingen** **13**
D.1 Inleiding 13
D.2 Stochastische onnauwkeurigheden 13
D.3 Systematische onnauwkeurigheden 14

Bijlage E **Morfologisch getij** **17**
E.1 Sedimentatie/ erosiepatroon met een spring-doodtij cyclus 17
E.2 Sedimentatie/ erosiepatroon met een 25-uurs getijcyclus 17

Bijlage F **Raaien binnen de grensgebieden tussen macrocellen** **18**

Bijlage G **Debietrandvoorwaarde** **19**

Bijlage H **Analyse van het horizontale getij** **23**
H.1 Locaties waar de analyses zijn uitgevoerd 23
H.2 Analyse van reeksen 23
H.3 Conclusie 26

Bijlage I **Eb- en vloedtransporten** **28**
I.1 Eb- en vloedtransport met u3 28
I.2 Eb- en vloedtransport met u5 29

Bijlage J **Lokale, residuele transporten u3, u4, u5 voor 1972 en 2002** . **30**
J.1 Met u3 30
J.2 Met u4 31
J.3 Met u5 32

Bijlage K **Gemiddelde en standaarddeviatie binnen grensgebieden** **33**
K.1 Grensgebied tussen monding en cel 1 33
K.2 Grensgebied tussen cel 1 en 3 34
K.3 Grensgebied tussen cel 3 en 4 35
K.4 Grensgebied tussen cel 4 en 5 36
K.5 Grensgebied tussen cel 5 en 6 37
K.6 Grensgebied tussen cel 7 en 8 38
K.7 Ontwikkeling zandvolume per cel in 1972 en 2002 op basis van de gemiddelden 38

Bijlage L Invloed drempelsnelheid in de transportformulering 39
L.1 Inleiding 39
L.2 Modelresultaten voor 1972 en 2002 met drempelsnelheid. 40
L.3 Verschil 2002-1972 met drempelsnelheid 43
L.4 Conclusie 44

Bijlage M Netto sedimenttransporten met bodem 1968, 1972 en 2002 45

Bijlage A Niet-lineaire interacties van M_2-getij

De 1-dimensionale getijdebeweging in een prismatische rechte geul met een variabele breedte wordt weergegeven in Vergelijking A.1 en Vergelijking A.2.

Vergelijking A.1 Bewegingsvergelijking

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{(a)} + \underbrace{u\frac{\partial u}{\partial x}}_{(b)} + \underbrace{g\frac{\partial \zeta}{\partial x}}_{(c)} + \underbrace{c_f \frac{u|u|}{h+\zeta}}_{(d)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(v_t \frac{\partial u}{\partial x}\right)}_{(e)} = 0$$

Vergelijking A.2 Massa-balans

$$\underbrace{b\frac{\partial \zeta}{\partial t}}_{(f)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(b_c u(h+\zeta))}_{(g)} = 0$$

Waarin;

x= locatie op de geulas [m]
t = tijd [s]
u(x,t) = breedte en diepte gemiddelde snelheid [m/s]
ζ(x,t) = verticale uitwijking waterstand t.o.v. referentiepeil [m]
g = zwaartekracht versnelling [m/s^2]
h = locale waterdiepte t.o.v. referentiepeil [m]
c_f = ruwheidsfactor bodem [-]
v_t = eddy-viscositeit [-]
b = totale breedte getijdebekken (inclusief intergetijdengebieden) [m]
b_c =geulbreedte [m]

De verschillende termen kunnen als volgt worden benoemd:
(a) = locale traagheid
(b) = advectieve traagheid
(c) = aandrijving of verval
(d) = bodemwrijving
(e) = horizontale diffusie
(f) = berging
(g) = longitudinale gradiënt in het debiet

Indien de geulbreedte constant wordt genomen (b_c = constant) zijn de volgende termen lineair: de lokale traagheidsterm (a), de aandrijvende term (c) en de berging (f). In turbulente stromingen is de eddy-viscositeit in de horizontale diffusie term (e) in het algemeen een functie van de stroomsnelheid, waardoor het een niet-lineariteit induceert. Hier wordt aangenomen dat de longitudinale snelheidsgradiënten zo klein zijn dat de horizontale diffusie kan worden verwaarloosd (dus (e)=0). De term van de debietgradiënt (g) kan worden verdeeld in een niet-lineair en een lineair deel, volgens Vergelijking A.3.

Vergelijking A.3 Term van de debietgradiënt, onderverdeeld in een lineair deel en een niet-lineair deel

$$\frac{\partial}{\partial x}(b_c u(h+\zeta)) = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(b_c uh)}_{(g1)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(b_c u\zeta)}_{(g2)}$$

De niet-lineaire effecten worden dus veroorzaakt door de advectieve traagheid (b), de wrijving (d) en de gradiënt in het debiet (g2). Indien de stroomvoerende breedte varieert met de waterstand (dus b = b(ζ)), dan veroorzaakt ook de bergingsterm een niet-lineair effect.

Kortom, als b_c = constant, dan is:
(a) Lineair
(b) Niet-lineair
(c) Lineair
(d) Niet-lineair
(e) Wordt verwaarloost
(f) Lineair (b = constant) of Niet-lineair (b = b(ζ))
(g1) Lineair
(g2) Niet-lineair

We beschouwen een lopende getijgolf component, opgewekt door bijvoorbeeld het maansgetij als Vergelijking A.4.

$$u(x,t) = U_0 \cos(\omega t - kx)$$

Vergelijking A.4 Harmonische getijgolf met één basiscomponent

Waarin;

U_o= snelheidsamplitude [m]
ω = hoekfrequentie [s^{-1}]
k = golfgetal [m^{-1}] = $2\pi/\lambda$
λ = golflengte [m]

Wanneer Vergelijking A.4 wordt gebruikt als forcering in Vergelijking A.1 en Vergelijking A.2, dan zullen harmonische boventonen worden opgewekt en een netto gemiddeld effect, ook wanneer het gemiddelde debiet 0 is. Als voorbeeld wordt gebruikt de substitutie van Vergelijking A.4 in de advectieve traagheidsterm (b):

$$u\frac{\partial u}{\partial x} = U_0 \cos(\omega t - kx) * (\frac{\partial U_0 \cos(\omega t - kx)}{\partial x})$$
$$= U_0 \cos^2(\omega t - kx) + kU_0^2 \cos(\omega t - kx)\sin(\omega t - kx)$$
$$= \frac{1}{2}U_0 + \frac{1}{2}U_0 \cos 2(\omega t - kx) + \frac{1}{2}kU_0^2 \sin 2(\omega t - kx)$$

De substitutie laat zien, dat de interactie van M_2 met zichzelf (via de advectieve traagheidsterm) een residuele stromingsterm (M_0) en een bovenharmonische component met 2 keer de basisfrequentie ω geeft (M_4) . De voortplantingssnelheid van de bovenharmonische blijft wel gelijk (ω/k)

Hetzelfde kan gedaan worden met verschillende componenten (met verschillende frequenties ω_1 en ω_2). Waarbij de getijgolf de vorm heeft als in Vergelijking A.5.

$$u(x,t) = U_0 \cos(\omega_1 t - k_1 x - \varphi_1) + V_0 \cos(\omega_2 t - k_2 x - \varphi_2)$$

Vergelijking A.5 Harmonische getijgolf met twee basiscomponenten

Voor de theoretische uitwerking zie Wang e.a (1999). De interactie van verschillende componenten genereert (via de advectieve traagheidsterm

(b)) een component met een frequentie die gelijk is aan de som van de basisfrequenties ($\omega_1+\omega_2$) en een component met een frequentie die gelijk is aan het verschil tussen de basisfrequenties ($\omega_1-\omega_2$). De voortplantingssnelheid verschilt van die van de basisvoortplantingssnelheid.

De longitudinale gradiënt in het debiet (g) genereert ook componenten met frequentie $\omega_1+\omega_2$ en $\omega_1-\omega_2$. De wrijvingsterm (d) genereert harmonische componenten met een frequentie die oneven aantal keer groter is dan de basisfrequentie (bijv. 3 of 5 keer M_2), zoals de M_6. In dieper water kan deze term ook een M_0 en M_4 genereren.

In Tabel A.1 zijn de componenten gegeven die door de afzonderlijke termen worden opgewekt als gevolg van niet-lineaire interacties van het M_2-getij met zichzelf. In Wang e.a. (1999) zijn de componenten gegeven voor de interactie tussen het M_2-getij met andere basiscomponenten (bijv. S_2).

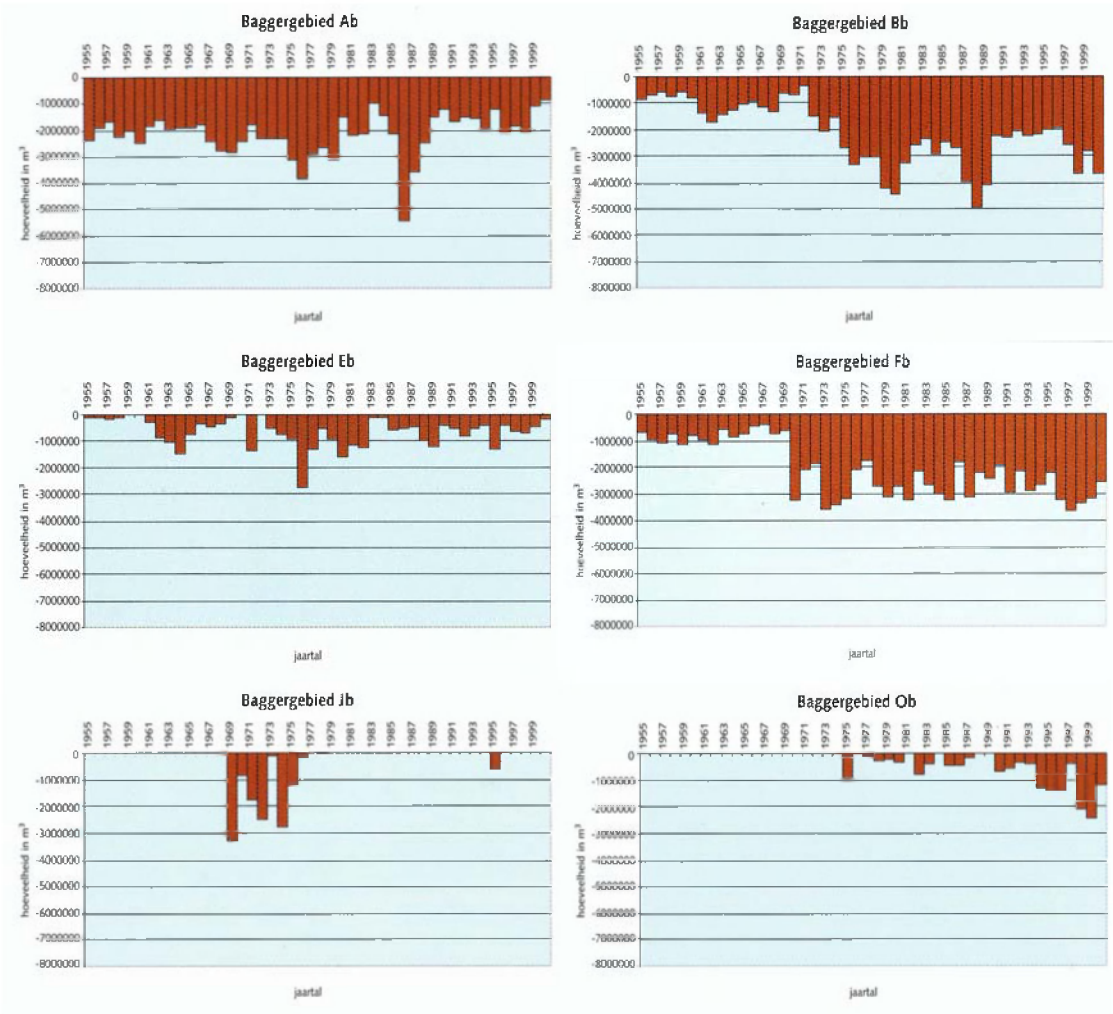
Tabel A.1 Componenten die worden gegenereerd door niet-lineaire interacties van het M_2-getij met zichzelf

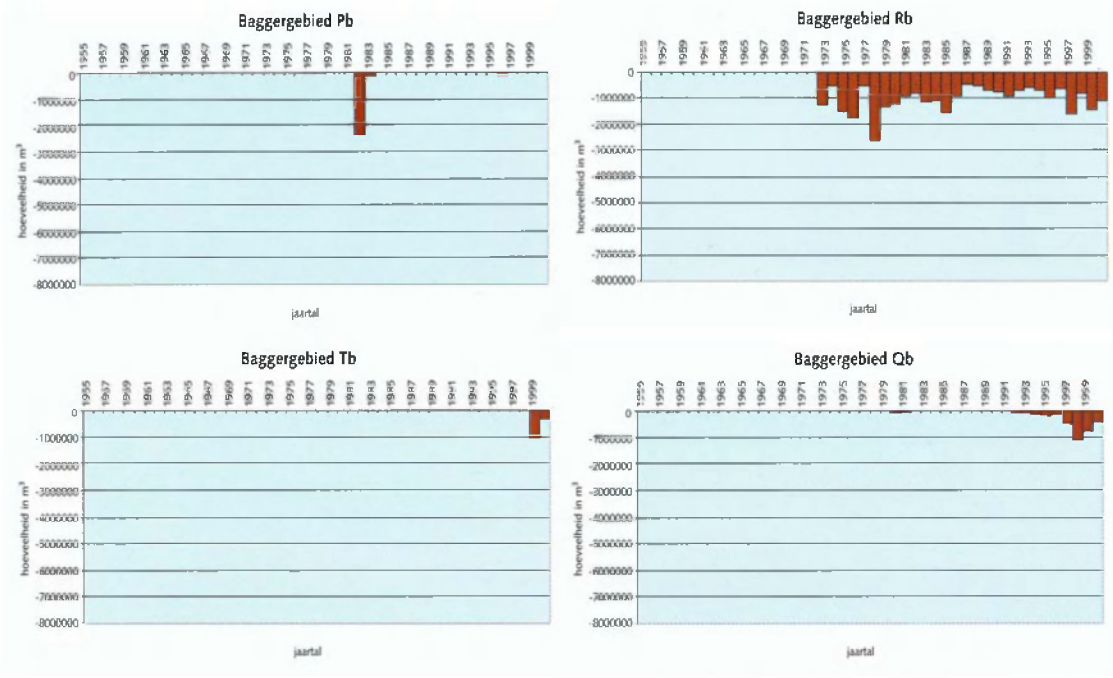
Verantwoordelijke term	Componenten
(b) Advectieve traagheid	M_0, M_4
(d) Wrijving	M_0, M_2, M_4, M_6
(g2) Debietgradiënt	M_0, M_4

Bijlage B Bagger-, stort- en zandwinhoeveelheden

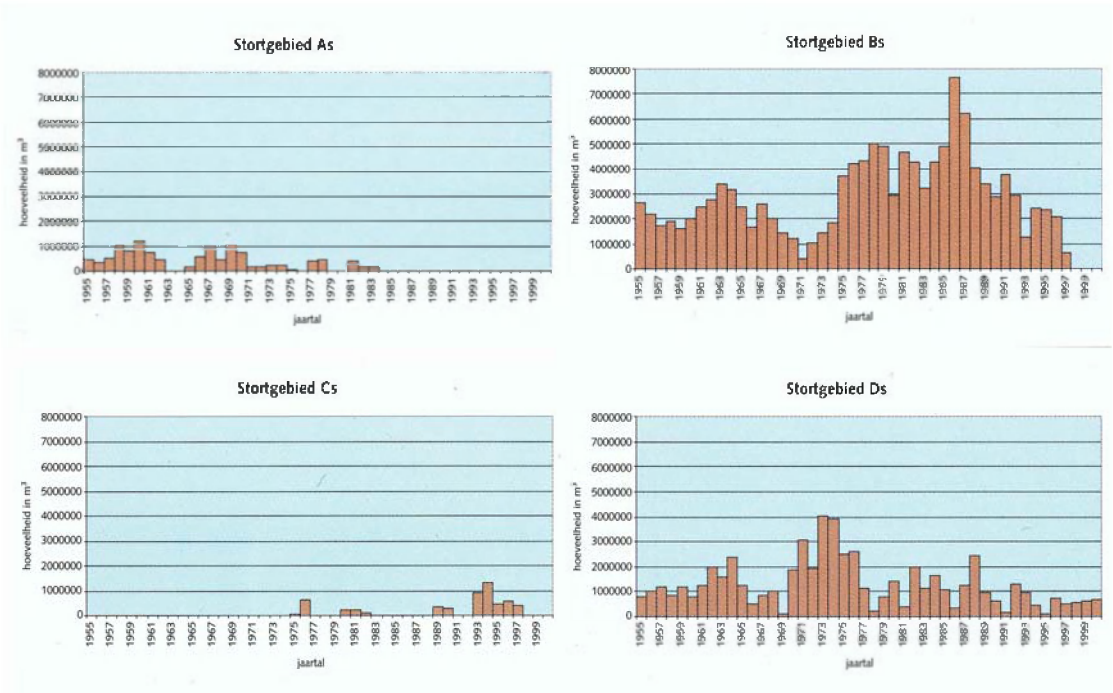
In B.1 t/m B.3 zijn de jaarlijkse hoeveelheden gebaggerd, gestort en gewonnen sediment in de Westerschelde weergegeven. De deelgebieden zijn te vinden in Figuur 3.3 in paragraaf 3.4.2 van het hoofdrapport. De hoofdletter komt overeen met de locatie in Figuur 3.3, de b staat voor baggeren, s voor storten en z voor zandwinning.

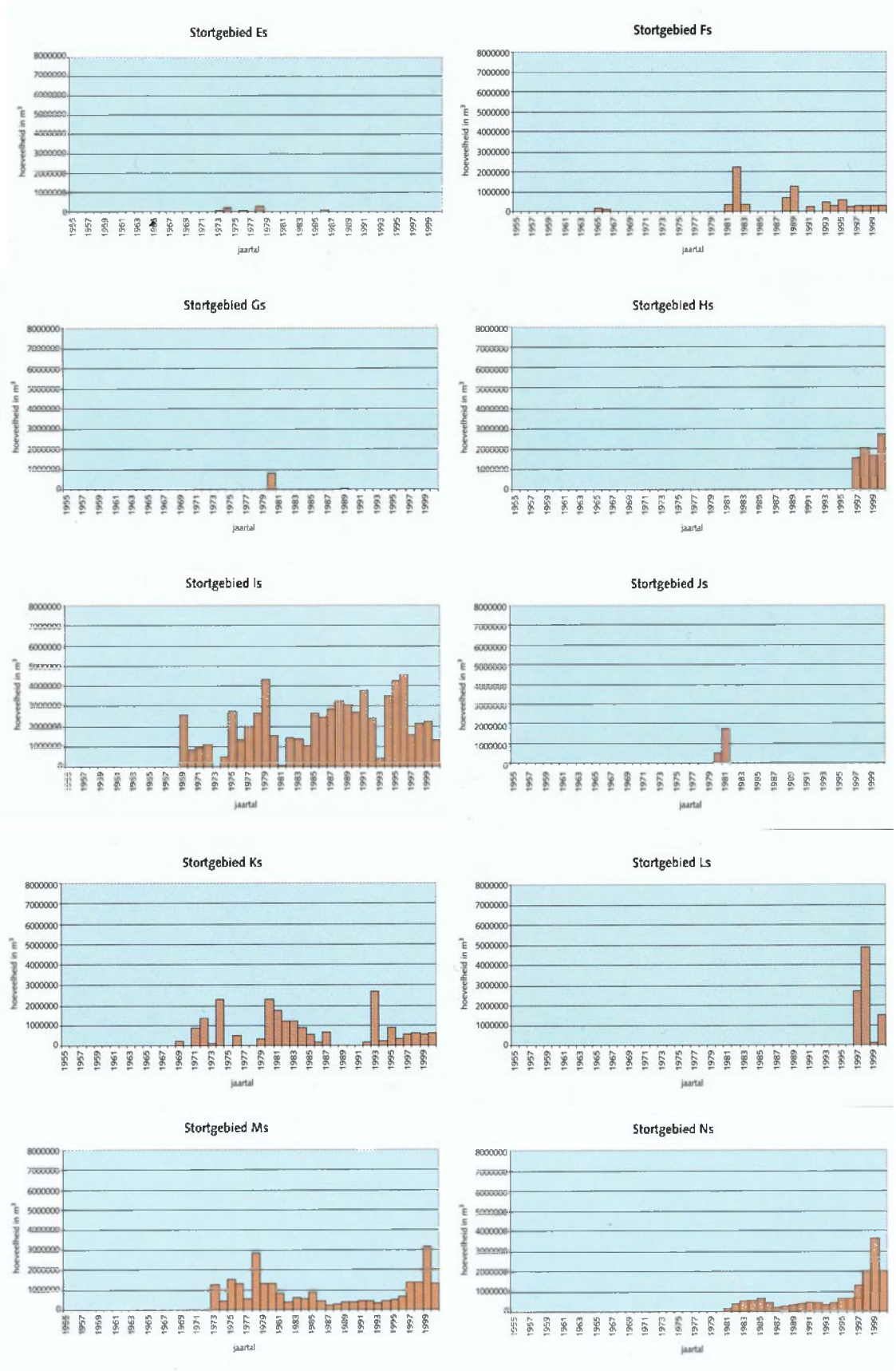
B.1 Jaarlijks gebaggerd sediment (m^3)



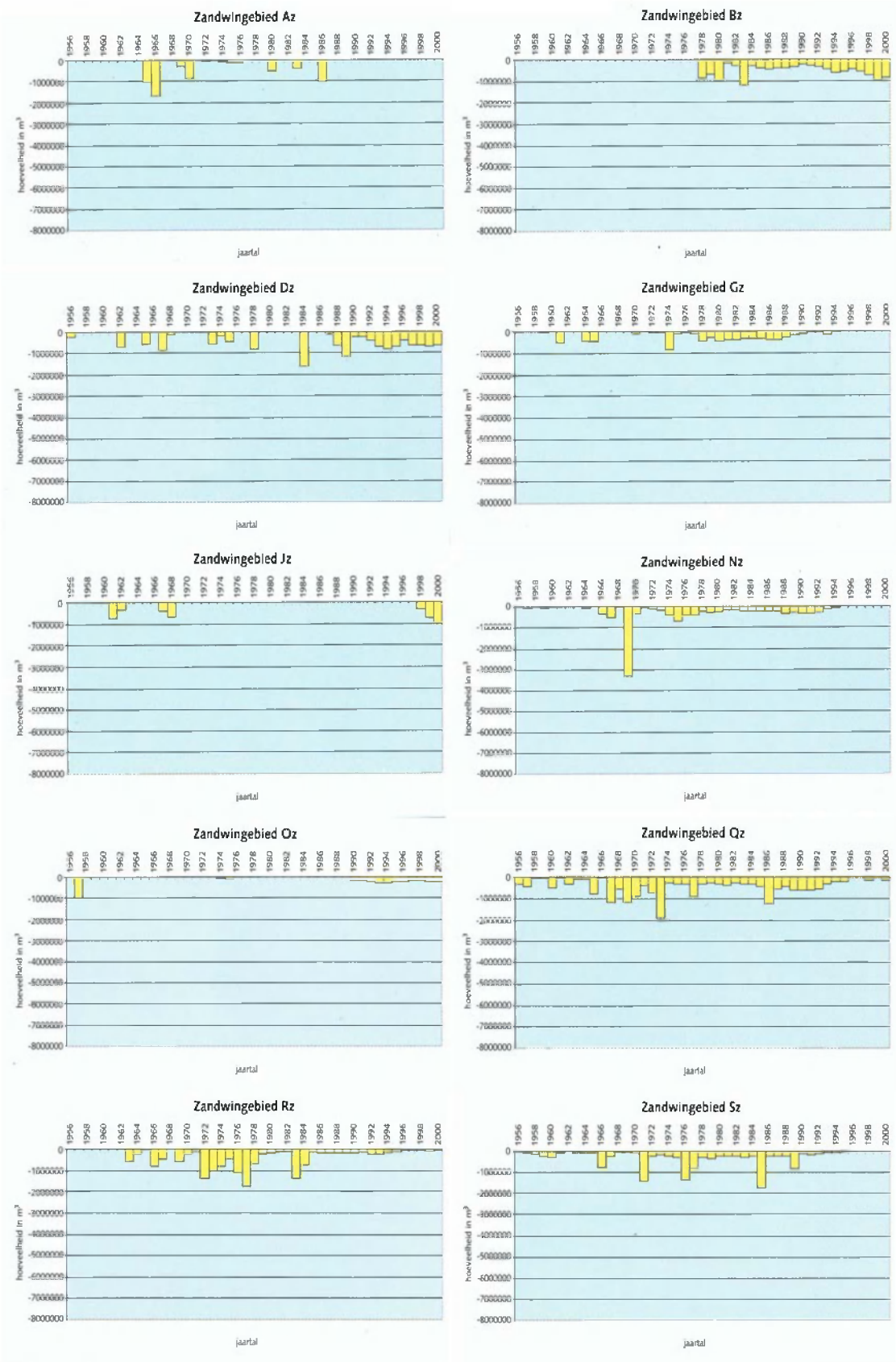


B.2 Jaarlijks gestort sediment (m^3)



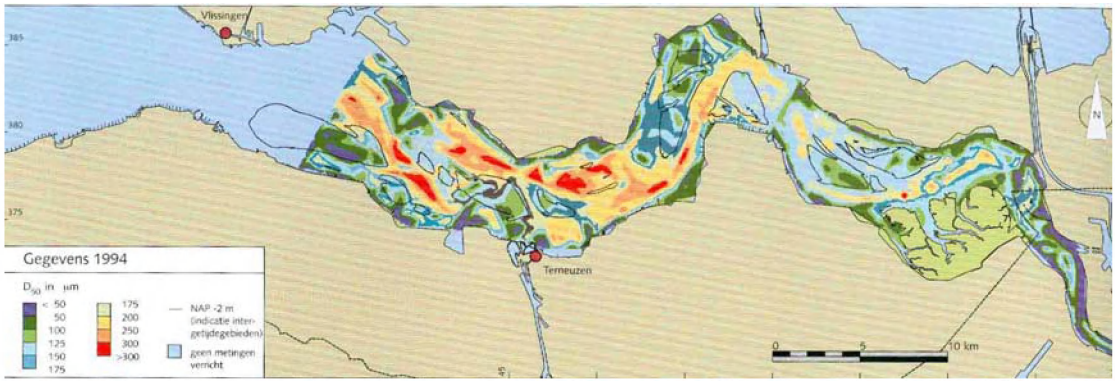

Stortgebied Es
Stortgebied Fs
Stortgebied Gs
Stortgebied Hs
Stortgebied Is
Stortgebied Js
Stortgebied Ks
Stortgebied Ls
Stortgebied Ms
Stortgebied Ns
hoeveelheid in m³
jaartal

B.3 Jaarlijks gewonnen zand (m^3)

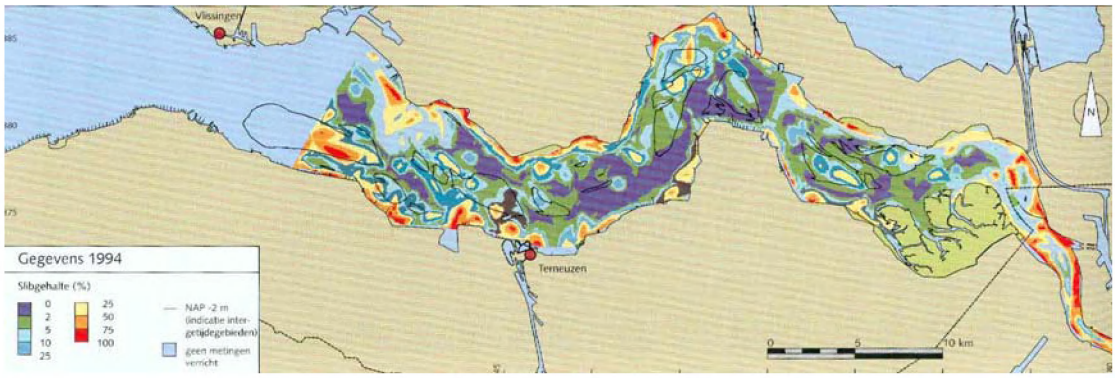


Bijlage C Gemiddelde D_{50} en slibgehalte

C.1 Gemiddelde korreldiameter D_{50} in Westerschelde



C.2 Percentage slib in Westerschelde

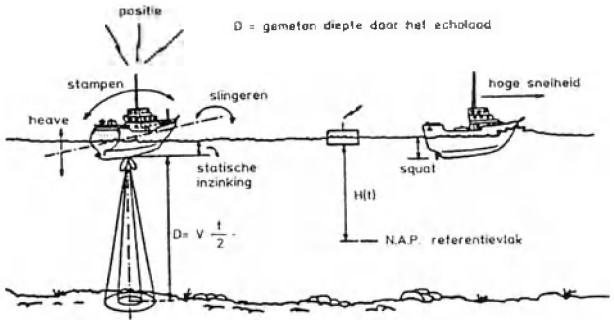


Bijlage D Onnauwkeurigheden en onzekerheden in lodingen

D.1 Inleiding

De zandbalans wordt opgesteld en berekend door het gebruik van lodingsdata, bagger- en stortgegevens en met behulp van een aantal aannames. In welke mate de V_{tot}, V_i en V_{nat} de werkelijkheid benaderen hangt af van de nauwkeurigheid van de data en aannames. In eerdere studies (Storm e.a, 1994; Marijs en Parée, 2004) zijn een groot deel van de onzekerheden en onnauwkeurigheden onderzocht die in de lodingsdata voor kunnen komen. De studie heeft zich voornamelijk gericht op mega-schaal en minder op het niveau van de macrocellen. In deze bijlage wordt een inventarisatie gegeven van de onnauwkeurigheden in lodingen.

De bodemmetingen in de natte delen van de Westerschelde worden uitgevoerd vanaf een schip. De gemeten diepte wordt opgeslagen samen met de bijbehorende positie in het estuarium en omgerekend naar het referentiepeil NAP door correctie voor de actuele waterstand. Het schip vaart in rechte lijnen door het estuarium (raaien) zodat gebiedsdekkende diepte-informatie wordt vergaard. Gedurende dit proces, vanaf het daadwerkelijk peilen van de bodem tot aan de totstandkoming van de bodemschematisatie, kunnen onnauwkeurigheden optreden. Storm e.a. (1993) en Marijs en Parée (2004) onderscheiden twee soorten lodingsfouten: stochastische en systematische. De invloed van deze fouten op de uitkomst van het berekende zandvolume hangt mede af van de beschouwde tijd- en ruimteschaal. In de loop der tijd zijn de lodingen betrouwbaarder geworden doordat de peil- en procestechnieken zijn verbeterd.



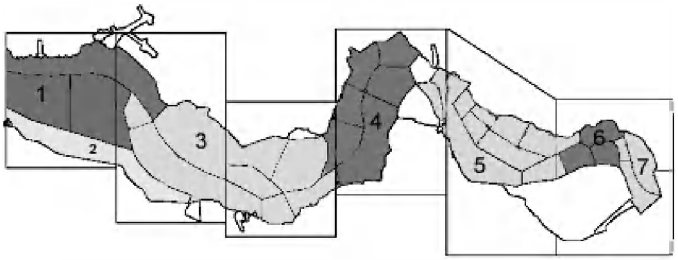
Figuur D.1 Stochastische en systematische fouten in een loding

D.2 Stochastische onnauwkeurigheden

Stochastische fouten kunnen worden geformuleerd als random fouten en worden veroorzaakt door verschillende factoren (Figuur D.1). Indien de positie van het schip verkeerd wordt bepaald op een hellende bodem levert dit een foute meting op. De gemeten diepte wordt geregistreerd bij de verkeerde coördinaat en er ontstaat een fout met waarde: afstand*helling. De meting van het dieptepeil wordt ook beïnvloed door

scheepsbewegingen in de verticaal door bijvoorbeeld deining en golven. Daarnaast kan een fout worden veroorzaakt door verkeerde getij-informatie, doordat de dieptemeting moet worden gecorrigeerd met de actuele waterstand. Het meetsysteem zelf of een incorrecte calibratie van de meetapparatuur veroorzaakt ook stochastische fouten. Een kenmerk van een stochastische fout is dat het een lokale onnauwkeurigheid betreft, dat wil zeggen onafhankelijk in de ruimte en tijd.

De stochastische fout kan lokaal variëren tussen de 0,56 m (in 1955) tot 0,1 m (in 2004) volgens Marijs en Parée (2004). Echter, bij beschouwing van een groot balansgebied middelt de stochastische fout uit door het willekeurige karakter. Uit de studie van Bollebakker en Van der Male (1993) blijkt dat de stochastische fout verwaarloosd kan worden bij inhoudsberekeningen op een ruimtelijke schaal van vaklodingen. Vaklodingen hebben vergelijkbare afmetingen als de meeste macrocellen (Figuur D.2). Dit betekent dat op mega- en macro-schaal de stochastische fout wegvalt. Wat betreft macrocel 6 en 7 is niet zeker of dit ook geldt, omdat het oppervlak van macrocellen 6 en 7 kleiner is dan de vaklodingen.



Figuur D.2 Macrocellen (ingekleurde vakken) en vaklodingen (rechthoekige vakken

D.3 Systematische onnauwkeurigheden

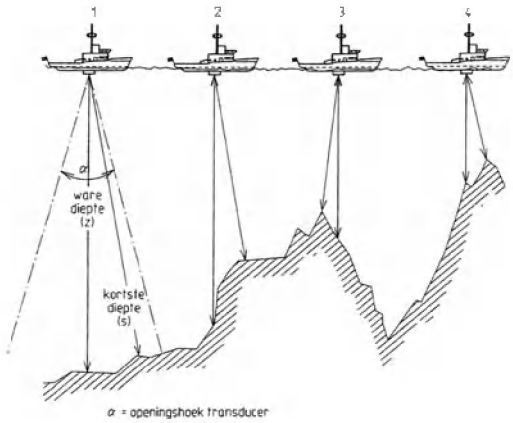
Een systematische onnauwkeurigheid is een constante fout in een bepaald gebied. Een aantal factoren kunnen een systematische fout veroorzaken: squat, bodemhellingen, menselijke fouten of technische storingen. (Storm e.a., 1993; Marijs en Parée, 2004)

Squat is de inzinking van de meetsensor. Hierdoor wordt de bodemdiepte structureel te "ondiep" gepeild. De squat varieert met de vaarsnelheid en waterdiepte. De structurele fout in de volumeberekening als gevolg van squat is door de jaren heen nagenoeg gelijk gebleven. Door de sedimentvolumes cumulatief te bekijken valt deze systematische fout weg. Sinds 2002 worden de bodemmetingen automatisch voor squat gecorrigeerd door het nieuwe meetsysteem LKR (Long Range Kinematic). Met dit systeem is op ieder moment de afstand van de meetsensor ten opzichte van NAP bekend. In een aantal gebieden samen is door het nieuwe meetsysteem een volumeverschil waar te nemen in de orde van 0,4 Mm^3. (Marijs en Parée, 2004) Dit is gebaseerd op analyse van verschilkaarten van opvolgende jaren. Een aantal ondiepe gebieden zijn in de tijd stabiel, maar vertonen in 2002 een systematische erosie. Kortom, tot aan 2002 valt deze fout nagenoeg weg in het V_{tot} verloop op megaschaal, maar vanaf 2002 moet rekening worden gehouden met een correctie. Dit laatste geldt ook voor de zandbalans op macroschaal, maar het is onduidelijk of deze systematische fout ook wegvalt in de periode vóór 2002.

Bodemhellingen veroorzaken een te lage inschatting van de diepte, doordat het meest ondiepe punt in de lodingsbeam wordt geregistreerd. (Figuur D.3) Het middelpunt van de beam correspondeert met de lodingcoördinaten, maar op een hellend vlak is de gemeten diepte kleiner dan de diepte in het middelpunt.

Figuur D.3 Lodingsfout op helling als gevolg van beam

Loding wordt "te ondiep" gemeten, doordat de kortste afstand binnen de beam wordt geregistreerd.

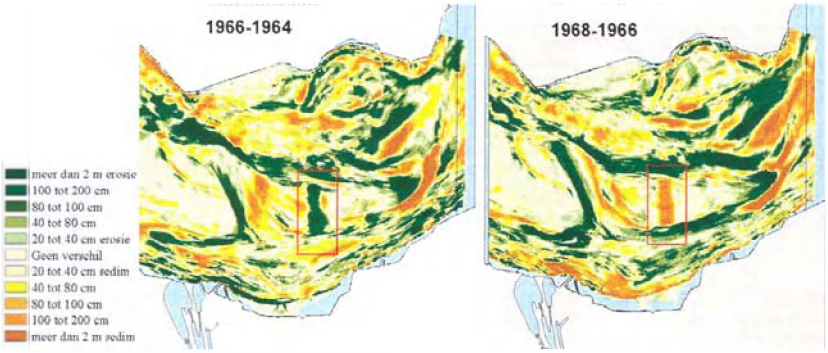


De openingshoek is veranderd in de loop der jaren en deze fout is daarom niet in ieder jaar gelijk. Voor 1993 is gemeten met een openingshoek van 8 tot 12 graden en is de fout in de orde van 15 cm op hellingen. (Storm e.a, 1993) Sinds 1993 is gemeten met een openingshoek van 2,5 graden en is de fout in de orde van 4 cm. (Marijs en Parée, 2004) Voor het verloop van de cumulatieve V_{tot} zal vanaf 1993 een correctie moeten worden uitgevoerd van ongeveer 11 cm (het verschil tussen 15 en 4 cm). Indien voor het percentage helling in de Westerschelde 7% wordt aangenomen (Marijs en Pareé, 2004) moet de V_{tot} vanaf 1993 systematisch voor de gehele Westerschelde met 3 Mm^3 worden gecorrigeerd. Het percentage hellingen per vakloding of macrocel is niet bepaald in eerder studies. Ervan uitgaande dat het percentage gelijk blijft en het oppervlak van de kleinste en grootste cel respectievelijk 12,5 km^2 en 41 km^2 is, zal het sedimentvolume van de macrocellen vanaf 1993 in de orde van +0,1 tot +0,3 kunnen afwijken.

Het voordeel van de bovengenoemde systematische fouten is dat ze te kwantificeren zijn. Maar er kunnen ook systematische onnauwkeurigheden worden veroorzaakt door fouten van de mens en door technische mankementen. Deze kunnen ruimtelijk op verschillende schalen voorkomen en zijn achteraf vaak moeilijk te achterhalen. Marijs en Parée (2004) hebben getracht dit te doen, door middel van bodemverschilkaarten van opvolgende jaren. Zoals in Figuur D.4. De verschilkaart tussen de bodems 1964 en 1966 laten een erosie zien op de Middelplaat tussen 1964 en 1966, maar ditzelfde gebied sedimenteert weer tussen 1966 en 1968. Dit zou een meetfout kunnen indiceren in 1966 en een volumefout kunnen opleveren van ongeveer 0,8 Mm^3.

Figuur D.4 Mogelijk systematische fout in loding van 1966, gevisualiseerd door verschilkaarten 1966-1964 en 1968-1966

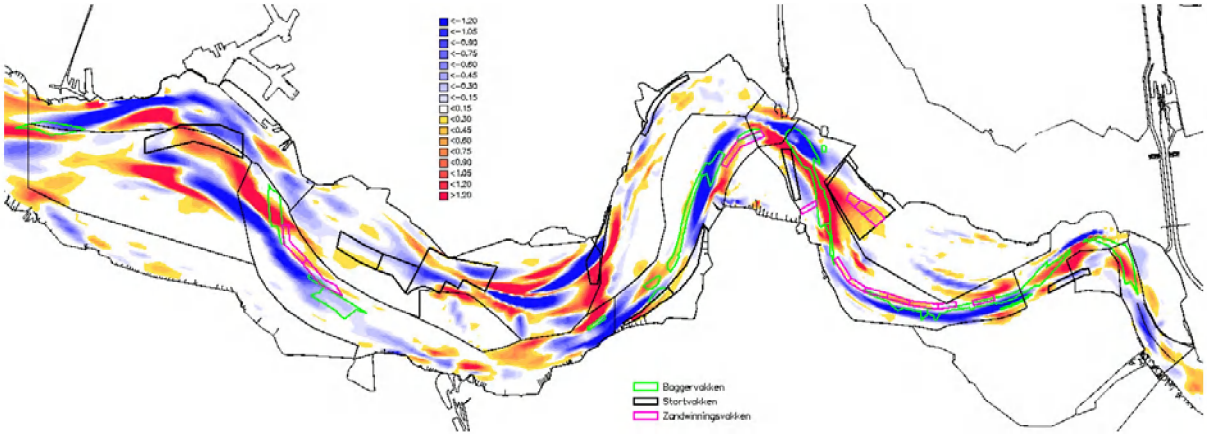
Een "te diepe" meting in 1966 van ongeveer 0,8 Mm^3 volgens Marijs en Parée, 2004.



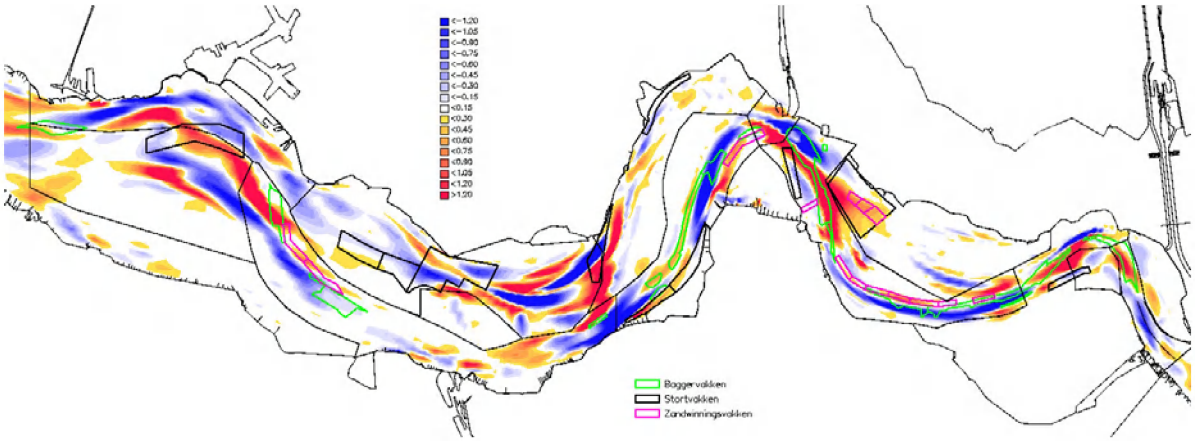
Op deze manier is een inventarisatie gemaakt van mogelijke meetfouten per vakloding. Er zijn volumeafwijkingen waargenomen tussen 0,1 Mm^3 en 4 Mm^3 in een jaar op zowel mega- als macroschaal met een uitschieter in 1970 van 10Mm^3 in het lodingsvak bij Terneuzen.

Bijlage E Morfologisch getij

E.1 Sedimentatie/ erosiepatroon met een spring-doodtij cyclus



E.2 Sedimentatie/ erosiepatroon met een 25-uurs getijcyclus



Bijlage F Raaien binnen de grensgebieden tussen macrocellen

Grens	Raainummer
Monding – Cel 1	mo1 (2)
	mo1 (1)
	VL-BR
	100
Cel 1 - 3	119
	grens 1–3
	300
	301
	302
	303
Cel 3 – 4	grens 3-4
	400
	401
	402
	403

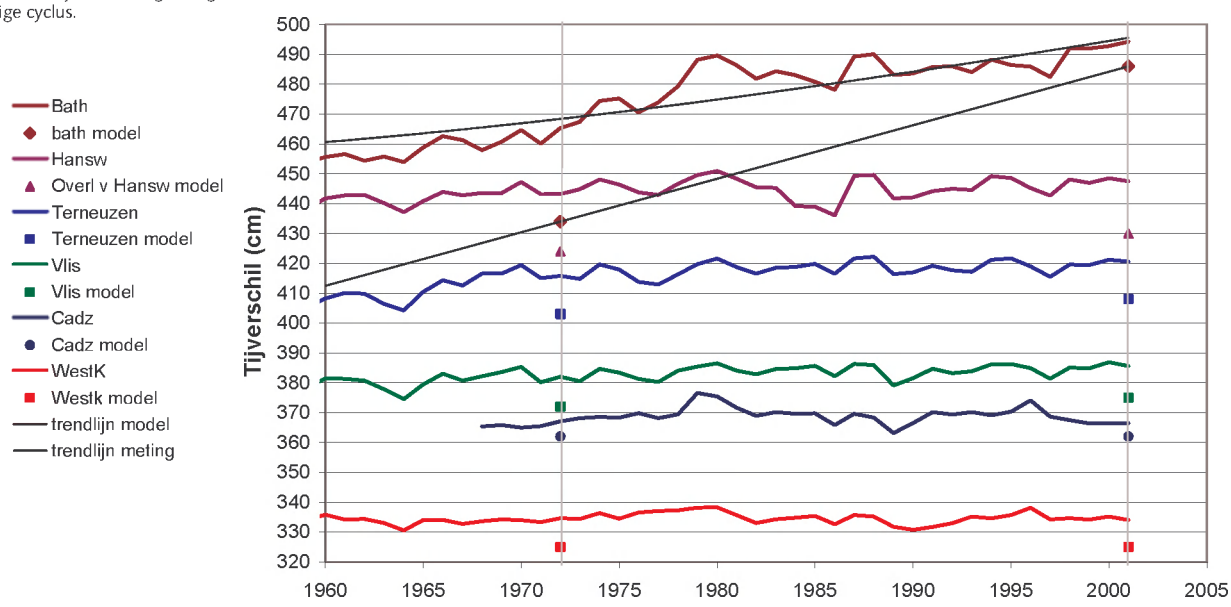
Grens	Raainummer
Cel 4 – 5	422
	423
	424
	grens 4-5
	500
	501
	502
Cel 5 – 6	536
	grens 5-6
	600
	601
	602
	603
	604
Cel 6 – 7	-
Cel 7 – België	806
	807
	808

Bijlage G Debietrandvoorwaarde

Voor een aantal stations is het gemeten tijverschil vergeleken met het gesimuleerde tijverschil (Figuur G.1). De gemeten tijverschillen zijn hierbij gecorrigeerd voor de 18,6 jarige cyclus. Bij Bath is het tijverschil in de meting gestegen met ongeveer 6% tussen 1972 en 2002. In het model is een toename van ongeveer 12% waar te nemen.

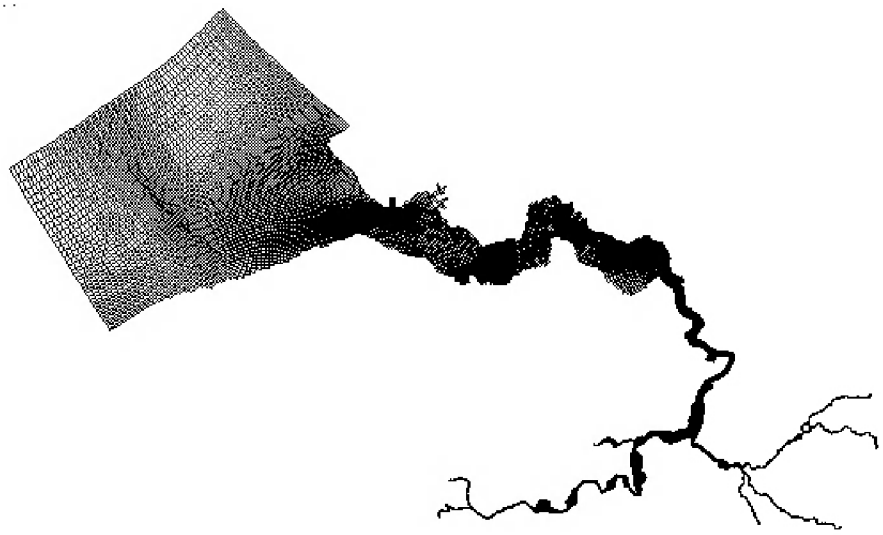
Figuur G.1 Gemeten en gemodelleerde tijverschillen in de Westerschelde

Gemeten tijverschillen gecorrigeerd voor 18,6 jarige cyclus.



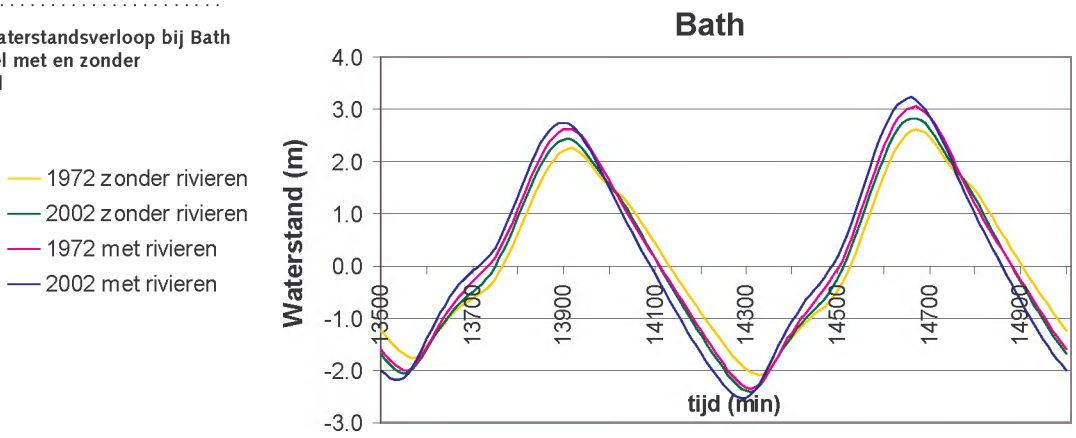
In het model wordt de rivierrandvoorwaarde bij Schelle op gelegd. Deze is gelijk voor 1972 en 2002. Waarschijnlijk kan het debiet bij vloed niet genoeg doorstromen, zodat een deel van het watervolume terugkaatst. Een toename van de getijslag is het gevolg. De randvoorwaarde bij Schelle is dus wel veranderd. Een nieuw model is gemaakt om dit te onderzoeken. Het kustzuidmodel is daarbij uitgebreid met het Belgische NEVLA-model (Figuur G.2). De getijrandvoorwaarden zijn gelijk aan die van het Kustzuid-model. De waterbewegingssimulaties zijn uitgevoerd met een bodemligging uit 1972 en 2002. Overige invoer en randvoorwaarden zijn gelijk gehouden. Hier geldt dus ook dat de bodemligging de enige variabele is.

Figuur G.2 Modelschematisatie uitgebreider model



Het waterstandsverloop bij Bath met het uitgebreidere model is vergeleken met het waterstandsverloop bij Bath van het oude Kustzuid model (Figuur G.3).

Figuur G.3 Waterstandsverloop bij Bath volgens model met en zonder rivierengebied



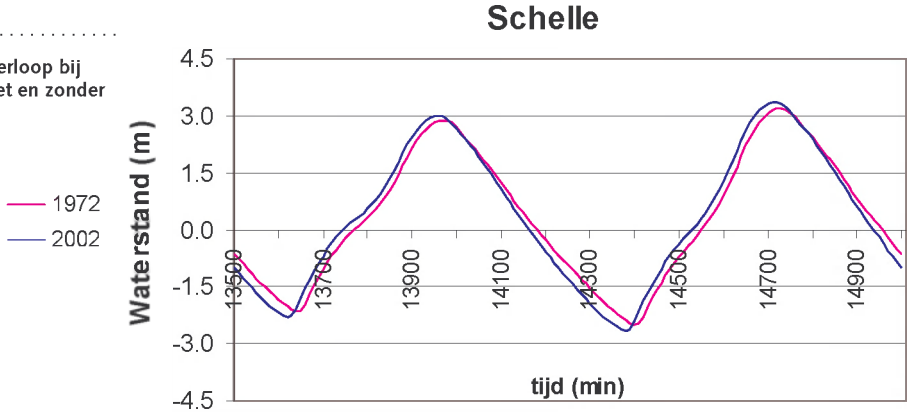
De tijverschillen zijn ook met nieuwe model berekend (Tabel G.1). Er is te zien dat de toename van de getijslag bij Bath met het uitgebreidere model dichter bij de metingen komt.

Tabel G.1 Berekende tijverschillen bij Bath volgens model met en zonder rivierengebied

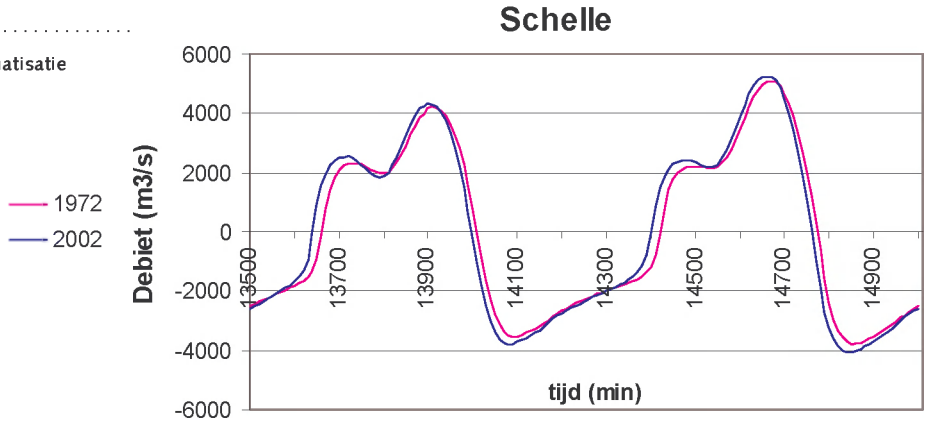
	Zonder rivieren (Kustzuid)		Met rivieren (Kustzuid en NEVLA)	
	1972	2002	1972	2002
Tijverschil	5,00 m	5,34 m	4,35 m	4,89 m
% stijging	6,7%		11,9%	

Nu is het interessant te kijken naar het waterstandsverloop en het debietverloop op de rand bij Schelle (Figuur G.4 en Figuur G.5). Bij het debiet is een positieve waarde vloed en een negatieve waarde eb.

Figuur G.4 Waterstandsverloop bij Schelle volgens model met en zonder rivierengebied



Figuur G.5 Modelschematisatie uitgebreider model



Aan de hand van het waterstandsverloop kan de toename van het tijverschil worden bepaald (Tabel G.2), deze bedraagt 5,7%.

Tabel G.2 Berekende tijverschillen bij Schelle volgens model met rivierengebied

	1972	2002
Tijverschil	5,36 m	5,67 m
% stijging	5,7%	

Het totale eb- en vloedvolume is af te leiden uit het debietsverloop (Tabel G.3). Het getijprisma is in totaal met 4,6% gestegen.

Tabel G.3 Berekende volumina bij Schelle volgens model met rivierengebied

	1972	2002
Ebvolume (m^3/getij)	$9,86*10^4$	$10,31*10^4$
Vloedvolume (m^3/getij)	$9,70*10^4$	$10,15*10^4$
Getijprisma (m^3)	$19,55*10^4$	$20,46*10^4$
Stijging getijprisma	4,6%	

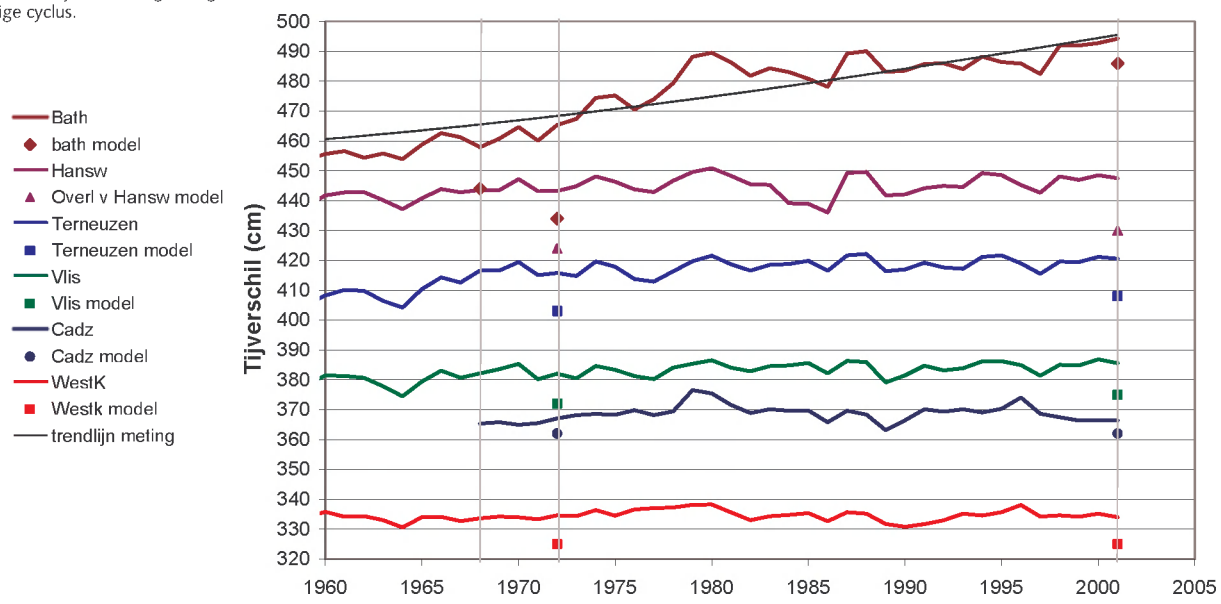
De debietrandvoorwaarde bij Schelle in het Kustzuid-model moet dus eigenlijk worden gecorrigeerd, zodat het getijprisma in 2002 bij Schelle met 4,6% toeneemt.

Later in het onderzoek is ook een simulatie uitgevoerd met een bodem uit 1968 met het Kustzuid model (dus zonder het rivieregebied). De berekende tijverschillen bij Bath met een bodem uit 1968, 1972 en 2002 is samen met de gemeten waarden gegeven in Figuur G.6. Het valt op dat de toename

van de getijslag tussen 1968 en 2002 sluit wel aansluit op de gemeten waarden.

Figuur G.6 Gemeten en gemodelleerde tijverschillen in de Westerschelde

Gemeten tijverschillen gecorrigeerd voor 18,6 jarige cyclus.



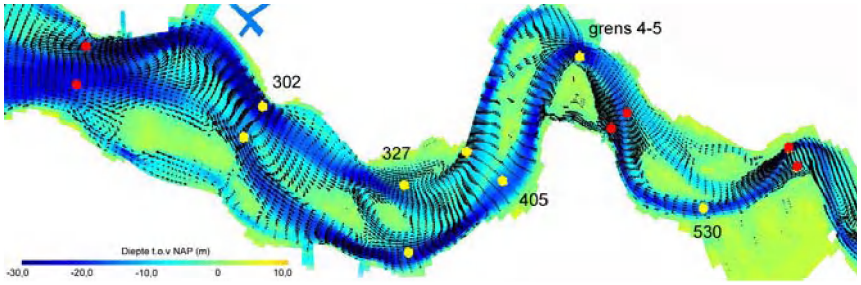
Bijlage H Analyse van het horizontale getij

H.1 Locaties waar de analyses zijn uitgevoerd

In deze bijlage worden de horizontale getijreeksen van een aantal punten geanalyseerd, aanvullend op die uit het hoofdrapport (gele punten in Figuur H.1De tijdreeksen zijn harmonische geanalyseerd. Met de amplitudes en fasen van de M_2-, M_4- en M_6-componenten zijn de bijdragen van de verschillende interacties voor het sedimenttransport op de lange termijn berekend. Voor de precieze methode en berekening wordt verwezen naar het hoofdrapport.

Figuur H.1 Locaties waar de snelheidsvectoren zijn geanalyseerd

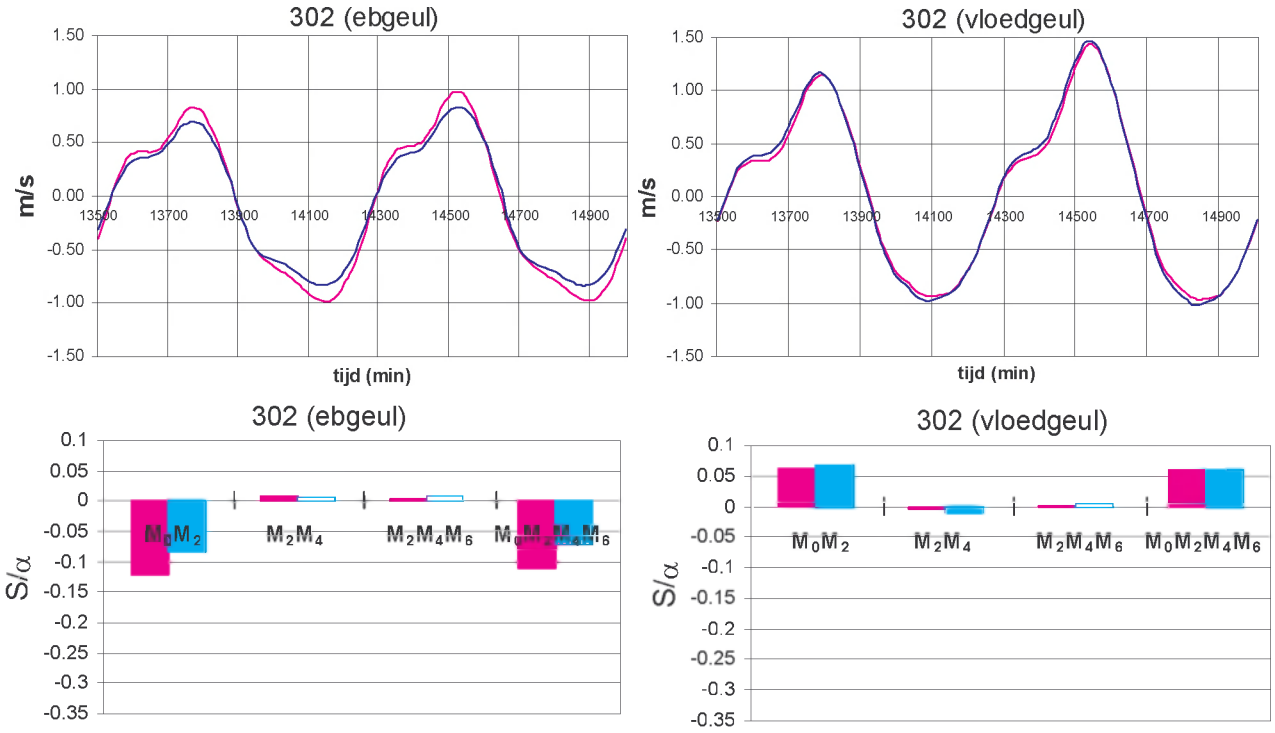
Locaties met rood zijn behandeld in het hoofdrapport, het horizontale getij op de gele locaties wordt hier geanalyseerd.



H.2 Analyse van reeksen

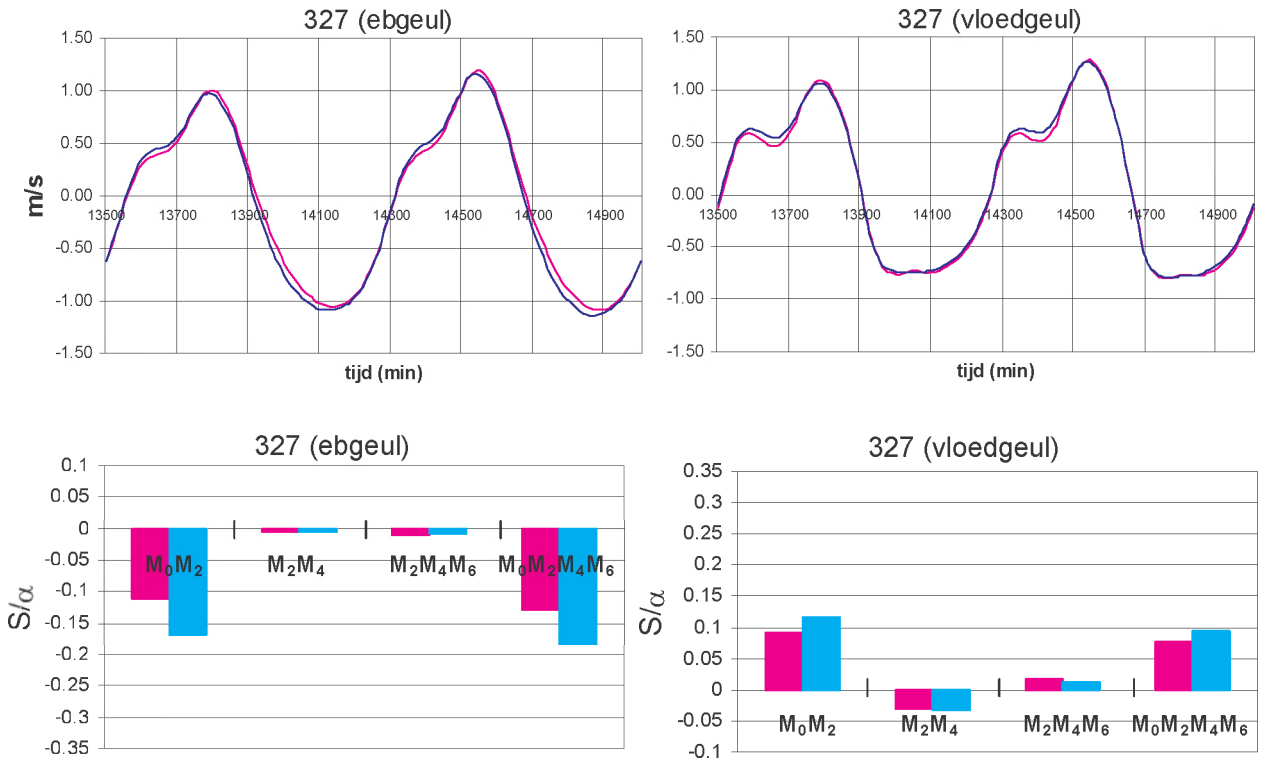
De punten worden "van west naar oost" behandeld. Voor alle figuren geldt: Roze = 1972, blauw = 2002. De figuren hebben dezelfde schaal, behalve punt 530.

Figuur H.2 Getij analyse op raai 302



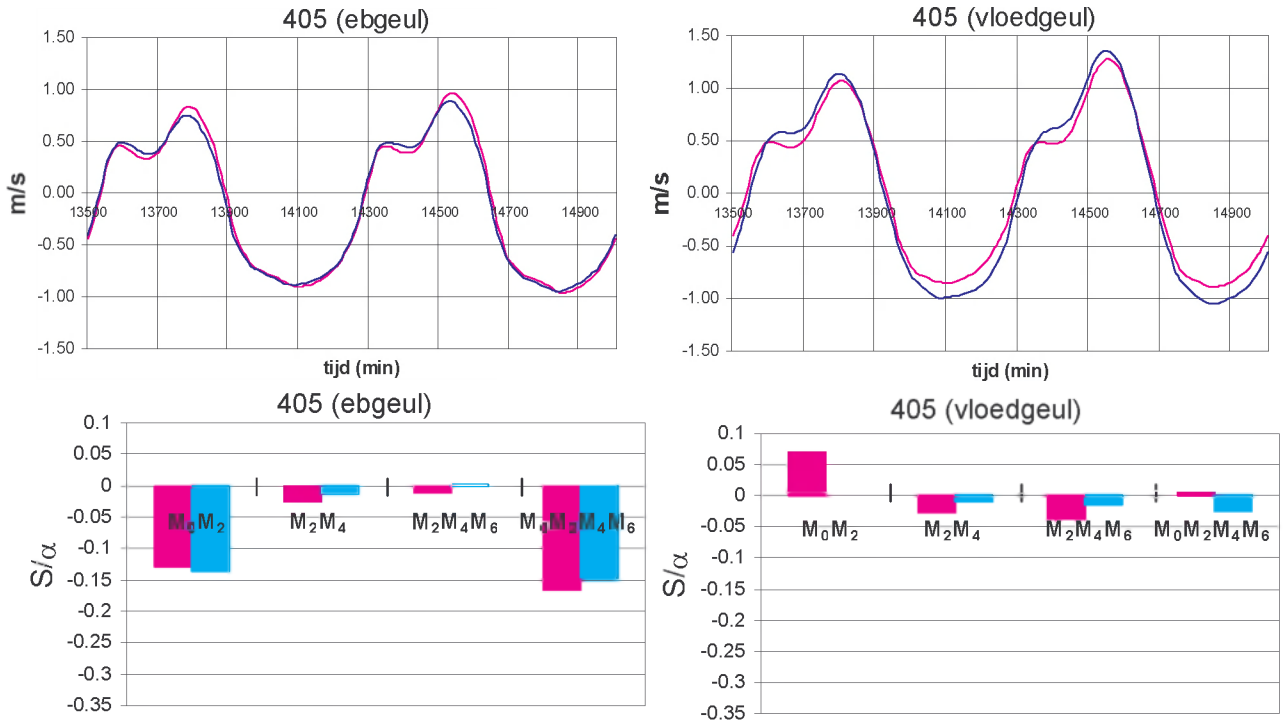
Voor de punten op raai 302 geldt, dat de M_0M_2-interactie dominant is voor het lokale, residuele sedimenttransport (Figuur H.2). In de ebgeul neemt de ebdominantie van de M_0M_2-interactie af, veroorzaakt door een afname van de amplitude van het M_2-getij. De M_0 component blijft in beide geulen nagenoeg gelijk, net als de amplitudes en relatieve fasen van de overige componenten.

Figuur H.3 Getij analyse op raai 327



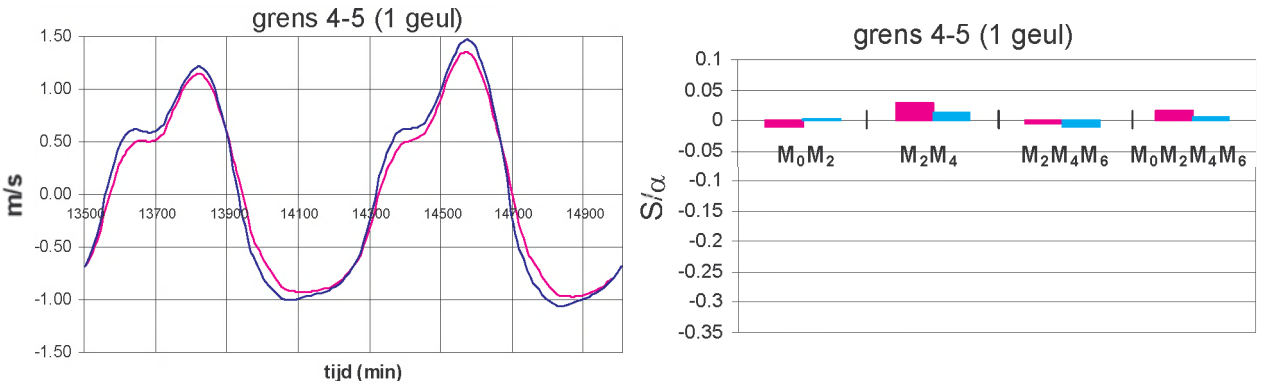
Deze twee punten op de raai 327 laat ook een dominant sedimenttransport zien als gevolg van de M_0M_2-interactie. Al kan de bijdrage van de M_2M_4-interactie aan het sedimenttranpsort in de vloedgeul niet worden verwaarloosd. Deze term geeft zelfs een ebdominant transport. Opvallend is dat in de snelheidskromme niet veel verschil is waar te nemen tussen de jaren, Door de veranderde bodem is het residuele ebtransport in de ebgeul en het residuele vloedtransport in de vloedgeul (licht) toegenomen. In beide gevallen wordt dit veroorzaakt door een kleine toename van de M_0-component. In de ebgeul is tevens de amplitude van de M_2-component licht toegenomen.

Figuur H.4 Getij analyse op raai 405



In de ebgeul op raai 405 is de M_0M_2 interactie dominant voor het lokale, residuele sedimenttransport. In de vloedgeul zijn de verschillende interacties van dezelfde orde van grootte. In de ebgeul is het residuele sedimenttransport lichte afgenomen door een bodemligging uit 2002 te gebruiken. Deze lichte afname wordt dit keer niet door de M_0M_2 interactie veroorzaakt, maar door de interacties van de hogere componenten. Dit komt doordat de amplitudes van de M_4 en de M_6 component zijn afgenomen als gevolg van een andere bodem. In de vloedgeul is de bijdrage aan het residuele sedimenttransport in 2002 a.g.v. de M_0M_2 interactie nul, omdat de residuele stroming nul is. Het is mogelijk dat hier een drempel is ontstaan, door bijvoorbeeld een geulverplaatsing. Ook de hogere componenten spelen in 2002 ook nauwelijks een rol voor het sedimenttransport.

Figuur H.5 Getij analyse op grens 4-5

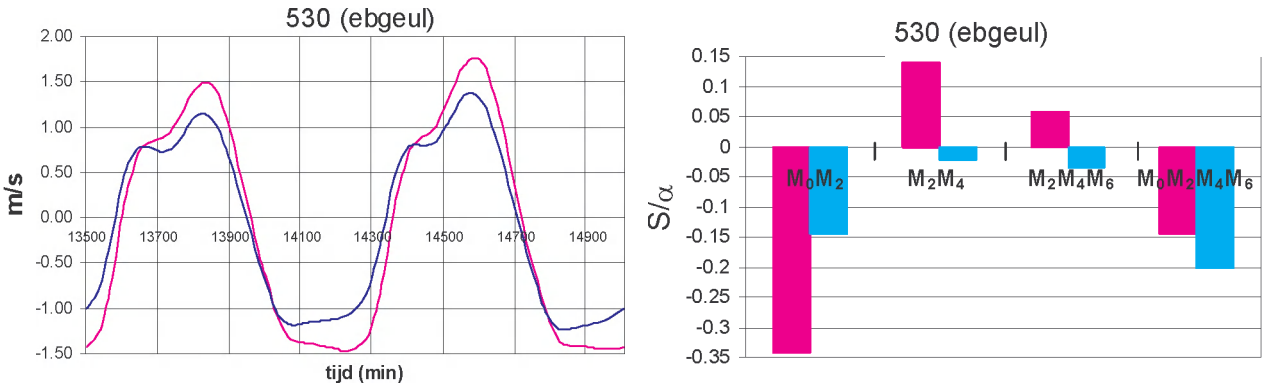


In een punt op de grens tussen cel 4 en 5 is de snelheidskromme duidelijk vervormd als gevolg van de veranderde bodem, maar de sedimenttransporten laten niet veel verandering zien. Wanneer de amplitudes en relatieve fases van de verschillende componenten worden bekeken zijn er wel veranderingen waar te nemen, zoals een toename van de M_4- en M_6- amplitude, een afname van de M_2 amplitude. Toch heeft dat nauwelijks invloed op een verschil in het lokale, residuele sedimenttransport. De vraag is of dit punt wel representatief is voor de gehele raai, omdat het getijgemiddelde sedimenttransport over de gehele raai we een grote toename laat zien in landwaarse richting.

Tabel H.1 Componenten op grens 4-5

1972	u_0 = 0,01 m/s	$\hat{u}_2$ = 1,60 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,16 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,17 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = 1,36 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = -0,29 rad
2002	u_0 = 0,002 m/s	$\hat{u}_2$ = 1,15 m/s	$\hat{u}_4$ = 0,19 m/s	$\hat{u}_6$ = 0,22 m/s
			$\varphi_{2\text{-}4}$ = 1,50 rad	$\varphi_{2\text{-}6}$ = -0,21 rad

Figuur H.6 Getij analyse op raai 530



Ook in dit punt (op raai 530) is de M_0M_2 interactie doorslaggevend voor de richting van het residuele sedimenttransport. Alhoewel de hogere componenten een grote spelen. Wrijving speelt hier een grote rol, mogelijk heeft dat te maken met de ligging van het punt: achter in het estuarium. Het M_0M_2 –gedreven transport is sterk afgenomen door de veranderde bodemligging. Dit wordt vooral veroorzaakt door een sterke afname van de amplitude van het M_2-getij. De amplitudes van de M_4 en de M_6 component zijn nauwelijks veranderd, maar de relatieve faseverschillen wel. Deze hebben zelfs gezorgd voor een omslag in het transport als gevolg van de hogere componenten: van vloeddominant naar een ebdominant transport.

H.3 Conclusie

De bijdrage van de verschillende interacties aan het lokale, residuele sedimenttransport en de oorsprong van de veranderingen tussen 1972 en 2002 zijn samengevat in Tabel H.2.

Tabel H.2 Samenvatting bijdragen interacties aan residuele sedimenttransport in beschouwde punten

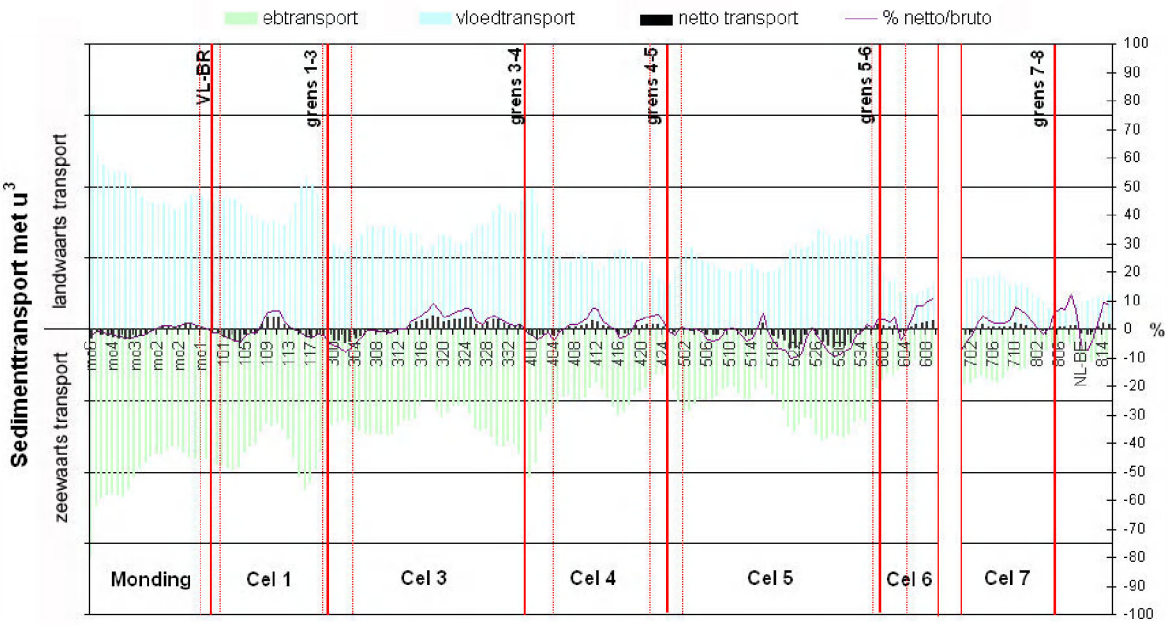
	Punt in...	Belangrijke bijdrage aan het lokale, residuele transport	Oorzaak verschil tussen 1972 en 2002
302	ebgeul	M_0M_2	M_0M_2
	vloedgeul	M_0M_2	-
327	ebgeul	M_0M_2	M_0M_2
	vloedgeul	M_0M_2	M_0M_2
405	ebgeul	M_0M_2	M_2M_4, $M_2M_4M_6$
	vloedgeul	M_0M_2, M_2M_4, $M_2M_4M_6$	M_0M_2
Grens 4-5		-	-
530	ebgeul	M_0M_2	M_2M_4, $M_2M_4M_6$

In vrijwel alle punten wordt het residuele sedimenttransport op de lange termijn gedomineerd door de interactie van het M_2-getij met de residuele stromingscomponent M_0. Op één locatie blijkt de M_2M_4-interactie en de $M_2M_4M_6$-interactie ook invloed te hebben op de grootte en/of richting van het sedimenttransport. In de meeste gevallen is een verandering in de M_0M_2 term doorslaggevend voor de verandering in het totale residuele transport. Maar dat geldt niet voor alle punten (bijv. 405 in de ebgeul en 530).

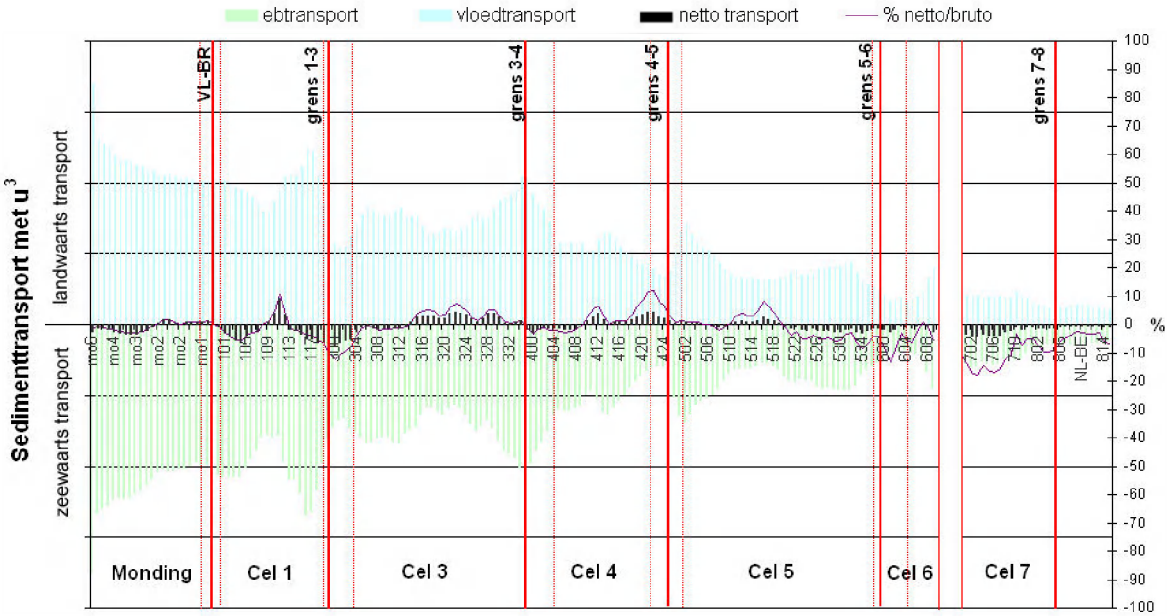
Bijlage I Eb- en vloedtransporten

I.1 Eb- en vloedtransport met u^3

Figuur I.1 Eb- en vloedtransport met u^3 in 1972

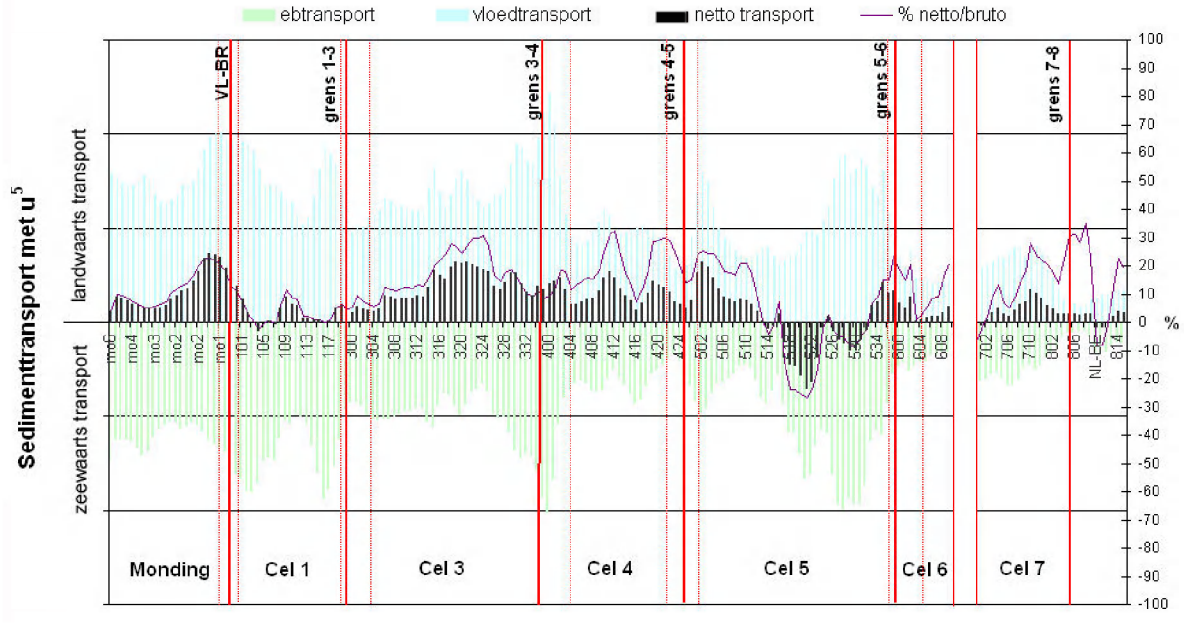


Figuur I.2 Eb- en vloedtransport met u^3 in 2002

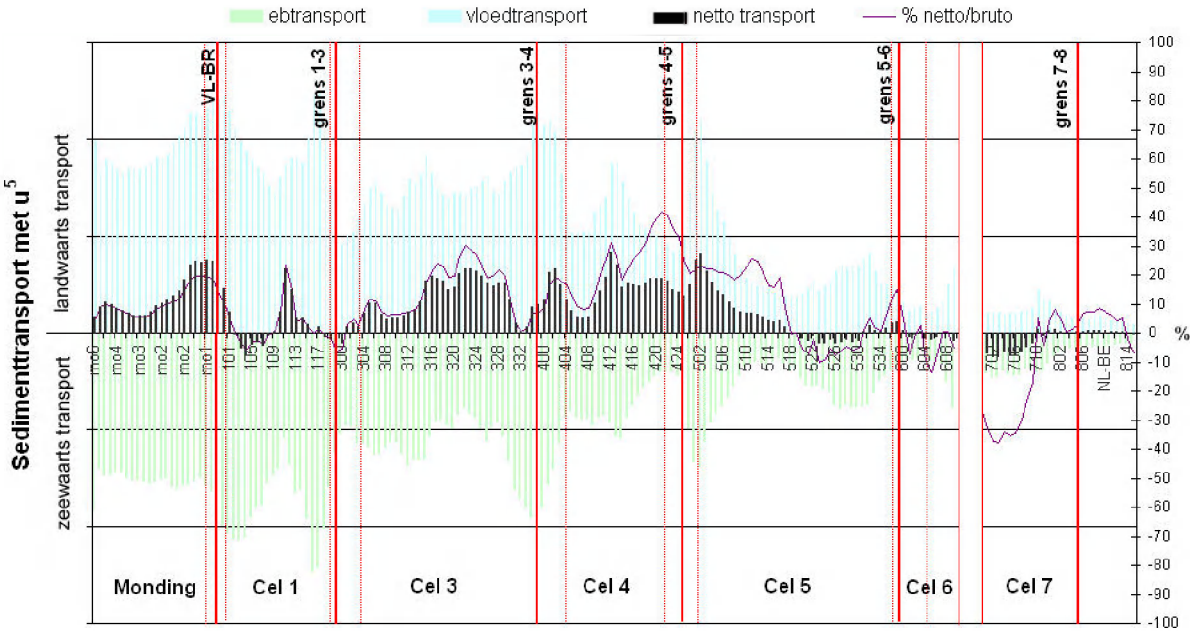


I.2 Eb- en vloedtransport met u[5]

Figuur I.3 Eb- en vloedtransport met u[5] in 1972

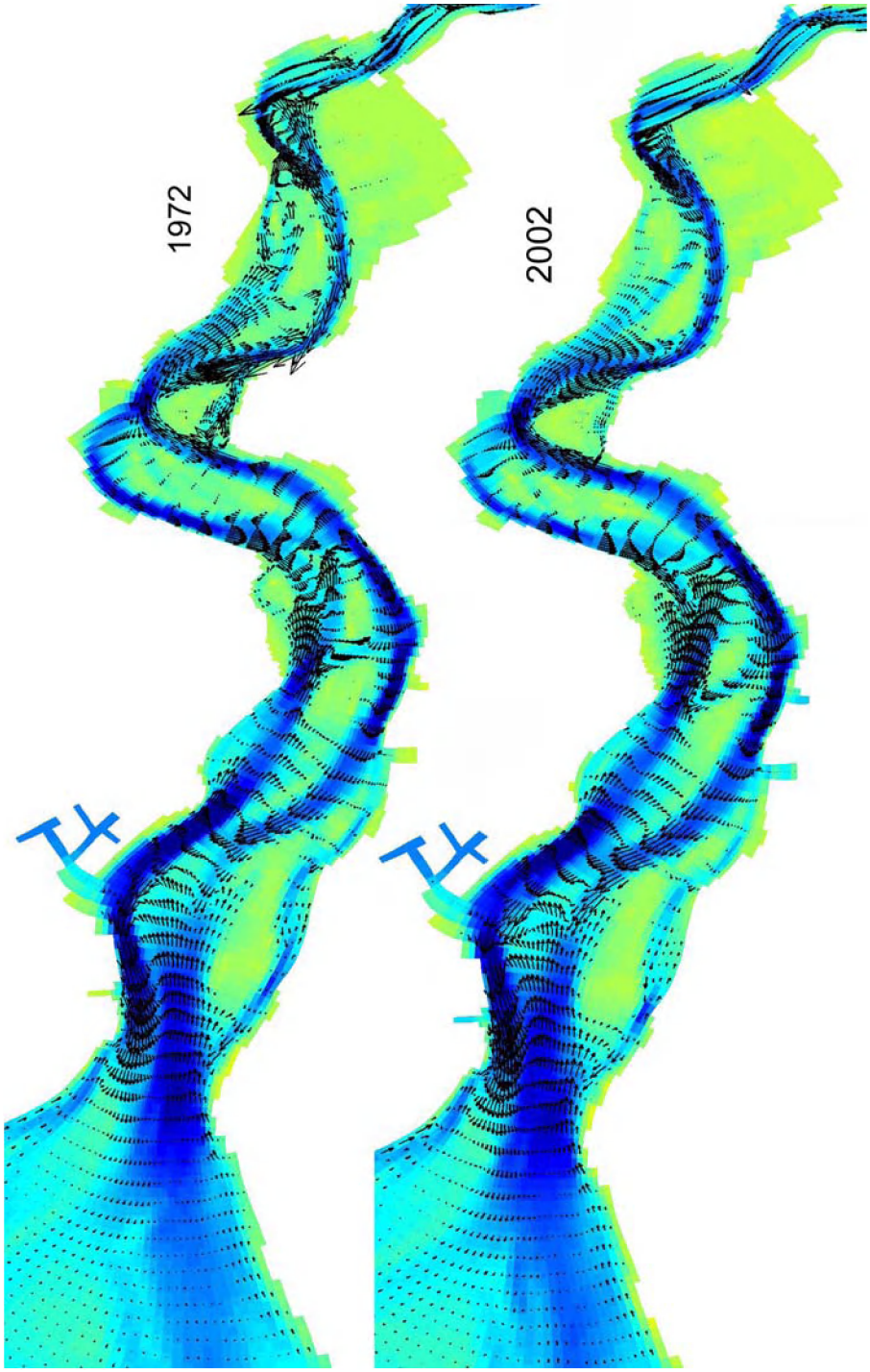


Figuur I.4 Eb- en vloedtransport met u[5] in 2002

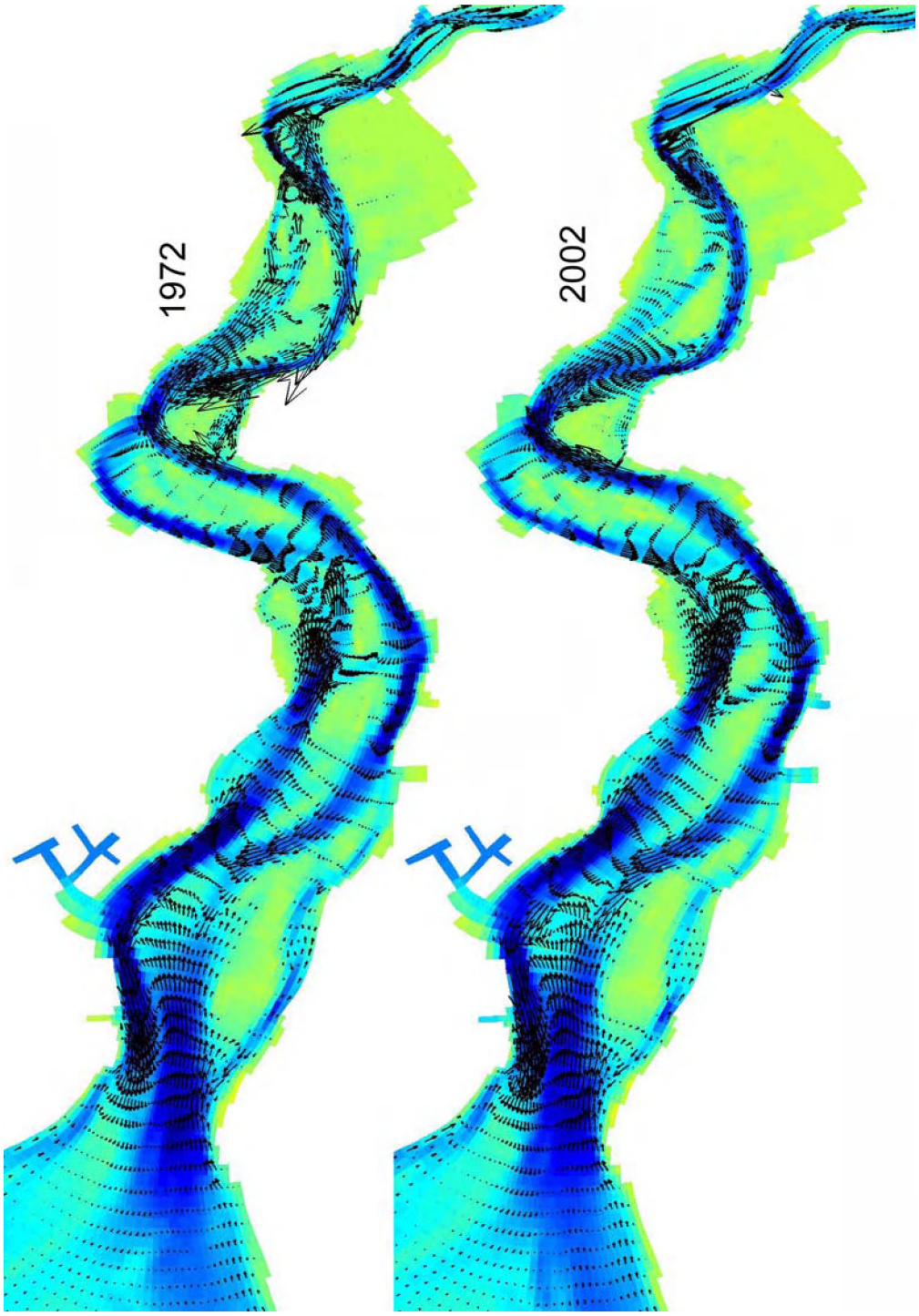


Bijlage J Lokale, residuele transporten u^3, u^4, u^5 voor 1972 en 2002

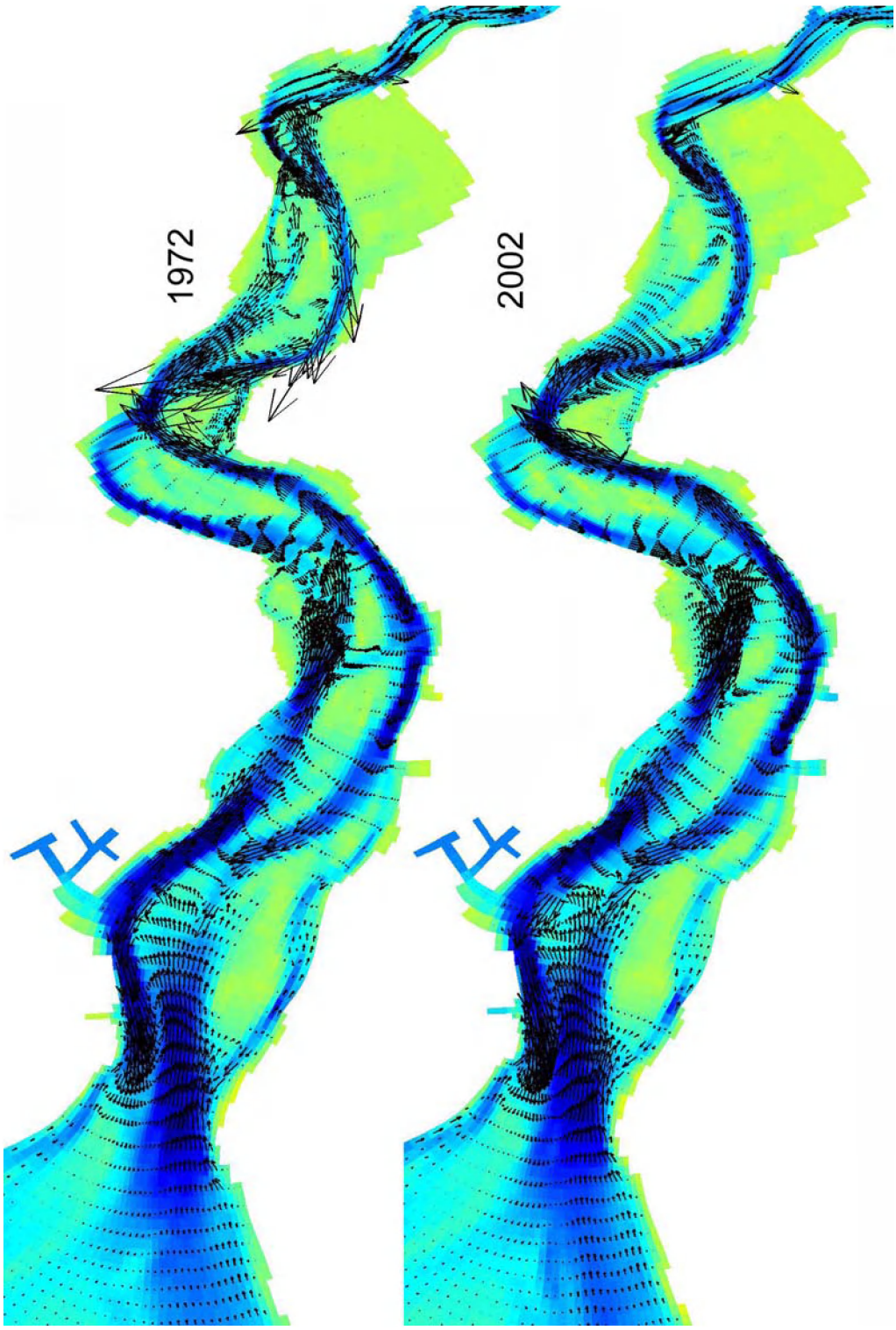
J.1 Met u^3



J.2 Met u^4



J.3 Met u^5



Bijlage K Gemiddelde en standaarddeviatie binnen grensgebieden

K.1 Grensgebied tussen monding en cel 1

grens mond-cel 1	1972					
	u^3		u^4		u^5	
mo1	18,28	Lw	163,12	Lw	343,18	Lw
mo1	0,56	Lw	129,78	Lw	289,98	Lw
VL-BR	-25,30	Zw	84,11	Lw	221,04	Lw
100	-25,21	Zw	72,10	Lw	191,80	Lw
Gemiddeld	**-7,92**	**Zw**	**112,28**	**Lw**	**261,50**	**Lw**
standaard dev	16,49		32,56		52,87	
	2002					
	u^3		u^4		u^5	
mo1	20,24	Lw	173,28	Lw	375,42	Lw
mo1	24,53	Lw	173,49	Lw	373,28	Lw
VL-BR	-1,74	Zw	126,75	Lw	302,39	Lw
100	-20,04	Zw	86,76	Lw	229,74	Lw
Gemiddeld	**5,75**	**Lw**	**140,07**	**Lw**	**320,21**	**Lw**
standaard dev	16,02		32,37		53,60	
	verschil 2002-1972					
	u^3		u^4		u^5	
mo1	1,96	meer Lw	10,16	meer Lw	32,25	meer Lw
mo1	23,97	meer Lw	43,70	meer Lw	83,30	meer Lw
VL-BR	23,56	meer Lw	42,64	meer Lw	81,35	meer Lw
100	5,16	meer Lw	14,66	meer Lw	37,94	meer Lw
Gemiddeld	**13,66**	**meer Lw**	**27,79**	**meer Lw**	**58,71**	**meer Lw**
standaard dev	9,09		13,83		21,21	

K.2 Grensgebied tussen cel 1 en 3

grens cel 1-3	1972					
	u^3		u^4		u^5	
119	-37,33	Zw	19,54	Lw	86,30	Lw
grens	-62,85	Zw	-11,15	Zw	42,98	Lw
300	-73,34	Zw	-12,20	Zw	51,05	Lw
301	-78,46	Zw	-0,30	Zw	85,95	Lw
302	-95,33	Zw	-17,96	Zw	68,57	Lw
303	-82,06	Zw	-13,16	Zw	65,23	Lw
Gemiddeld	**-71,56**	**Zw**	**-5,87**	**-**	**66,68**	**Lw**
Stand dev	16,79		11,61		14,97	
	2002					
	u^3		u^4		u^5	
119	-124,62	Zw	-83,31	Zw	-32,25	Zw
grens	-150,40	Zw	-113,61	Zw	-73,75	Zw
300	-156,97	Zw	-106,84	Zw	-53,77	Zw
301	-130,45	Zw	-54,43	Zw	28,91	Lw
302	-110,63	Zw	-36,38	Zw	47,96	Lw
303	-102,57	Zw	-41,44	Zw	32,17	Lw
Gemiddeld	**-129,28**	**Zw**	**-72,67**	**Zw**	**-8,45**	**-**
Stand dev	18,12		28,24		43,28	
	verschil 2002-1972					
	u^3		u^4		u^5	
119	-87,29	Meer Zw	-102,86	Meer Zw	-118,54	Meer Zw
grens	-87,55	Meer Zw	-102,46	Meer Zw	-116,72	Meer Zw
300	-83,64	Meer Zw	-94,64	Meer Zw	-104,83	Meer Zw
301	-51,99	Meer Zw	-54,13	Meer Zw	-57,04	Meer Zw
302	-15,30	Meer Zw	-18,42	Meer Zw	-20,61	Meer Zw
303	-20,51	Meer Zw	-28,28	Meer Zw	-33,07	Meer Zw
Gemiddeld	**-77,62**	**Meer Zw**	**-88,52**	**Meer Zw**	**-99,28**	**Meer Zw**
Stand dev	29,26		33,25		37,92	

K.3 Grensgebied tussen cel 3 en 4

grens cel 3-4	1972					
	u^3		u^4		u^5	
grens	-15,48	Zw	61,50	Lw	171,66	Lw
400	-46,56	Zw	52,49	Zw	203,39	Lw
401	-68,55	Zw	48,29	Zw	219,33	Lw
402	-31,84	Zw	87,74	Zw	237,99	Lw
403	-17,22	Zw	73,53	Zw	169,69	Lw
Gemiddeld	**-35,93**	**Zw**	**64,71**	**Zw**	**200,41**	**Lw**
stand dev	18,09		13,15		24,32	
	2002					
	u^3		u^4		u^5	
grens	-30,34	Zw	38,44	Lw	145,92	Lw
400	-63,33	Zw	29,28	Lw	174,64	Lw
401	-30,81	Zw	105,62	Lw	313,34	Lw
402	-20,59	Zw	121,98	Lw	330,87	Lw
403	-28,85	Zw	91,85	Lw	249,36	Lw
Gemiddeld	**-34,79**	**Zw**	**77,43**	**Lw**	**242,82**	**Lw**
stand dev	13,46		33,73		66,84	
	verschil 2002-1972					
	u^3		u^4		u^5	
grens	-14,86	Meer Zw	-23,06	Meer Zw	-25,75	Meer Zw
400	-16,77	Meer Zw	-23,21	Meer Zw	-28,75	Meer Zw
401	37,75	Meer Lw	57,33	Meer Lw	94,00	Meer Lw
402	11,25	Meer Lw	34,25	Meer Lw	92,88	Meer Lw
403	-11,63	Meer Zw	18,32	Meer Lw	79,67	Meer Lw
Gemiddeld	**4,34**	-	**11,32**	-	**33,10**	-
stand dev	19,89		31,68		53,98	

K.4 Grensgebied tussen cel 4 en 5

grens cel 4-5	1972					
	u^3		u^4		u^5	
422	36,044	Lw	94,0184	Lw	157,1137	Lw
423	33,4457	Lw	71,1905	Lw	111,0969	Lw
424	15,8234	Lw	51,8419	Lw	93,9007	Lw
grens	-6,573	Zw	29,7196	Lw	73,5081	Lw
500	-15,9971	Zw	42,3438	Lw	117,5089	Lw
501	9,6011	Lw	115,7259	Lw	262,4374	Lw
502	-0,3768	Zw	133,5464	Lw	320,1555	Lw
Gemiddeld	**10,28**	**-**	**76,91**	**Lw**	**162,25**	**Lw**
Stand dev	17,03		33,71		80,75	
	2002					
	u^3		u^4		u^5	
422	83,8956	Lw	164,2005	Lw	266,8042	Lw
423	52,1298	Lw	126,173	Lw	221,8627	Lw
424	39,6747	Lw	115,0746	Lw	212,0406	Lw
grens	21,4887	Lw	95,5021	Lw	194,0495	Lw
500	10,1265	Lw	107,8021	Lw	251,4741	Lw
501	18,183	Lw	157,6278	Lw	375,8149	Lw
502	14,0288	Lw	169,9273	Lw	409,2801	Lw
Gemiddeld	**34,22**	**Lw**	**133,76**	**Lw**	**275,90**	**Lw**
Stand dev	22,98		25,86		72,59	
	verschil 2002-1972					
	u^3		u^4		u^5	
422	47,85	Meer Lw	70,18	Meer Lw	109,69	Meer Lw
423	18,68	Meer Lw	54,98	Meer Lw	110,77	Meer Lw
424	23,85	Meer Lw	63,23	Meer Lw	118,14	Meer Lw
grens	28,06	Meer Lw	65,78	Meer Lw	120,54	Meer Lw
500	26,12	Meer Lw	65,46	Meer Lw	133,97	Meer Lw
501	8,58	Meer Lw	41,90	Meer Lw	113,38	Meer Lw
502	14,41	Meer Lw	36,38	Meer Lw	89,12	Meer Lw
Gemiddeld	**23,94**	**Meer Lw**	**56,85**	**Meer Lw**	**113,66**	**Meer Lw**
Stand dev	10,89		11,28		11,76	

K.5 Grensgebied tussen cel 5 en 6

grens cel 5-6	1972					
	u^3		u^4		u^5	
536	3,6203	Lw	67,9689	Lw	152,3175	Lw
grens	30,4395	Lw	92,8514	Lw	164,3119	Lw
600	23,7888	Lw	63,4828	Lw	104,6291	Lw
601	15,361	Lw	45,4492	Lw	75,5666	Lw
602	28,0831	Lw	74,0055	Lw	132,9628	Lw
603	-20,0619	Zw	-8,836	Zw	4,0698	Lw
604	-6,6235	Zw	1,2177	Lw	10,0972	Lw
Gemiddeld	**10,66**	**-**	**48,02**	**Lw**	**91,99**	**Lw**
Stand dev	16,51		33,08		56,36	
	2002					
	u^3		u^4		u^5	
536	-24,546	Zw	13,7106	Lw	53,3263	Lw
grens	-21,459	Zw	17,6269	Lw	56,4635	Lw
600	-35,8837	Zw	-9,5835	Zw	14,4082	Lw
601	-48,3096	Zw	-32,1278	Zw	-17,5594	Zw
602	-32,5816	Zw	-18,5842	Zw	-4,8853	Zw
603	-11,5696	Zw	-3,0601	Zw	6,2866	Lw
604	-19,7049	Zw	-22,2575	Zw	-22,8304	Zw
Gemiddeld	**-27,72**	**Zw**	**-7,75**	**-**	**12,17**	**-**
Stand dev	10,54		16,02		27,60	
	verschil 2002-1972					
	u^3		u^4		u^5	
536	-28,17	Meer Zw	-54,26	Meer Zw	-98,99	Meer Zw
grens	-51,90	Meer Zw	-75,22	Meer Zw	-107,85	Meer Zw
600	-59,67	Meer Zw	-73,07	Meer Zw	-90,22	Meer Zw
601	-63,67	Meer Zw	-77,58	Meer Zw	-93,13	Meer Zw
602	-60,66	Meer Zw	-92,59	Meer Zw	-137,85	Meer Zw
603	8,49	Meer Lw	5,78	Meer Lw	2,22	Meer Lw
604	-13,08	Meer Zw	-23,48	Meer Zw	-32,93	Meer Zw
Gemiddeld	**-38,38**	**Meer Zw**	**-55,77**	**Meer Zw**	**-79,82**	**Meer Zw**
Stand dev	24,27		30,29		41,43	

K.6 Grensgebied tussen cel 7 en 8

grens cel 7-8	1972					
	u^3		u^4		u^5	
806	17,37	Lw	34,14	Lw	46,58	Lw
807	15,37	Lw	27,62	Lw	35,71	Lw
808	29,03	Lw	39,87	Lw	46,82	Lw
Gemiddeld	**20,59**	**Lw**	**33,88**	**Lw**	**43,04**	**Lw**
Stand dev	5,22		4,33		4,49	
	2002					
	u^3		u^4		u^5	
806	-14,58	Zw	-0,70	Zw	9,54	Lw
807	-11,86	Zw	0,75	Lw	9,79	Lw
808	-9,98	Zw	1,66	Lw	10,28	Lw
Gemiddeld	**-12,14**	**Zw**	**0,57**	**-**	**9,87**	**Lw**
Stand dev	1,64		0,84		0,27	
	verschil 2002-1972					
	u^3		u^4		u^5	
806	-31,95	Meer Zw	-34,83	Meer Zw	-37,04	Meer Zw
807	-27,23	Meer Zw	-26,87	Meer Zw	-25,93	Meer Zw
808	-39,00	Meer Zw	-38,21	Meer Zw	-36,55	Meer Zw
Gemiddeld	**-32,73**	**Meer Zw**	**-33,30**	**Meer Zw**	**-33,17**	**Meer Zw**
Stand dev	4,19		4,12		4,44	

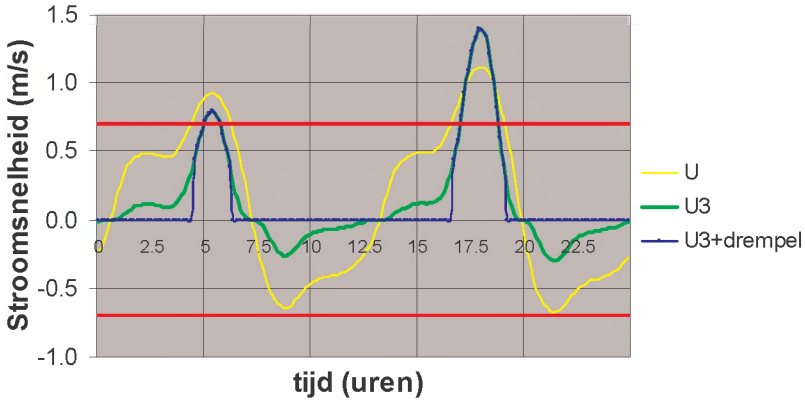
K.7 Ontwikkeling zandvolume per cel in 1972 en 2002 op basis van de gemiddelden

		u^3		u^4		u^5	
Cel 1	**1972**	63,65	Sed	118,15	Sed	194,82	Sed
	2002	135,02	Sed	212,74	Sed	328,66	Sed
	verschil 2002-1972	71,37	meer Sed	94,59	meer Sed	133,84	meer Sed
Cel 3	**1972**	-35,63	Eros	-70,58	Eros	-133,73	Eros
	2002	-94,49	Eros	-150,10	Eros	-251,28	Eros
	verschil 2002-1972	-58,86	meer Eros	-79,52	meer Eros	-117,54	meer Eros
Cel 4	**1972**	-46,21	Eros	-12,20	Eros	38,17	Eros
	2002	-69,00	Eros	-56,33	Eros	-33,08	Eros
	verschil 2002-1972	-22,79	meer Eros	-44,12	meer Eros	-71,25	meer Eros
Cel 5	**1972**	-0,38	-	28,89	Sed	70,25	Sed
	2002	61,94	Sed	141,51	Sed	263,73	Sed
	verschil 2002-1972	62,32	meer Sed	112,62	meer Sed	193,48	meer Sed

L.1 Inleiding

In deze bijlage wordt de invloed van toepassing van een drempelsnelheid in de transportformulering op het netto sedimenttransport en op het verschil tussen 1972 en 2002 onderzocht. Metingen van het sedimenttransport in combinatie met de bodemstroomsnelheid zijn uitgevoerd in de Westerschelde bij de plaat van Walsoorden (zie paragraaf 3.4.5 in het hoofdrapport). Er wordt aangenomen dat deze data geldt voor het gehele estuarium. Uit deze metingen blijkt dat de kritische stroomsnelheid ongeveer ligt tussen 0,2 en 0,4 m/s. Bij stroomsnelheden van 0,6 m/s treedt lokaal een sedimenttransport op tussen de 20 en 40 g/m^2/s.

De invloed van de drempelsnelheid op het sedimenttransport kan aan de hand van het volgende voorbeeld worden geïllustreerd (Figuur L.1).



Figuur L.1 Voorbeeld invloed drempelsnelheid van 0,7 m/s op lokaal sedimenttransport

In het voorbeeld is het residuele sedimenttransport (het sedimenttransport geïntegreerd over de tijd) landwaarts gericht. Bij toepassing van een drempelsnelheid worden alle transporten kleiner dan deze snelheid op nul gesteld (Vergelijking L.1) Het netto sediment transport wordt hierdoor groter in landwaartse richting dan bij berekening zonder drempelsnelheid. Verschillen in vloedduur en ebduur en verschillen in maximale vloedsnelheden en ebsnelheden bepalen (mede) de invloed van de drempelsnelheid op het lokale, residuele sedimenttransport

Als $\sqrt{u_x^2 + u_y^2} < u_{kr}$ dan $S_x = 0$ en $S_y = 0$.

Als $\sqrt{u_x^2 + u_y^2} \geq u_{kr}$ dan Vergelijking 5.3 in het hoofdrapport.

Vergelijking L.1 Berekening van het lokale, momentane sedimenttransport met drempelsnelheid

Waarin;

u_x, u_y= stroomsnelheid in respectievelijk x- en y-richting
u_{kr} = kritische stroomsnelheid (=drempelsnelheid)
S_x, S_y = sedimenttransport in respectievelijk x- en y-richting

De invloed op het netto transport neemt toe bij hogere waarden van de drempelsnelheid. De invloed van de drempelsnelheid op het netto transport

neemt af bij hogere waarden van n, omdat dan de netto transporten meer bepaald worden door de maximale snelheden.

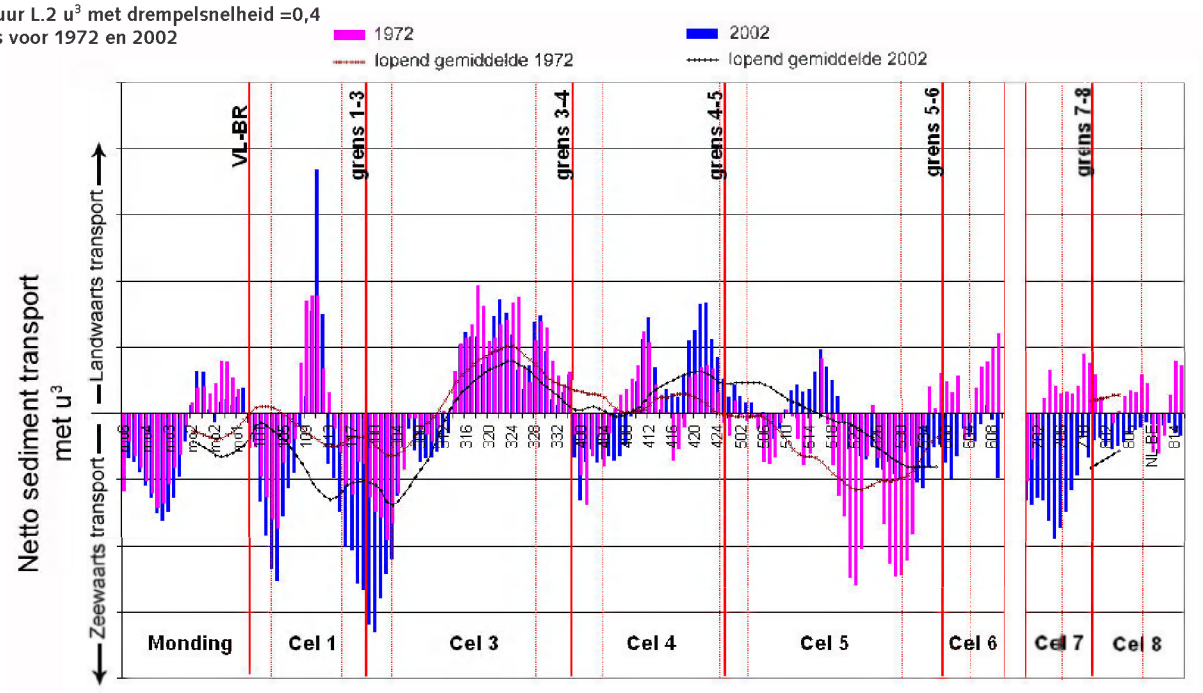
De kritische stroomsnelheid ligt waarschijnlijk ergens tussen 0,2 m/s en 0,4 m/s. Het sedimenttransport begint toe te nemen bij stroomsnelheden van 0,4 tot 0,6 m/s. Om inzicht te krijgen in de invloed van een drempelsnelheid, is het netto transport berekend voor de volgende transportformuleringen:

- u^3 met u_{kr} = 0,4 m/s
- u^3 met u_{kr} = 0,6 m/s
- u^4 met u_{kr} = 0,6 m/s

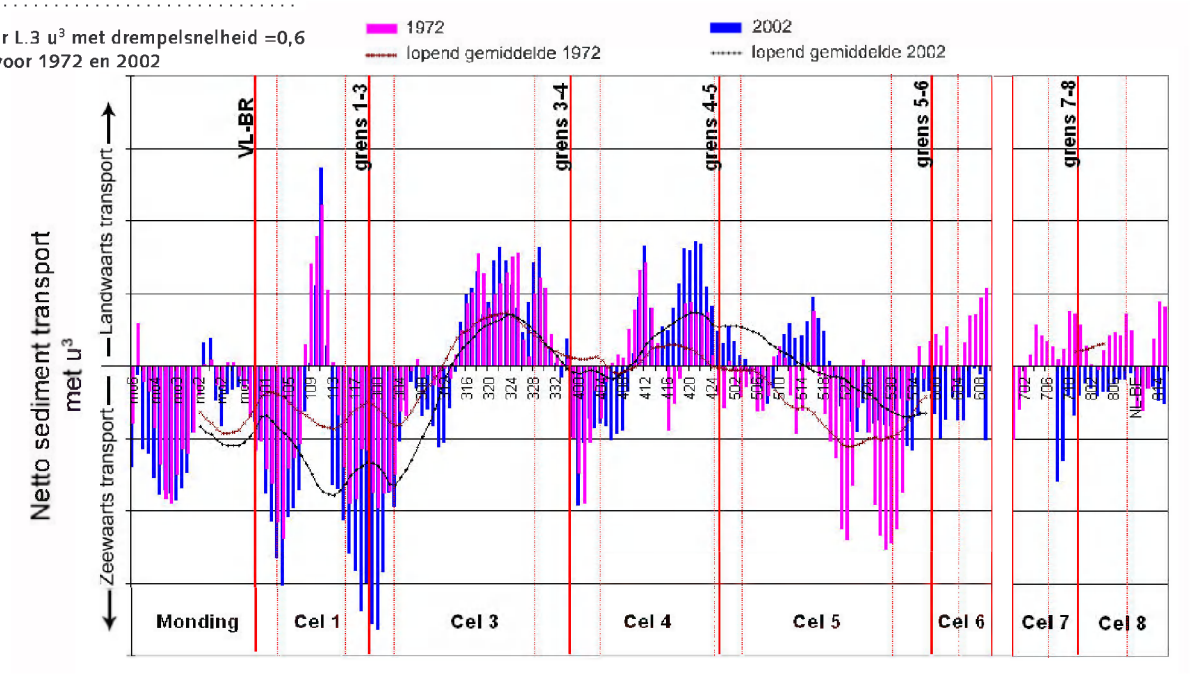
L.2 Modelresultaten voor 1972 en 2002 met drempelsnelheid.

De resultaten van 1972 en 2002 voor de modelsimulaties zijn gegeven in Figuur L.2 t/m Figuur L.4.

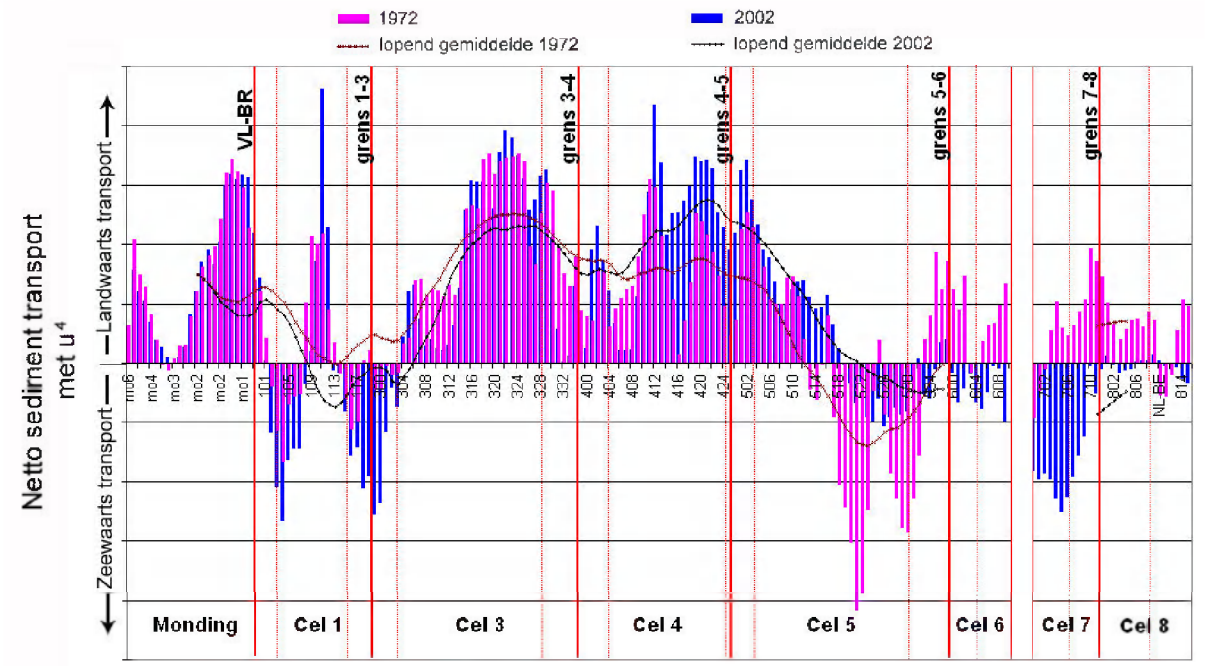
Figuur L.2 u^3 met drempelsnelheid =0,4 m/s voor 1972 en 2002



Figuur L.3 u^3 met drempelsnelheid =0,6 m/s voor 1972 en 2002

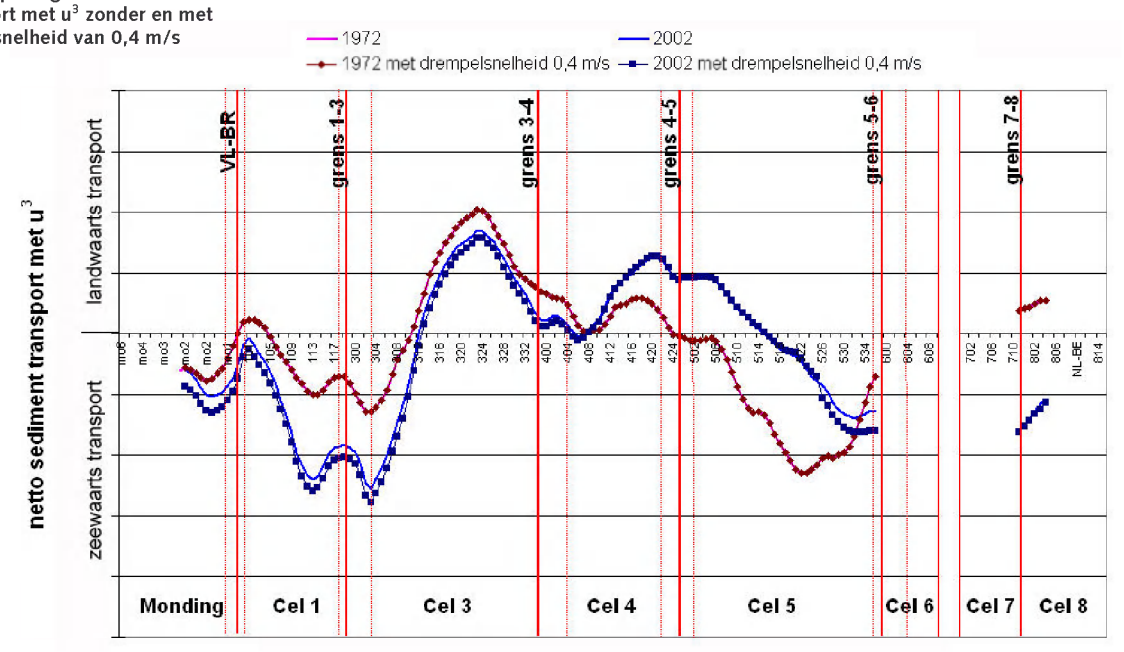


Figuur L.4 u^4 met drempelsnelheid =0,6 m/s voor 1972 en 2002

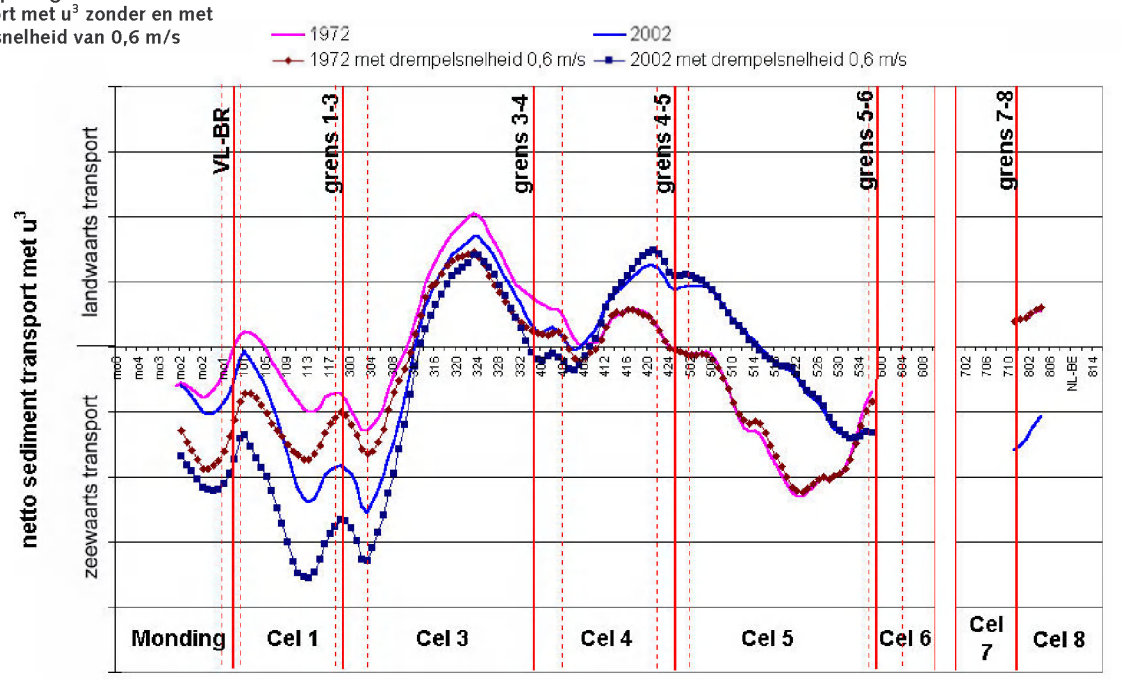


Het lopende gemiddelde is bepaald en vergeleken met het lopende gemiddelde van de modelsimulatie zonder drempelsnelheid (Figuur L.5 t/m Figuur L.7).

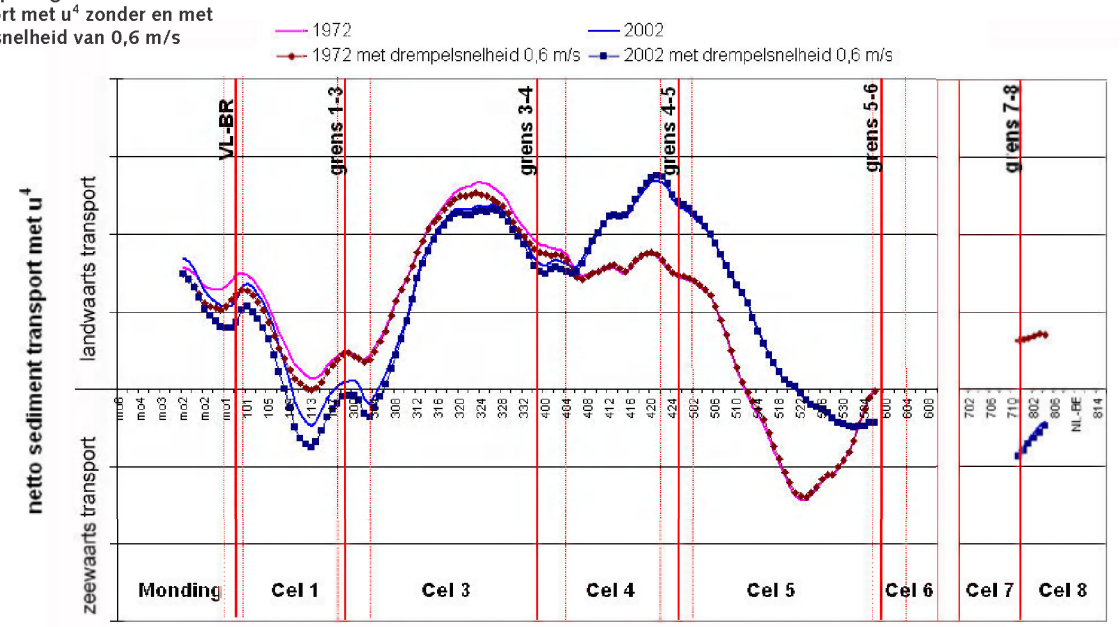
Figuur L.5 Lopend gemiddelde van het netto transport met u^3 zonder en met een drempelsnelheid van 0,4 m/s



Figuur L.6 Lopend gemiddelde van het netto transport met u^3 zonder en met een drempelsnelheid van 0,6 m/s



Figuur L.7 Lopend gemiddelde van het netto transport met u^4 zonder en met een drempelsnelheid van 0,6 m/s



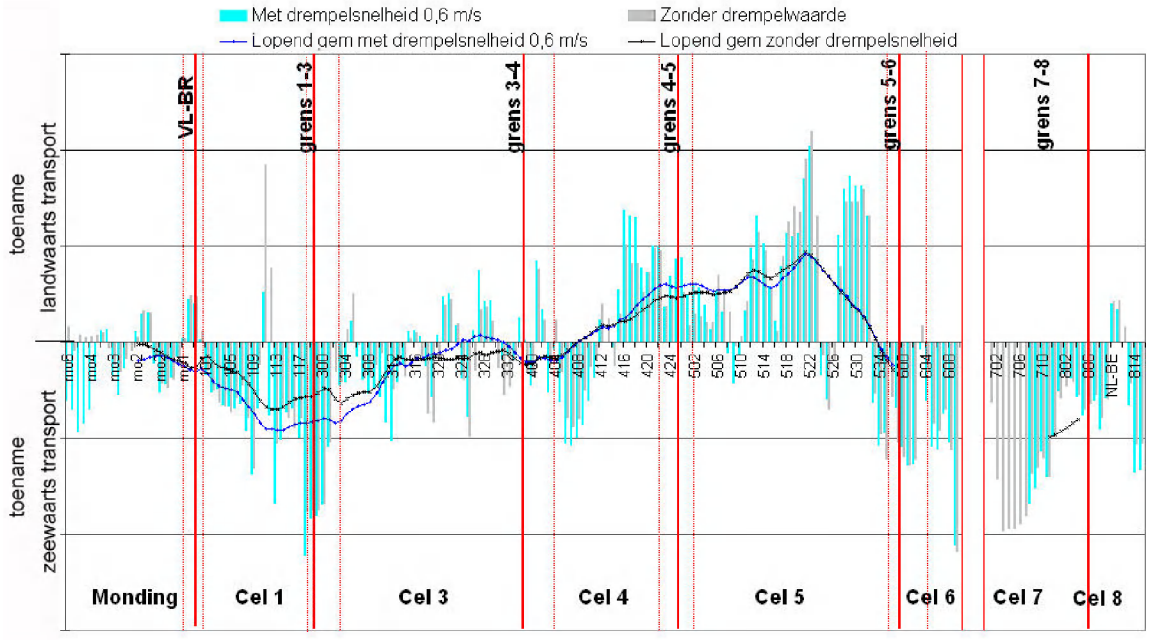
Een drempelsnelheid van 0,4 m/s heeft bij macht n=3 nauwelijks invloed op het netto transport. De lopende gemiddelden met of zonder drempelsnelheid zijn nagenoeg gelijk. Dit geldt ook voor een drempelsnelheid van 0,6 m/s bij u^4. Een drempelsnelheid kleiner en gelijk aan 0,6 m/s zal ook geen invloed hebben op netto transporten met u^5, omdat de invloed van een drempelsnelheid hier nog kleiner is. De transportformulering u^3 met u_{kr}= 0,6 m/s geeft in het westelijk deel van het estuarium (monding, cel 1, cel 3) wél andere netto sedimenttransporten. Door het gebruik van de kritische snelheid zijn de transporten meer ebdominant geworden. In het oostelijk deel is nauwelijks een verschil te zien tussen een transportformulering met of zonder een drempelsnelheid.

Kortom, een drempelsnelheid lager dan 0,6 m/s heeft geen invloed op de uitkomst van het netto transport, berekend met u^3, u^4 of u^5. Een drempelsnelheid van 0,6 m/s geeft alleen bij u^3 afwijkende transporten in het westelijk deel van het estuarium.

L.3 Verschil 2002-1972 met drempelsnelheid

Maar is het effect door gebruik van een drempelwaarde ook veranderd? Het effect van u^3 met een drempelwaarde van 0,6 m/s is gegeven in ..... Figuur L.8 en vergeleken met het effect zonder een drempelwaarde.

Figuur L.8 Transportverschil 2002 - 1972 met u^3 met en zonder een drempelsnelheid van 0,6 m/s



Alhoewel de netto transporten in 1972 en 2002 in het westelijk deel zijn veranderd, zijn de veranderingen relatief gezien klein. Toepassing van een drempelsnelheid heeft nauwelijks invloed op het effect.

L.4 Conclusie

Toepassing van een drempelsnelheid kleiner dan 0,6 m/s heeft geen invloed op de uitkomsten van het netto sedimenttransport met een bodem van 1972 en 2002, berekent met u^3, u^4 of u^5. Een drempelsnelheid van 0,6 m/s geeft alleen bij u^3 afwijkende sedimenttransporten in het westelijk deel van het estuarium. Maar in beide jaren (zowel in 1972 als in 2002) zijn de netto sedimenttransporten ongeveer evenveel toegenomen, zodat het effect nagenoeg gelijk blijft bij toepassing van een drempelsnelheid. Alleen lopende gemiddelde in cel 1 en op grens 1-3 is relatief meer toegenomen in zeewaartse richting.

Bijlage M Netto sedimenttransporten met bodem 1968, 1972 en 2002

In Figuur M.1 zijn de netto transporten gegeven voor de simulaties met de drie verschillende bodems gegeven; 1968, 1972 en 2002.

Figuur M.1 Netto sedimenttransporten in Westerschelde met u^4 voor 1968, 1972 en 2002

