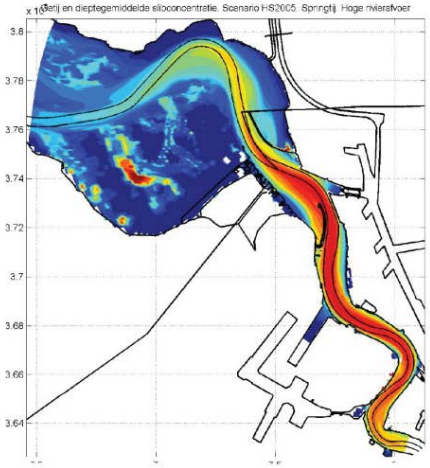
vlaams nederlandse Schelde commissie

departement Mobiliteit en Openbare Werken

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Instandhouding vaarpassen Schelde
Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie



LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid
Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde

Basisrapport grootschalige ontwikkeling G-2

01 oktober 2013

IMDC International Marine & Dredging Consultants

Deltares Enabling Delta Life

SVASEK HYDRAULICS Coastal, Harbour and River Consultants

ARCADIS Infrastructuur · Water · Milieu · Gebouwen

Colofon

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Coveliersstraat 15, 2600 Antwerpen, België

☎: + 32 3 270 92 95

🗐: + 32 3 235 67 11

Email: info@imdc.be

Website: www.imdc.be

Deltares

Adres: Rotterdamseweg 185, 2600 MH Delft, Nederland

☎: + 31 (0)88 335 8273

🗐: +31 (0)88 335 8582

Email: info@deltares.nl

Website: www.deltares.nl

Svašek Hydraulics BV

Adres: Schiehaven 13G, 3024 EC Rotterdam, Nederland

☎: +31 10 467 13 61

🗐: +31 10 467 45 59

Email: info@svasek.com

Website: www.svasek.com

ARCADIS Nederland BV

Adres: Nieuwe Stationsstraat 10, 6811 KS Arnhem, Nederland

☎: +31 (0)26 377 89 11

🗐: +31 (0)26 377 85 60

Email: info@arcadis.nl

Website: www.arcadis.nl

Document Identificatie

Titel	Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde
Project	Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie
Opdrachtgever	Afdeling Maritieme Toegang - Tavernierkaai 3 - 2000 Antwerpen
Bestek nummer	16EF/2010/14
Documentref	I/RA/11387/13.080/GVH
Documentnaam	K:\PROJECTS\11\11387 - Instandhouding Vaarpassen Schelde\10-Rap\Op te leveren rapporten\Oplevering 2013.10.01\G-2 - Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde_v2.0.docx

Revisies / Goedkeuring

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	31/03/2013	Klaar voor revisie	J. Cleveringa	G. Dam	
2.0	01/10/2013	Finaal	J. Cleveringa	G. Dam	

Verdeellijst

1	Analoog	Youri Meersschaut
1	Digitaal	Youri Meersschaut

GROOTSCHALIGE SEDIMENTBALANS VAN DE WESTERSCHELDE

PROJECT LTV VEILIGHEID EN TOEGANKELIJKHEID;
LTV V&T-RAPPORT K-17

30 augustus 2013
076945827:0.4 - Definitief
C04021.002666.0100

ARCADIS

Inhoud

1 Inleiding ... 3
1.1 De sedimenthuishouding van de Westerschelde ... 3
1.2 Aanpak en leeswijzer ... 4

2 Bodemligginggegevens ... 5
2.1 Grids ... 5
2.2 Ontbrekende delen ... 6
2.3 Land van Seafthinge ... 7

3 Nauwkeurigheid ... 11
3.1 Meten en verwerken ... 11
3.2 Histogrammen van de bodemligginggegevens ... 14
3.3 Vier periodes ... 19

4 Pieken en sprongen ... 21
4.1 Verschillen tussen de bodems van de Westerschelde ... 21
4.2 Plausibele pieken: daadwerkelijke variaties in de morfologie ... 22
4.3 Bandbreedtes rond de sedimentvolumes ... 29

5 Gegevens combineren ... 31
5.1 Inleiding ... 31
5.2 Lineaire interpolatie ... 31
5.3 Trends optellen ... 32
5.4 Gegevens combineren ... 35

6 Ontwikkeling sedimentvolumes en ingrepen ... 39
6.1 Ontwikkelingen 1955-2010 ... 39
6.2 Het Land van Saeftinghe ... 41
6.3 Bagger- en stortvolumes ... 45
6.4 Zandwinning ... 47
6.5 Zeeschelde & Monding van de Westerschelde ... 49

7 Sedimentbalans met 1 compartiment ... 51
7.1 Inleiding ... 51
7.2 Eén compartiment en het belang van de randen ... 51
7.3 Keuze voor de randvoorwaarden ... 58
7.4 Resultaten ... 59

8 Sedimentbalans voor oost en west ... 61
8.1 Inleiding ... 61
8.2 Twee compartimenten ... 61
8.3 Netto onttrekkingen oost en west ... 62
8.4 Uitwisseling tussen oost en west ... 64

9 Zand- en Slibbalans 68
9.1 Inleiding 68
9.2 Structurele sedimentatie van slib 68
9.3 Trends per macrocel 70
9.4 Berekende zand- en slibtransporten 72

10 Discussie en conclusies 74
10.1 Is er een meerwaarde? 74
10.2 Overzicht van de ontwikkelingen in drie perioden 74
10.3 Discussie 78

11 Referenties 79

1 Inleiding

1.1 DE SEDIMENTHUISHOUDING VAN DE WESTERSCHELDE

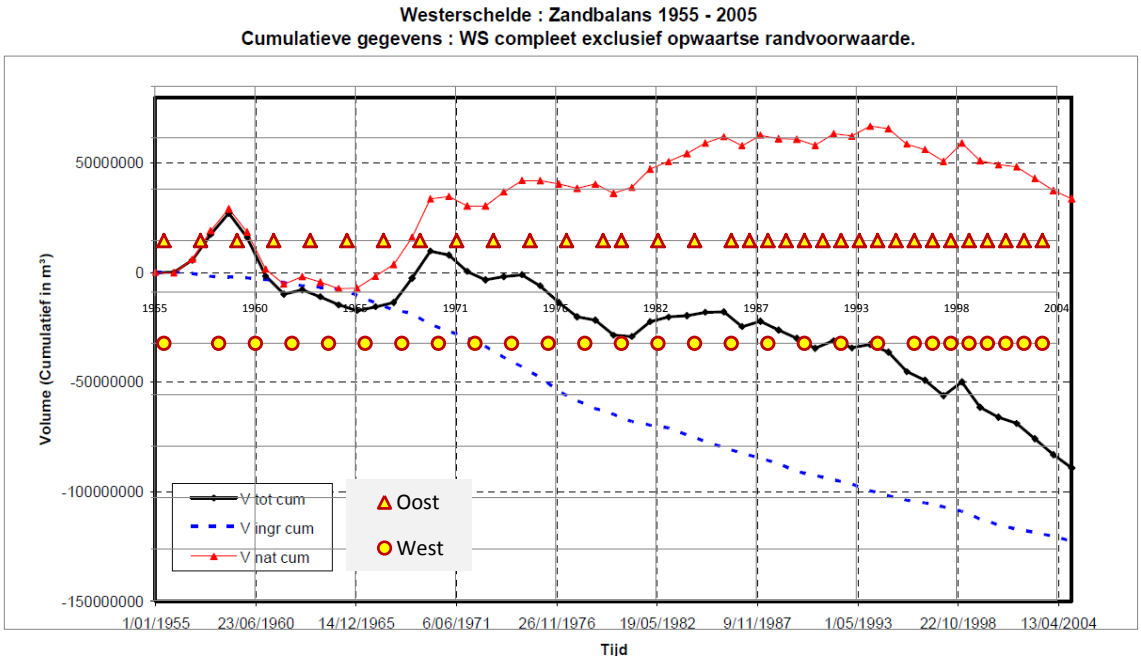
De sedimenthuishouding van het Schelde-estuarium en specifiek van de Westerschelde is belangrijk voor het beleid en beheer rond het estuarium. Beleid en beheer die aan de sedimenthuishouding zijn gerelateerd hebben betrekking op de zandwinning, het kustbeleid en het baggeren en verspreiden van baggerspecie. Vaak wordt over de sedimenthuishouding gesproken in termen van import en export. Dat betreft de transporten van zand over de zeewaartse grens (de lijn Vlissingen-Breskens) van het Schelde-estuarium, op basis van een sedimentbalans.

Een 'omslag' van import naar export wordt vaak beschouwd als een belangrijk systeemverschijnsel van het estuarium, dat samenhangt met de veranderingen in de waterbeweging (het optreden van getijasymmetrie), het onttrekken van zand en het baggeren en verspreiden van sediment uit estuarium. In de voorliggende studie wordt vastgesteld dat observaties aangaande import en export en wisselingen daartussen mede worden gestuurd door de aannames en randvoorwaarden in de sedimentbalans. Er kan echter wel degelijk sprake kan zijn van omslagen of meer geleidelijke veranderingen in het systeem. Daarom wordt in LTV Veiligheid en Toegankelijkheid de sedimenthuishouding beschouwd in samenhang met de waterbeweging (rapport G-1) en wordt nader ingegaan op de wijze waarop waterbeweging en sedimenthuishouding elkaar onderling beïnvloeden, door veranderingen in de geometrie van het estuarium (rapport G-13).

De nadruk ligt in dit rapport op de gegevens over de bodemligging. De bodemligging is de bepalende factor voor voortplanting van het getij in het estuarium. In tweede instantie zal worden ingegaan op de sedimentbalans. In deze zin wijkt dit rapport enigszins af van de eerdere studies (Nederbragt en Liek,2004 en Haecon, 2006). Daarin wordt, in navolging van Jeuken e.a. (2002), de waargenomen ontwikkeling van het sedimentvolume (Vtotaal, in figuur 1.1) getoond in samenhang met de netto som van baggeren, storten en zandwinning (Vingrepen) en wordt het verschil gepresenteerd als de 'natuurlijke' ontwikkeling van het sedimentvolume (Vnatuurlijk). Een stijgende Vnatuurlijk betekent import en een dalende Vnatuurlijk betekent export. In figuur 1.1. is daarmee de relatie tussen sedimenthuishouding en zandbalans teruggebracht tot het verschil tussen bodemligging en zandwinning in de Westerschelde. Tussen de meting van de bodemligging, de sedimenthuishouding en import/export zitten een aantal stappen, waarin aannames en vereenvoudigingen worden gedaan. Op deze stappen wordt in dit rapport nader ingegaan.

Naast de relatie tussen bodemligging en waterbeweging is er nog een reden om nader in te gaan op de gegevens van de bodemligging: de twijfel aan de nauwkeurigheid. In figuur 1.1. (uit Haecon, 2006) is geïllustreerd dat er meer datapunten worden weergegeven dan beschikbaar zijn, voor de periodes voor 1986 (oost) en 1996 (west). Steile delen (piek 1958, periode 1967-1969) in deze grafiek lijken over een periode van twee jaar in de gehele Westerschelde op te treden, maar zijn in de oorspronkelijke gegevens

het gevolg van een verschil tussen twee metingen met een tussenliggende periode van twee jaar, van slechts de oostelijke helft.



Figuur 1.1: Globale zandbalans van de Westerschelde (uit Haecon, 2006) met daarover de beschikbare bodemligginggegevens voor de oostelijke en westelijke helft.

In combinatie met de kennis over de nauwkeurigheid van de lodingen (Marijs en Paree, 2004; Lekkerkerk e.a., 2007) is er sprake van gerede twijfel rond de eerder gerapporteerde ontwikkelingen van het sedimentvolume van de Westerschelde.

1.2 AANPAK EN LEESWIJZER

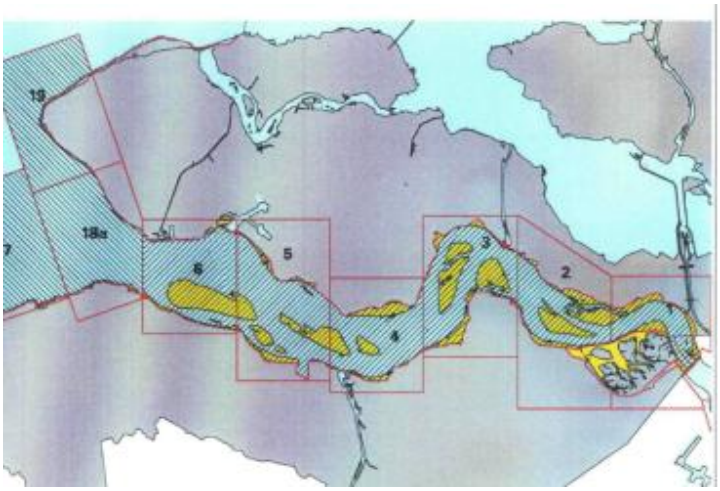
In hoofdstuk 2 worden de beschouwde bodemligginggegevens beschreven en wordt beknopt aangegeven hoe is omgegaan met ontbrekende delen. Ook wordt beschreven welke gegevens van het land van Saeftinghe beschikbaar zijn. Hoofdstuk 3 gaat in op het meten van de hoogte en diepte in de Westerschelde en de resulterende nauwkeurigheid van de bodemligginggegevens. Daarbij wordt op basis van de gegevens zelf aannemelijk gemaakt dat er verschillen in de nauwkeurigheid zijn. Hoofdstuk 4 gaat nader in op de gemeten ontwikkeling van de bodem van de Westerschelde, waarbij een onderscheid wordt gemaakt in plausibele variaties en ontwikkelingen en variaties die voortkomen uit onvolkomenheden in de gegevens. De wijze waarop de metingen over de jaren worden gecombineerd is onderwerp van hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 worden de trends voor de ontwikkeling van de sedimentvolume van de oostelijke en de westelijke helft van de Westerschelde gepresenteerd. Verder wordt een aanname gepresenteerd voor de sedimentatie in het Land van Saeftinghe en worden de jaar op jaar gegevens gepresenteerd voor het baggeren, storten en zandwinnen. Ook de beschikbare getallen voor de transporten over de randen naar de Zeeschelde en de monding komen hier ter sprake. In hoofdstuk 7 worden de getallen uit het voorgaande hoofdstuk gebruikt in een sedimentbalans met één compartiment. De uitkomsten hiervan zijn de transporten van de monding naar de Westerschelde. In hoofdstuk 8 wordt een sedimentbalans met twee compartimenten opgesteld, waarbij ook het transport van sediment van het westen naar het oosten wordt berekend. Ten slotte worden in hoofdstuk 9 de uitkomsten samengevat, voor drie perioden.

2 Bodemligginggegevens

2.1 GRIDS

Voor het bepalen van de sedimentbalansen worden gebruik gemaakt van rasterbestanden (20m x 20m) van de bodemligging. Deze gebiedsdekkende rasters worden samengesteld op basis van dieptegegevens, die (a) zijn verzameld in meetraaien (de 'natte delen' en voor de introductie van LIDAR[1], ook de droogvallende platen), dan wel (b) gebiedsdekkend zijn opgenomen (droogvallende platen sinds de introductie van LIDAR). De naam 'lodingen' die wordt gebruikt om deze metingen ('vaklodingen', 'beheerslodingen') aan te duiden is gekoppeld aan de oorspronkelijke meetmethode, waarbij met een lood aan een touw werd vastgesteld waar de bodem lag.

In deze studie is gebruikgemaakt van de aangevulde grids (GA grid) van de Westerschelde, zoals die door Rijkswaterstaat Zeeland zijn aangeleverd. Rijkswaterstaat werkt met vakken, die zijn weergegeven in figuur 2.1. In de voorliggende studie wordt gesproken over:
Oost, dat zijn de gecombineerde vakken 1, 2 en 3;
West, dat zijn de gecombineerde vakken 4,5 en 6.



Figuur 2.1: De vakindeling voor de Westerschelde (de Jong, 2000).

De beschikbaarheid van de gegevens per jaar en de dekking per jaar van de verschillende vakken is aangegeven in tabel 2.1. Er wordt gesproken van aangevulde grids, omdat voor deze grids de ontbrekende

[1] LIght Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging: Meting van de afstand tussen vliegtuig of helikopter en het grondoppervlak, waarmee in combinatie met de plaatsbepaling van het vliegtuig de hoogte van het grondoppervlak kan worden gemeten. Alleen toepasbaar op drooggevallen delen, omdat anders het wateroppervlakte wordt ingemeten.

delen, bijvoorbeeld van de Hooge platen en het Land van Saeftinghe, zijn aangevuld met gegevens van voorgaande jaren.

		1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Oost	1	x		x		x		x		x		x		x		x		x		x	O	x		x		x	x		x
	2	x		x		x		x		x		x		x		x		x		x	x	x		x		x	x		x
	3	x		x		x		x		O		x		O		x		x		x	x	x		x		x	x		O
West	4	x			x		x		x		x		x		x		x		x		x		x		O		x		x
	5	x			x		x		x		x		x		x		x		x		x		x		x		x		x
	6	x			x		x		x		x		x		x		x		x		x		x		x		x		x

		1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Oost	1		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	2		x	O	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	3		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Oost	4		O		x		x		x		x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	5		O				O		x		x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	6		x				x		x		x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabel 2.1: Beschikbare gegevens (X) van de Westerschelde (vak 1 t/m 6 zoals aangegeven in figuur 2.1). Met O zijn ontbrekende, of deels ontbrekende vakken aangegeven, die gezien de systematiek in de inwinning wel verwacht worden.

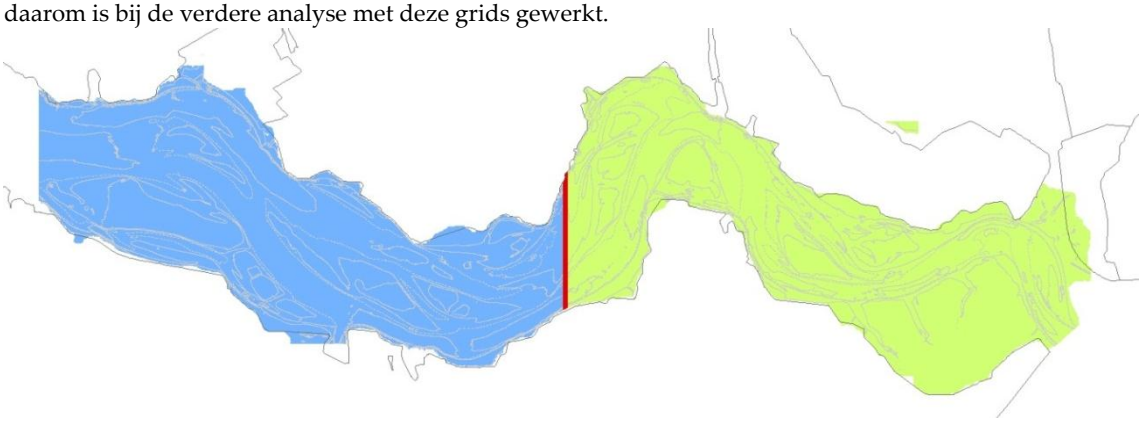
2.2 ONTBREKENDE DELEN

Hoewel de GA grids aangevuld zijn, blijken er toch nog “gaten” in te zitten. Dit zijn, gebieden waarvoor geen hoogtegegevens beschikbaar zijn. Vrijwel altijd zijn dit delen van de droogvallende platen. Verder zijn er kaartbladen die ontbreken (de O in tabel 2.1). Dit is niet zozeer omdat de gegevens er niet zijn, maar omdat van deze gebieden bekend is dat de gegevens minder betrouwbaar zijn (Marijs en Parée, 2004). Voor de analyse van de sedimentvolumes is het belangrijk dat de gebieden in alle kaarten even groot zijn, zodat naar daadwerkelijke morfologische veranderingen wordt gekeken. Daarom zijn de ontbrekende delen van de kaarten aangevuld, met D-grids (niet-aangevulde grids) en / of met oudere kaartbladen. In het onderstaande overzicht is aangegeven voor welke jaren welke aanvulling is uitgevoerd:

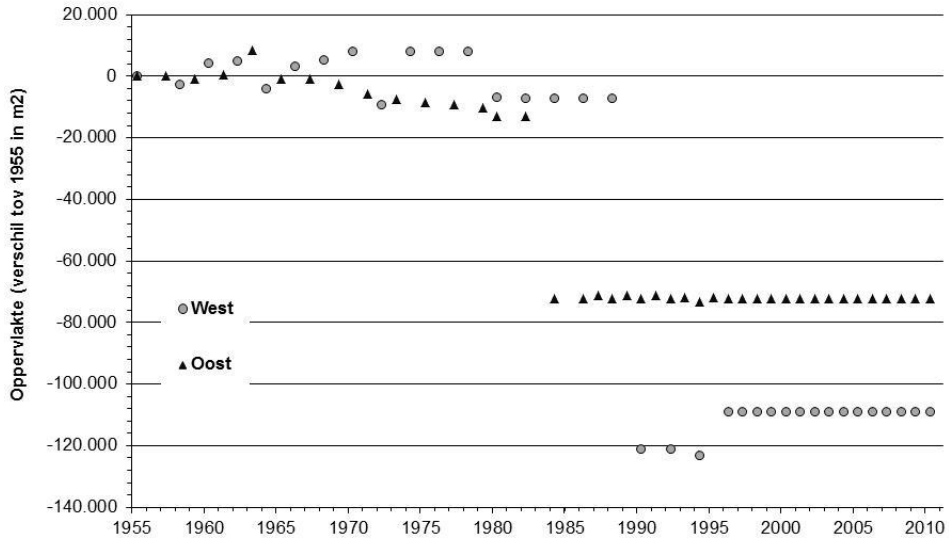
GA1963: aangevuld met D1963 en daarna opgevuld met GA1961;
GA1967: aangevuld met D1965 en daarna opgevuld met GA1965;
GA1974: alleen de westelijke helft is gebruikt;
GA1978: aangevuld met D1978 en daarna opgevuld met GA1976;
GA1982: aangevuld met D1982 en daarna opgevuld met GA1980;
D1984: aangevuld met GA 1982;
D1986: aangevuld met GA1982;
GA1985: aangevuld met GA1984;
D1986: aangevuld met GA1984;
GA1988: aangevuld met D1988, opgevuld met GA1982;

De grids zijn opgedeeld in een westelijke en oostelijke helft, waarbij voor de westelijke helft grid GA1976 als basis is gebruikt en voor de oostelijke helft grid GA1957. Deze jaren zijn gekozen vanwege de compleetheid van de roosters. In de onderstaande figuur 2.2 zijn beide grids weergegeven. Op deze manier ontstaan oost- en west-grids, die elkaar overlappen. In de onderstaande figuur is dat het rode gebied, dat een oppervlakte heeft van 134 ha.

Zelfs na het aanvullen van de aangevulde grids blijken de oppervlaktes van de grids niet volledig overeen te komen. In de grafiek in figuur 2.3 is het verschil aangegeven in oppervlakte ten opzichte van 1955. De west grids blijken maximaal 12 ha groter dan in 1955 en de oost grids ruim 7 ha. Deze verschillen blijken te herleiden tot aanvullingsverschillen in de hoge delen van de grids, oftewel de dijken. Voor de analyse van de ontwikkeling van het sedimentvolume is gebleken dat deze verschillen verwaarloosbaar klein zijn en daarom is bij de verdere analyse met deze grids gewerkt.



Figuur 2.2: Kaart met oostelijke helft (lichtgroen) en westelijke helft (blauw) van de Westerschelde, zoals gebruikt in deze studie, met de overlap (in rood).

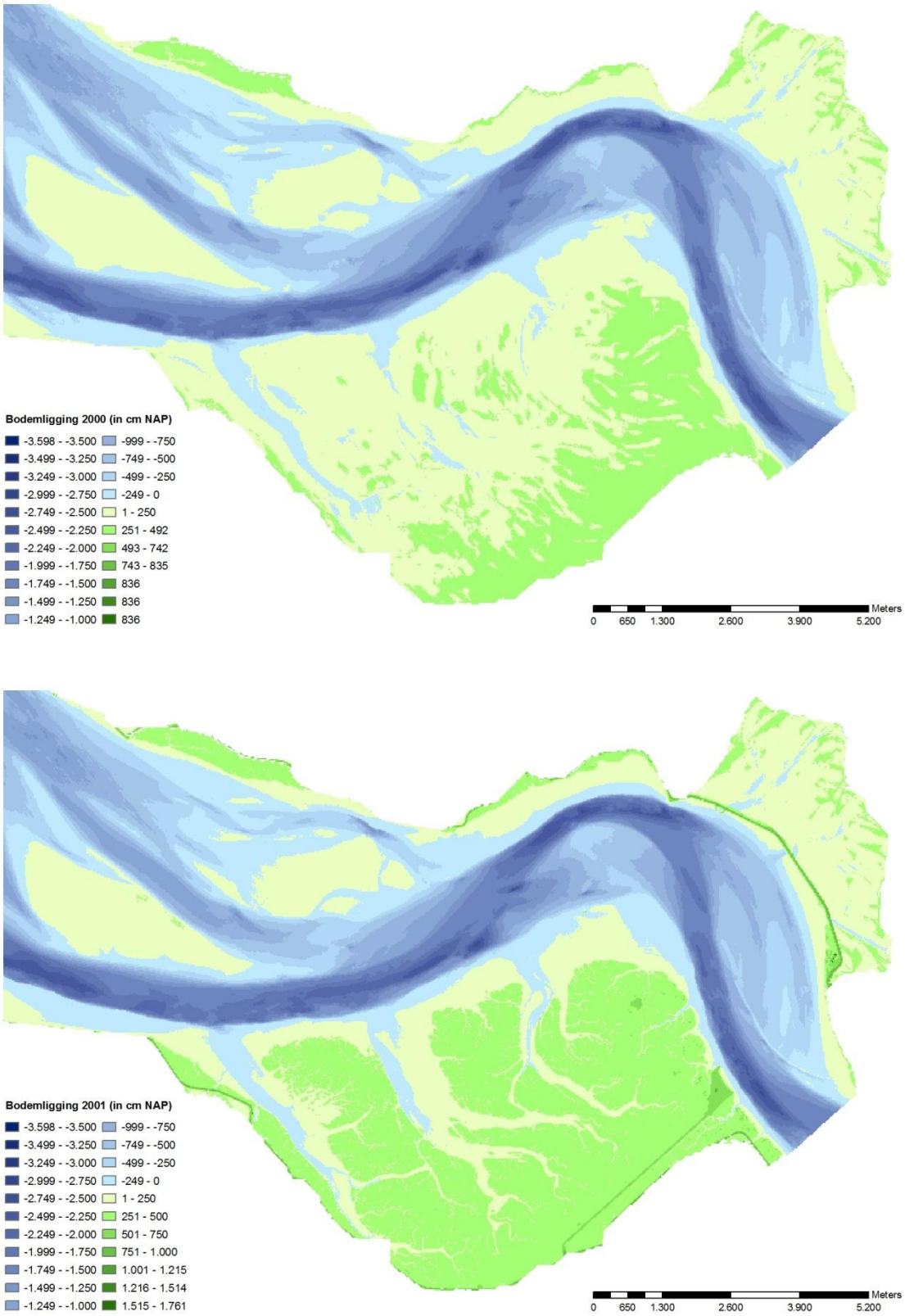


Figuur 2.3: Grafiek met het verschil in oppervlakte tussen de aangevulde GA-grids t.o.v.de grids van 1955.

2.3 LAND VAN SEAFTHINGE

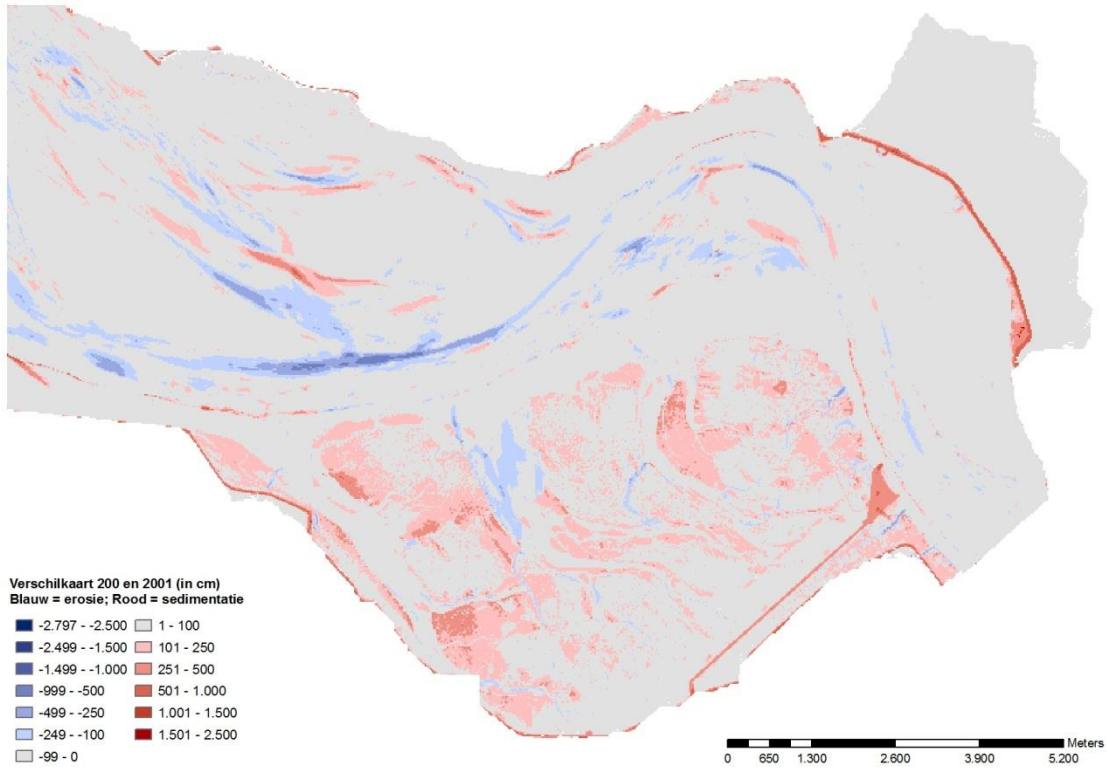
In de complete GA-grids zitten ook het Land van Saeftinghe en de voormalige schorren bij de Ossendrecht. In de bodems van het Land van Saeftinghe zit een grote verandering na het jaar 2000. Tot 2000 is in alle grids dezelfde bodem opgenomen voor dit gebied, die in de bovenste kaart in figuur 2.4 is

weergegeven. Na 2001 zijn voor ieder jaar meetgegevens van het land van Saeftinghe opgenomen in de GA grids. Ter illustratie is een van deze bodems, van 2001 als onderste kaart in figuur 2.4 weergegeven.



Figuur 2.4: Bodemligging van het Land van Saeftinghe en de voormalige schorren bij de Ossendrecht, voor het jaar 2000 (boven) en het jaar 2001 (onder).

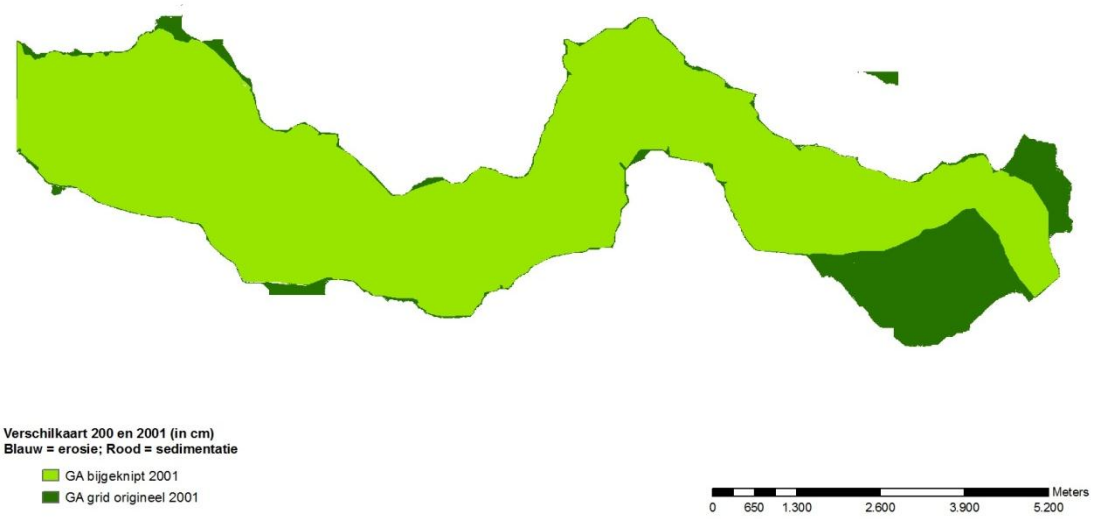
In figuur 2.5 is een verschilbodem gegeven van de bodems van 2000 en 2001. Vooral uit de verschilbodem blijkt dat er niet alleen grote verschillen zijn in het Land van Saeftinghe, maar ook in de aanwezigheid van dijken en dammen langs de randen van de Westerschelde (dit geldt overigens ook voor de rest van de Westerschelde, die niet in de kaarten is weergegeven).



Figuur 2.5: Verschilkaart van bodemligging in 2000 en 2001van het Land van Saeftinghe en de voormalige schorren bij de Ossendrecht.

Het gebruik van de complete grids, inclusief het Land van Saeftinghe en de dijken blijkt een grote en onverwachte sprong op te leveren van 2000 naar 2001. De netto sedimentatie in het Land van Saeftinghe, die geleidelijk heeft plaatsgevonden in de periode 1955 tot 2001 wordt dan aan één jaar toegerekend. Dit levert een fikse sprong, van 40 x 10^6 m^3 in de sedimentontwikkeling terwijl in werkelijkheid deze sedimentatie geleidelijk heeft plaatsgevonden. Ook na 2001 blijkt het gebruik van de grids met het land van Saeftinghe nog variaties op te leveren in het sedimentvolume van bijna 10 x 10^6 m^3 sediment.

Vanwege het optreden van de sprong wordt de ontwikkeling van het sedimentvolume van het Land van Saeftinghe afzonderlijk beschouwd. Voor het bepalen van het sedimentvolume van de Westerschelde wordt gebruik gemaakt van uitgeknipte grids, waaruit het Land van Saeftinghe en een aantal andere gebieden (dijken, schorren, havenmondingen en een stukje van de Oosterschelde dat in een van de kaartbladen ligt) is verwijderd. In de kaart in figuur 2.6 is een oorspronkelijke GA-grid en een bijgeknipt grid over elkaar weergegeven.



Figuur 2.6: Bijgeknipte grids (lichtgroen) en de delen die bij oorspronkelijke grids horen (donkergroen).

3 Nauwkeurigheid

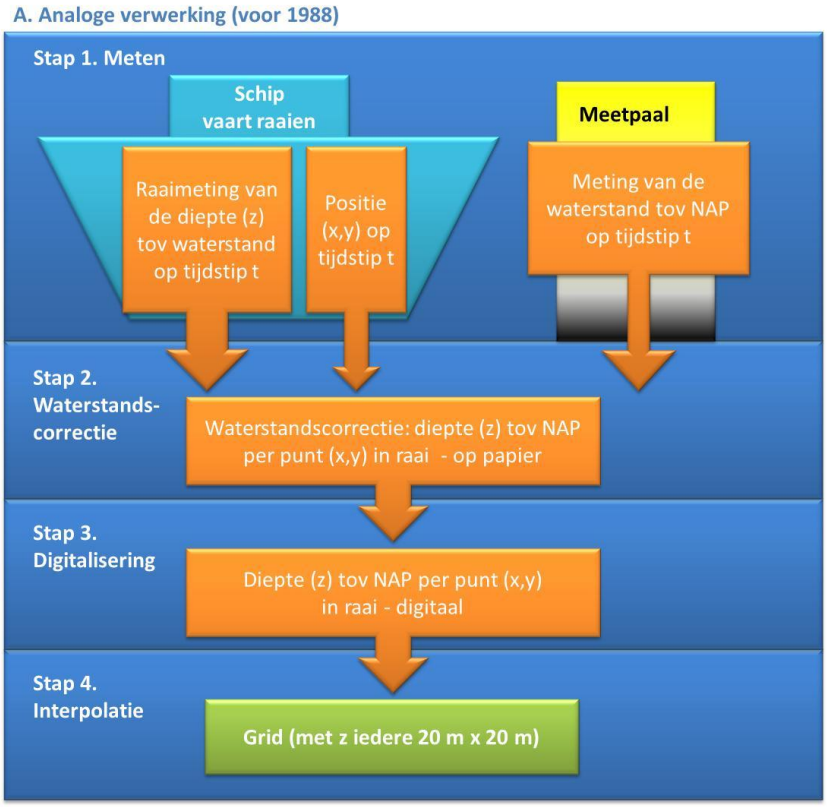
3.1 METEN EN VERWERKEN

Alle metingen, dus ook die van de bodemligging, hebben een zekere nauwkeurigheid. Het is van belang te weten wat deze nauwkeurigheid van de bodemligginggegevens betekent voor het gebruik ervan. In de loop van de tijd hebben zich technische ontwikkelingen voorgedaan in het uitvoeren van de echolodingen en de wijze waarop deze gegevens zin vertaald naar de gebiedsdekkende rasters. Deze veranderingen hebben hun weerslag gehad in de nauwkeurigheid van de gegevens. In de rapporten van Storm e.a. (1994), de Jong (2000), Marijs en Paree (2004) en Lekkerkerk e.a. (2007) worden overzichten gepresenteerd van deze technische ontwikkelingen en de effecten daarvan op de nauwkeurigheid. Deze rapporten zijn de ingang voor de terminologie die in dit hoofdstuk wordt gehanteerd.

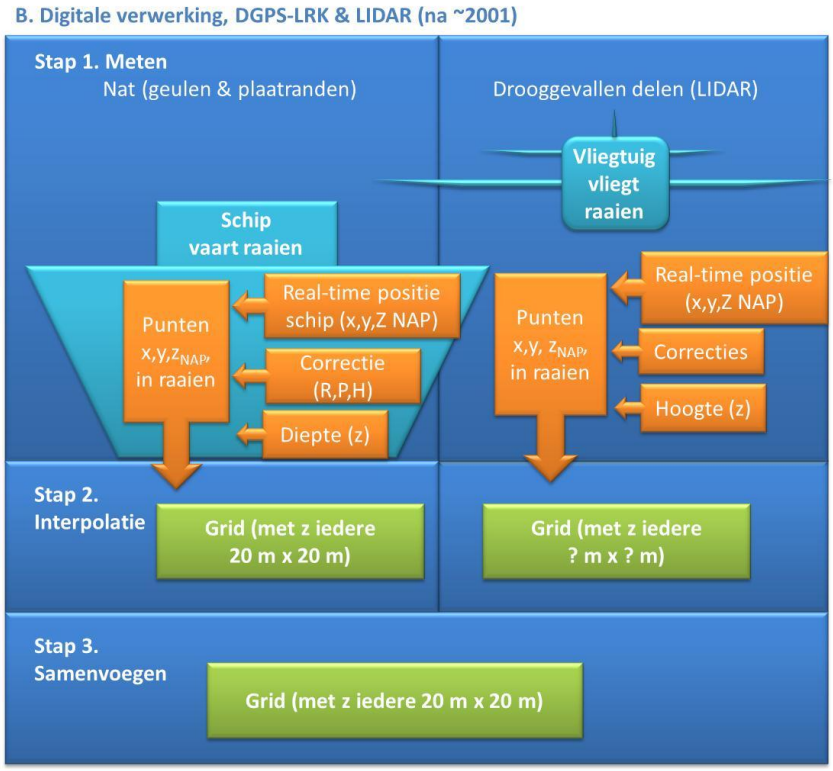
In de keten van de uitvoering van de meting tot aan de oplevering van gebiedsdekkende rasters kunnen op verschillende plekken onnauwkeurigheden ontstaan. In de figuren 3.1 en 3.2 zijn de ketens van meting tot gebiedsdekkend grid weergegeven, voor de periode vóór 1988 en de periode ná 2001. In de tussenliggende periode, van ongeveer 1988 tot 2001, heeft de waterstandcorrectie digitaal plaatsgevonden. Daarmee waren de bodemligginggegevens in de raaien digitaal beschikbaar voor interpolatie tot het grid, zodat, ten opzichte van figuur 3.1, stap 3 uit de flowchart wegviel.

Hieronder wordt een aantal van de stappen in het meet- en verwerkingsproces toegelicht. De processen zijn opgenomen in figuur 3.1 en 3.2. Bij het bepalen van de nauwkeurigheid is het belangrijk om onderscheid te maken in toevallige fouten en systematische fouten. Toevallige of stochastische fouten betreffen de variatie die optreedt rond metingen, dit wordt wel uitgedrukt in de +/- achter de gemeten waarde. Door het gebruik van veel meetgegevens, zowel in de ruimte als in de tijd middelen de toevallige fouten uit (zie o.a. Marijs en Paree (2004), Lekkerkerk e.a. (2007)). Daarom krijgen de toevallige fouten hier verder geen aandacht.

Systematische fouten gaan kant één op, en dat betekent dat ze leiden tot systematische verdiepingen of verondiepingen. De overgang van waterstandcorrectie naar DGPS-LRK (een van de verschillen tussen de flowchart in de figuren 3.1 en 3.2) is een voorbeeld van een gedocumenteerde overgang in de methode, die heeft geleid tot een systematische verandering (Lekkerkerk e.a., 2007). Het is goed denkbaar dat ook andere overgangen in de methoden (andere lodingsapparaten, andere meetfrequenties, het wel- of niet uitvoeren van kalibraties of correcties, het gebruik van nieuwe sets van reductiekaarten bij de waterstandscorrectie, enz.) systematische fouten (schijnbare veranderingen) hebben geïntroduceerd. Omdat met systematische fouten structurele verdiepingen en verondiepingen kunnen worden geïntroduceerd, zijn deze in potentie belangrijk voor het bepalen van sedimenthuishouding.



Figuur 3.1: Flowchart van de inwinning en verwerking van de meetgegevens van positie, waterdiepte en waterstand (t.o.v. NAP) en de verwerking tot digitaal grid van de bodemligging, zoals die plaatsvond tot 1988.



Figuur 3.2: Flowchart van de inwinning en verwerking van de meetgegevens van positie en waterdiepte (t.o.v. NAP) in de geulen en op de platen en de verwerking tot digitaal grid van de bodemligging, zoals die plaatsvond na 2001

Metingen van hoogte, diepte en de referentiehoogte (z).
Bij het meten van de diepte/hoogte ten opzichte van NAP zijn er verschillende foutenbronnen (Marijs en Parée, 2004, Lekkerkerk e.a., 2007). Naast de nauwkeurigheid van het echolood (o.a. samenhangend met de gebruikte frequentie in relatie tot de samenstelling van de bodem en de breedte in van de bundel in relatie tot de helling en de aanwezigheid van bodemvormen), dan wel de LIDAR, kunnen fouten worden geïntroduceerd door verschillende correcties (roll, pitch, heave, koers, waterstandscorrectie) of het ontbreken daarvan (squat, diepgang). Een aantal foutenbronnen is mede afhankelijk van de lokale diepte (door snelheid van het schip), soms in combinatie met de lokale helling (bundelhoek). De nauwkeurigheid waarmee de hoogte/diepte wordt gemeten is door technische ontwikkelingen toegenomen in de periode 1955 tot heden, van orde decimeters tot centimeters (Marijs en Parée, 2004). Dit betreft de toevallige fout rond de dieptemeting.
Overgangen in de methoden hebben geleid tot structurele verschillen tussen metingen. De al eerder genoemde overgang van waterstandgecorrigeerde metingen naar DGPS-LRK leidde bijvoorbeeld tot een structurele 'verdieping' van gemiddeld 10 cm. In de Westerschelde heeft deze schijnbare verdieping in 2002 plaatsgevonden. Niet alle overgangen in de methoden, systemen en hun effecten zijn gedocumenteerd. Daarom kan niet op voorhand worden uitgesloten dat er daardoor ook systematische fouten zijn geïntroduceerd.

Bepaling van de positie (x,y).
Juist op plaatsen waar ver korte afstanden grote diepteverschillen optreden, zoals bij geulwanden, kan een afwijking in de plaatsbepaling een schijnbaar groot verschil in de gemeten waterdiepte opleveren. De fouten die kunnen optreden in de plaatsbepaling zijn eigen aan de gebruikte methode, en de methode is in de loop van de tijd meerdere malen veranderd.

Waarschijnlijk hebben afwijkingen in de plaatsbepaling geen effect op de bepaling van het watervolume, daarvoor maakt het maakt het niet uit of de beide geulwanden enkele meters zijn verschoven. Daarom is de netto sedimentatie of erosie, die wordt bepaald met het verschil in het watervolume tussen opeenvolgende metingen, de nauwkeurigheid van de positie niet van belang. Voor bepalingen van de *bruto erosie en sedimentatie* levert een schijnbare verandering in de ligging van de geul, die het gevolg is van afwijkingen in de plaatsbepaling wel een verschil op.

Interpolatie van de gegevens.
De dieptemetingen worden in raaien uitgevoerd. De tussengelegen gebieden, waarvan geen meetwaarden beschikbaar zijn worden opgevuld door interpolatie. Tegenwoordig worden hiervoor wiskundige routines gebruikt, die zijn ingebouwd in de verwerkingssoftware. De routines kunnen met verschillende parameterinstellingen worden gebruikt, zodat de gebiedsdekkende rasters daardoor zouden kunnen verschillen.

Nauwkeurigheid
Het overzicht van de variabele systematische fouten dat is gepresenteerd door Marijs en Parée (2004, in hun tabel 3.1) geeft een duidelijk beeld van de gereconstrueerde systematische fouten per deelgebied, met inbegrip van de observaties van andere onderzoekers. Hierbij is slechts in een beperkt aantal gevallen getraceerd waardoor de systematische fout is geïntroduceerd.

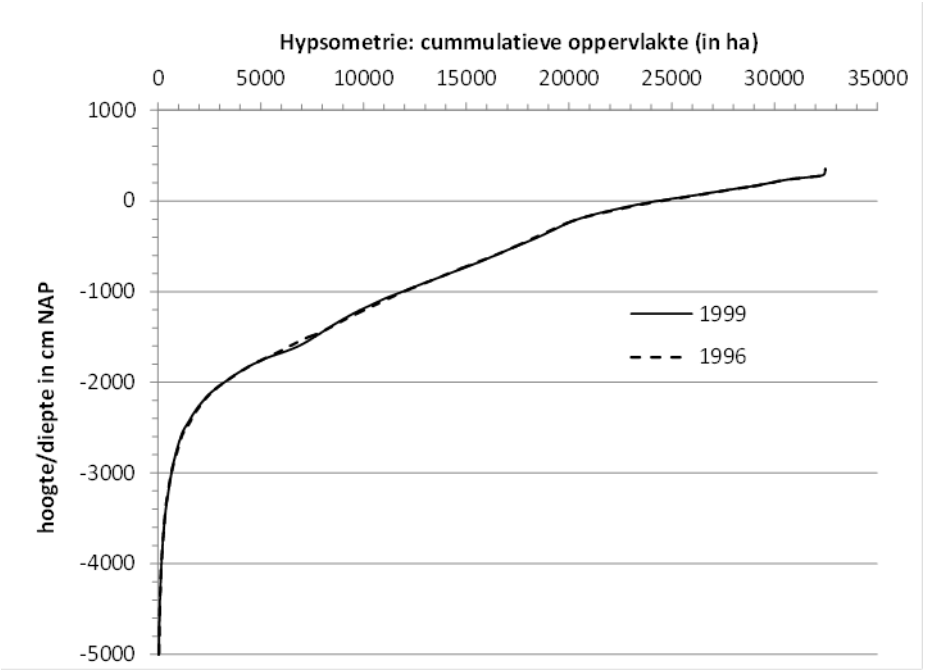
Het is niet mogelijk om op voorhand een (statistisch juiste) schatting te presenteren van de nauwkeurigheid van de gegevens en de bijdrage ervan aan de sedimentvolumes, omdat:
- Er sprake is van een complexe 'optelsom' van fouten uit verschillende bronnen;
- De bijdrage van 'menselijke fouten' varieert.

Daarom wordt in de volgende paragrafen en hoofdstukken op een andere manier naar de gegevens gekeken, om vast te stellen of daaruit kan worden afgeleid welke systematische en toevallige onnauwkeurigheden onderdeel zijn van de gegevens.

3.2 HISTOGRAMMEN VAN DE BODEMLIGGINGGEGEVENS

De hypsometrie

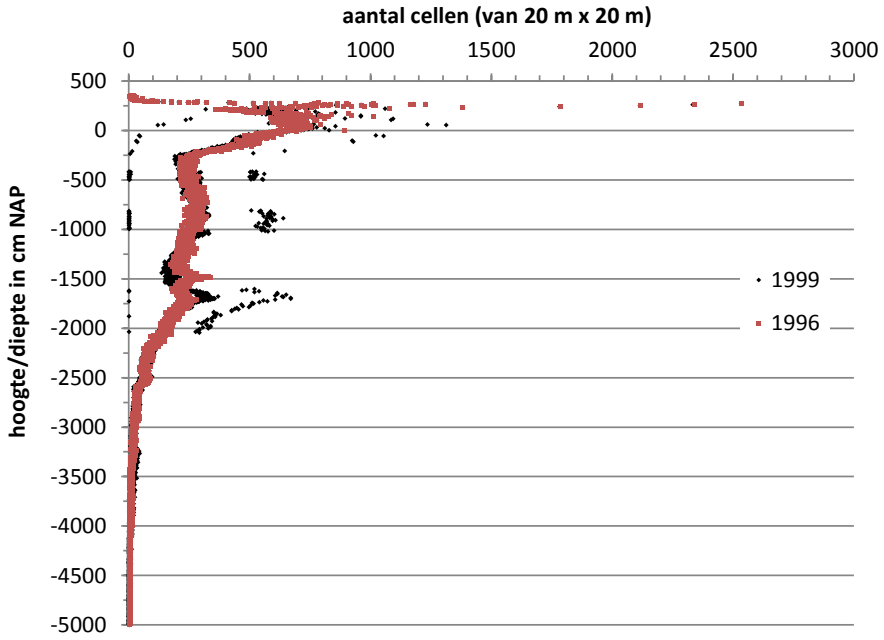
Histogrammen van de bodemliggingggegevens zijn grafieken die bruikbaar zijn om de kwaliteit van de gegevens te verifiëren. Voordat een aantal kenmerkende histogrammen worden besproken wordt eerst een uitleg over een bekende methode om bodemliggingggegevens gegeven: de hypsometrische curve. In figuur 3.3 zijn twee hypsometrische curves opgenomen van de Westerschelde van 1996 en 1999. In een hypsometrische curve wordt de cumulatieve oppervlakte per diepteklasse weergegeven tegenover de diepteklasse. In deze curve is dan in een oogopslag zichtbaar hoeveel diep en ondiep water er in een bekken, in dit geval de Westerschelde, aanwezig is. Door de cumulatieve wijze van weergeven ziet een hypsometrische curve er eigenlijk altijd 'goed' uit, dat wil zeggen dat eventuele problemen of eigenaardigheden in de gegevens worden uitgevlakt. Er zijn ook daarom geen uitgesproken verschillen zichtbaar tussen de curves in figuur 3.3. Hypsometrische curves zijn daarom wel bruikbaar om inzicht te krijgen in de morfologische kenmerken, maar zijn nìet bruikbaar voor een analyse van de meetgegevens.



Figuur 3.3: Hypsometrische curves van de Westerschelde uit 1996 en 1999.

Wat is een histogram van de bodemliggingggegevens?

De gegevens die aan de hypsometrische curve ten grondslag liggen zijn de oppervlaktes per hoogte. Door de gegevens niet-cumulatief weer te geven ontstaat er een heel ander beeld, zoals duidelijk is in figuur 3.4. In deze grafiek zijn dezelfde gegevens weergegeven als in de hypsometrische curves, maar nu niet cumulatief. En in plaats van het oppervlakte in hectaren is het aantal gridcellen (van 20 m x 20 m) weergeven. Het resultaat is een veel minder gladde grafiek, met een dikke curve en ten opzichte daarvan uitbijters in positieve en negatieve richting. Hieruit blijkt dat er wel degelijk verschillen zijn tussen de gegevens van 1996 en 1999. In de curve van 1999 zijn de uitbijters veel meer uitgesproken dan in de grafiek van 1996.



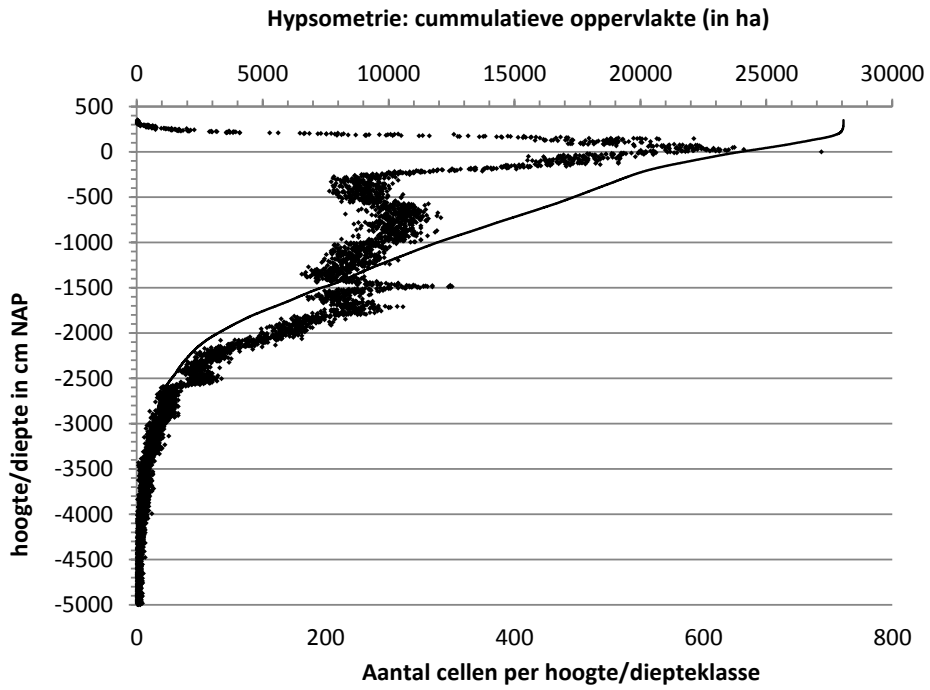
Figuur 3.4: Histogrammen van de bodemligginggegevens van de Westerschelde uit 1996 en 1999.

Voordat in meer detail wordt ingegaan op de uitbijters wordt eerst het histogram en de informatie die hieruit kan worden afgeleid besproken. Om dat te verduidelijken is een grafiek opgesteld met de hypsometrische curve en het histogram van de bodem van 1996 (figuur 3.5). De beschrijving gaat van diep, onderaan de y-as, naar ondiep, bovenaan de y-as. De delen dieper dan 25 m omvatten slechts een klein deel van het oppervlakte van de Westerschelde en er zijn dan ook slechts weinig rastercellen met die waarden. Tussen de 20 en 25 m is er een overgang in de hypsometrische curve, die samenvalt met een toename van het aantal gridcellen. Deze overgang heeft te maken met de overheersende diepteklassen in de geulen. De pieken in het aantal gridcellen rond 17,5 m en 15 m markeren de drempels, die door het baggeren rond deze diepte worden gehouden. Tussen de 15 m en de 3 m is er weinig opmerkelijks te zien aan het aantal gridcellen en de hypsometrische curve. Rond de 3 m is er sprake van een overgang in beide curves: de knik in de hypsometrische curve van steil naar flauw. Dit zijn de plaat- en slikgebieden in de Westerschelde In de histogrammen worden hier de grootste waarden aangetroffen, omdat er veel plaat- en slikareaal is, waarvan de hoogte in een beperkt aantal hoogteklassen valt. Per hoogteklasse zijn er dan veel punten.

De maatstaf: een nette curve

Het histogram van 1996 is een 'net' histogram, in die zin dat er geen vrijwel sprake is van punten die buiten de curve vallen. Alleen de waarde voor NAP 0 m is relatief hoog. Deze punten voor NAP 0 m zijn evenredig over de gehele Westerschelde verdeeld. Omdat geen fysische verklaring is voor een groter aandeel van NAP 0 m in de Westerschelde dan voor de aanliggende waarden, wijst op een probleem met de gegevens. Mogelijk heeft deze uitbijter te maken met een afrondingsprobleem, ergens in de keten van inwinnen tot verwerken. Afgezien van deze ene uitbijter is er eigenlijk niets op dit histogram aan te merken en daarom beschouwen het als een maatstaf voor de andere histogrammen.

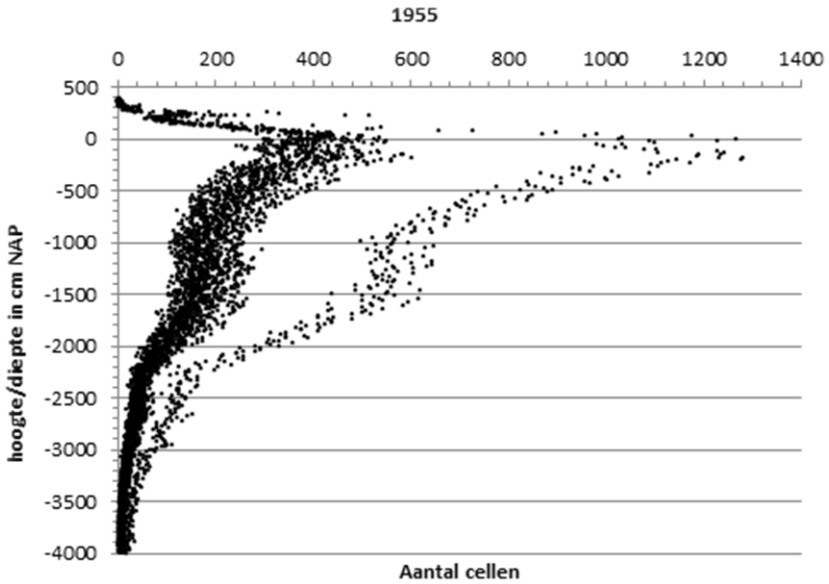
Histogrammen die afwijken van de maatstaf zijn er in verschillende vormen en daarvan worden er hieronder enkele getoond en beschreven.



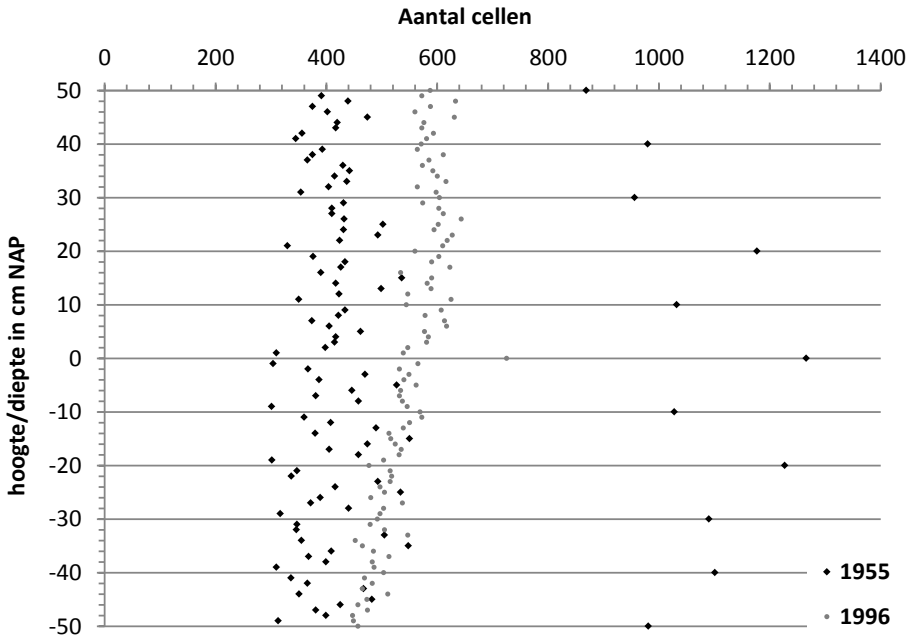
Figuur 3.5: Gecombineerd histogram van de bodemligginggegevens (punten, x-as onderaan) en hypsometrische curve (lijn, x-as bovenaan) van de Westerschelde uit 1996.

Dubbele lijn

In de grids van vóór 1989 van de Westerschelde is er sprake van twee banden met punten in het histogram, zoals zichtbaar is in figuur 3.6. Met een uitsnede van de grafiek in figuur 3.7, waarin ook de maatstaf van 1996 is opgenomen, wordt duidelijk wat de twee banden met punten betekenen. De punten in de linker band zijn relatief ondervertegenwoordigd en de punten in de rechter band zijn relatief oververtegenwoordigd. De oververtegenwoordigde punten blijken zonder uitzondering decimeterwaarden (50 cm, 40 cm, 30 cm, enz.) te hebben, terwijl de ondervertegenwoordigde waarden allemaal centimeter waarden hebben (49 cm, 48 cm, 47 cm, enz.).



Figuur 3.6: Histogram van de bodemligginggegevens van de Westerschelde uit 1955.

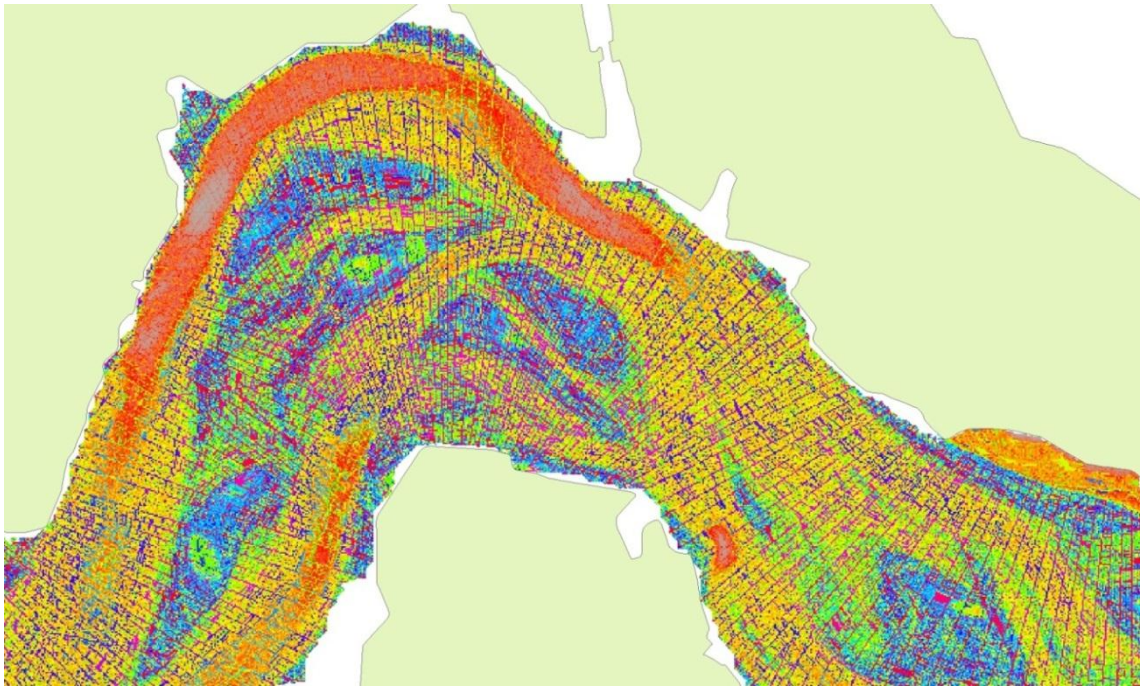


Figuur 3.7: Detail van de histogrammen van de bodemliggingsgegevens van de Westerschelde uit 1955 en 1996.

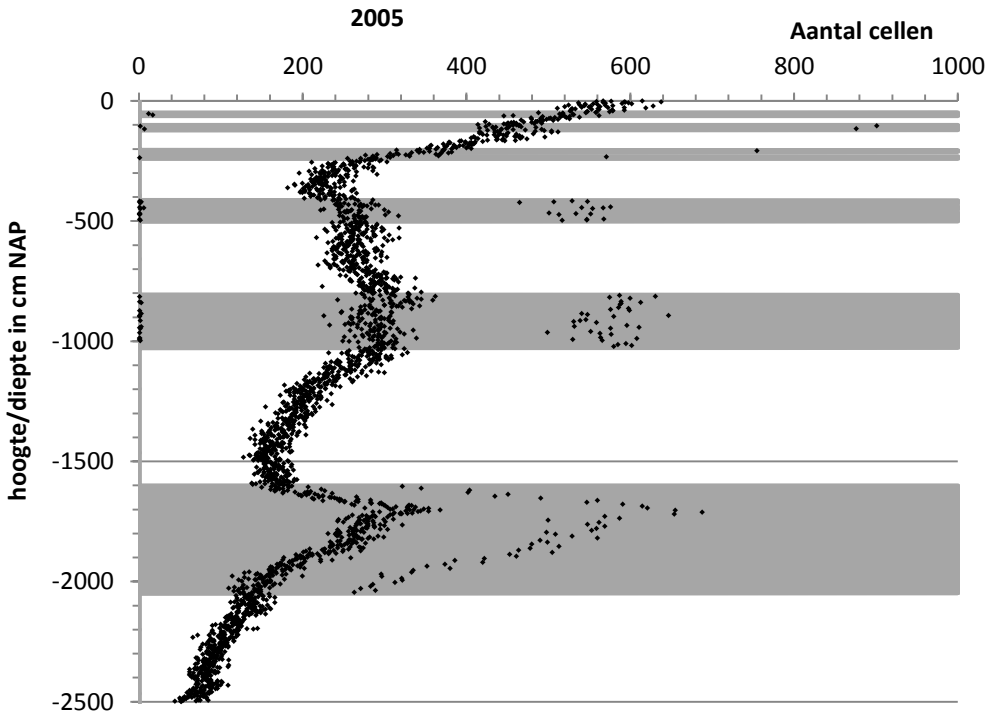
De verklaring voor de band met decimeter waarden en de band met centimeter waarden ligt in de oorsprong en verwerking van de gegevens. Deze oude digitale bodemliggingggegevens zijn namelijk gebaseerd op de papieren lodingskaarten, waarop de dieptewaarden van de meetraaien in de decimeterwaarden zijn opgegeven. Deze kaarten zijn gedigitaliseerd, waarbij de locatie van ieder punt met de bijbehorende decimeterwaarde in de computer is gezet. In eerste instantie was daarmee alleen voor de meetraaien de hoogte beschikbaar. De dieptewaarden voor de tussenliggende punten zijn verkregen door de digitale interpolatie. De geïnterpoleerde waarden zijn opgegeven in centimeters.
De oververtegenwoordigde decimeters zijn in een kaartbeeld gekoppeld aan de meetraaien, zoals zichtbaar is gemaakt in figuur 3.8. In deze kaart is niet de hoogte/diepte aangegeven, maar is per hoogte/diepteklasse aangegeven hoeveel meetpunten er zijn. De decimeterwaarden van de meetraaien hebben hierdoor een afwijkende kleur ten opzichte van de aangrenzende, geïnterpoleerde centimeterwaarden. De oorspronkelijke meetraaien zijn in dit kaartbeeld zeer duidelijk zichtbaar.
Een variant van de dubbele lijn is te vinden in het grid van 1957 (alleen de oostelijke helft van de Westerschelde) waarin sprake is van drie banden waarin de punten liggen (niet getoond). Bij het bekijken in detail, blijken de decimeter waarden om en om te verspringen. Voor deze verdeling is geen verklaring bekend.

Dubbele lijn en waarde nul in specifieke bereiken

In de grafiek in figuur 3.9 is zichtbaar dat het histogram van 2005 in een aantal diepte/hoogtebereiken zowel een band met hoge waarden heeft en in hetzelfde bereik ook waarden waarvan er geen punten zijn of slechts één punt is. Dit wijkt duidelijk af van de maatstaf van 1996 in figuur 3.5 wordt getoond. Alle opnamen vanaf 1999 tot en met 2005 vertonen deze over- en ondervertegenwoordiging. En in alle opnamen treden deze banden op in ruwweg hetzelfde dieptebereik. In de onderstaande grafiek in figuur 3.9 zijn deze bereiken gemarkeerd. Het betreft de dieptes van NAP -20,45 m tot -16,04 m, NAP -10,22 tot -8,12, NAP -5,00 m tot -4,17 m en enkele kortere bereiken rond de NAP -2,37 m. In kaartbeelden blijken deze dubbele banden door de gehele Westerschelde aanwezig te zijn. Zonder aanvullende gegevens, bijvoorbeeld van de meetgegevens van de raaien kan niet worden getraceerd waar deze banden vandaan komen.



Figuur 3.8: Kaart van een deel van de Westerschelde, waarin de bodemligginggegevens van 1955 zijn weergegeven. De kleur is een maat voor het aantal keer dat de waarde aanwezig is.

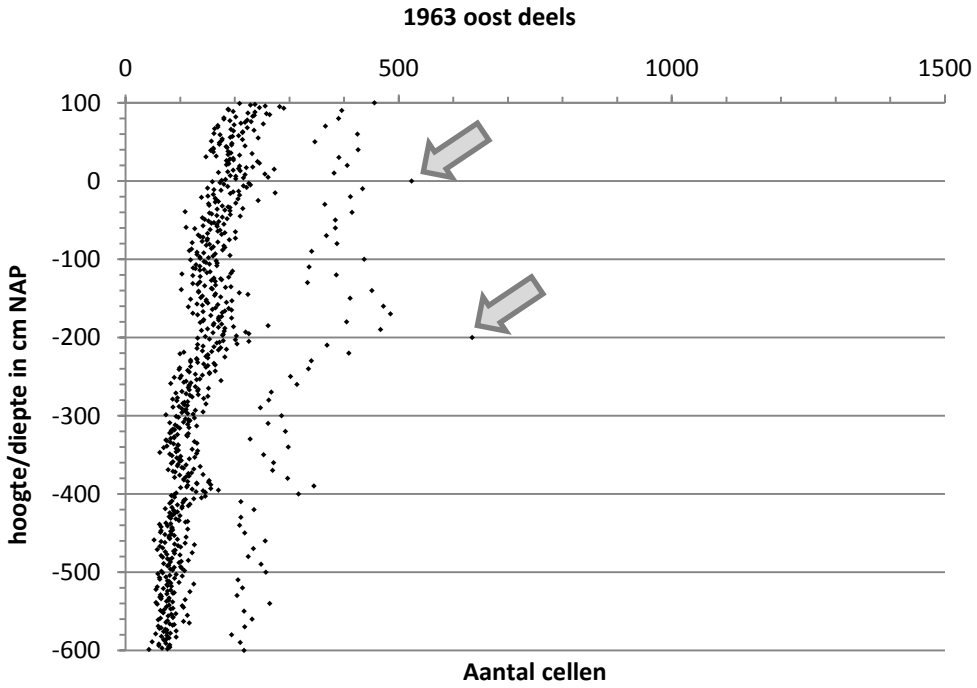


Figuur 3.9: Histogram van de bodemligginggegevens van de Westerschelde uit 2005.

Individuele uitbijters

In verschillende opnames is er sprake van éé n, twee of drie individuele waarden, die een veel hogere waarde hebben dan de aanliggende waarden. In figuur 3.10 is een voorbeeld gegeven met twee van dergelijke uitbijters, op de 0 cm en de -200 cm. In vrijwel alle gevallen zijn deze uitbijters te herleiden tot gebiedjes waar deze waarden oververtegenwoordigd zijn. Veel van de uitbijters hebben waarden in

meters. De herkomst ervan is niet duidelijk, het kan aan de oorspronkelijke meetmethode liggen of aan de verwerking van de metingen. De meeste van deze individuele uitbijters bevinden zich in het relatief ondiepe bereik van de Westerschelde, maar ze zijn er niet toe beperkt. Een beschrijving van de verschillende uitbijters wordt hier niet gepresenteerd, maar bij het verklaren van de waargenomen ontwikkelingen van de sedimentvolumes zal er aan worden gerefereerd.



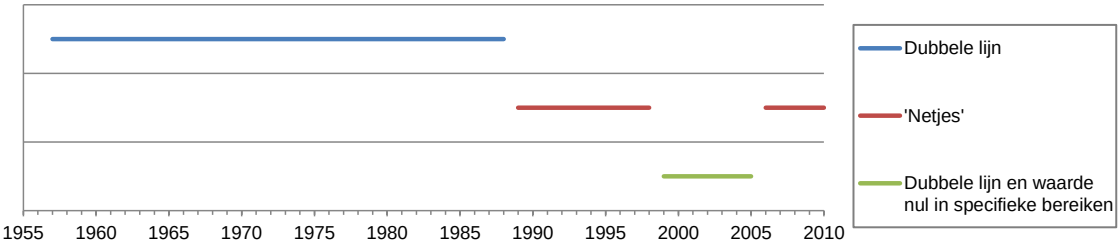
Figuur 3.10: : Detail van het histogram van de bodemligginggegevens van de Westerschelde uit 1963.

3.3 VIER PERIODES

Op basis van de histogrammen van de bodemligginggegevens is een vierdeling te maken in de bodemligginggegevens:

1. 1955 tot 1988- met dubbele lijn;
2. 1989 tot 1998 – enkele lijn;
3. 1999 tot 2005 – dubbele lijn en waarde nul in specifieke bereiken;
4. 2006 tot 2010 – enkele lijn.

In de onderstaande figuur 3.11 zijn deze verschillen schematisch weergegeven.



Figuur 3.11: Tijdbalk waarin de vier perioden met verschillen histogrammen van de meetgegevens zijn weergegeven.

De overgang van periode 1 naar 2 komt overeen met de overgang van verwerking ‘op papier’ naar digitale verwerking. Perioden 2, 3 en 4 komen niet overeen met gerapporteerde overgangen in de meetmethoden (Marijs & Parée, 2004).

4 Pieken en sprongen

4.1 VERSCHILLEN TUSSEN DE BODEMS VAN DE WESTERSCHELDE

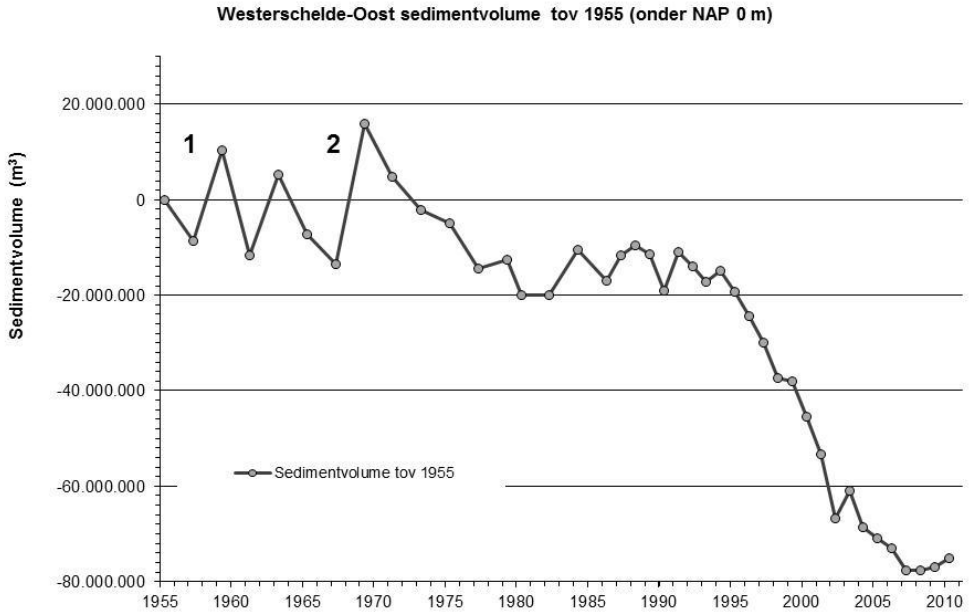
De histogrammen van de individuele bodemliggingsgegevens, uit voorgaand hoofdstuk, geven inzicht in structurele verschillen tussen de gegevens. Maar ze geven geen inzicht in het optreden van tijdelijke of structurele verdiepingen of verondiepingen, oftewel de verschillen tussen de (opeenvolgende) bodems. De verschillen tussen bodems bestaan uit:

- Daadwerkelijke morfologische veranderingen;
- Schijnbare veranderingen als gevolg van afwijkingen in de gegevens.

In het voorgaande hoofdstuk zijn verklaringen gepresenteerd voor het optreden van afwijkingen in de gegevens. In dit hoofdstuk wordt nader ingaan op de daadwerkelijke morfologische veranderingen. Hierbij zal nadrukkelijk aandacht worden besteedt aan plausibele morfologische variaties in de bodemligging. Dit zijn variaties die voortkomen uit de 'bodem'(sedimentsamenstelling, aanwezigheid fauna, pakking van het sediment, compactie en bodemdaling) en variaties die voortkomen uit het beheer (baggeren, storten, inclusief havens). Eerst een blik op de pieken en sprongen uit de titel van dit hoofdstuk.

De termen "pieken" en "sprongen" hebben betrekking op de grafieken van de ontwikkeling van de sedimentvolumes, die worden bepaald met de bodemligginggegevens. In figuur 4.1 is een dergelijke grafiek weergegeven, met in dit specifieke voorbeeld de oostelijke helft van Westerschelde, waarbij het sedimentvolume t.o.v. 1955 is weergegeven onder NAP 0m (berekend als het negatieve verschil van de watervolumes ten opzichte van de eerste opname van 1955). Een waarde boven nul betekent bij deze grafiek dat het sedimentvolume is toegenomen, terwijl een waarde onder nul betekent dat het sedimentvolume is afgenomen. In deze grafiek zijn alle jaren opgenomen waarvoor bodemligginggegevens beschikbaar zijn, er dus niet geïnterpoleerd tussen de verschillende opnamen. Er is sprake van pieken als waarden in een aantal opeenvolgende jaren eerst omhoog en dan weer omlaag gaan , of omgekeerd.

In de grafiek is bij het nummer 1 sprake van drie opeenvolgende sprongen in de periode van 1955 tot 1965. Van de opname van 1955 tot 1957 neemt het sedimentvolume af met bijna 10 x 10^6 m^3, om daarna toe te nemen met bijna 20 x 10^6 m^3 in de periode tot 1959, wederom te dalen met 20 x 10^6 m^3 en dan weer toe nemen met net minder dan 20 x 10^6 m^3, gevolgd door een daling met ruim 10 x 10^6 m^3 tot 1965. Pieken worden veroorzaakt door variaties in de bodemligging en door eenmalige afwijkingen in de gegevens. Of de grootte van de veranderingen verklaard kan worden door daadwerkelijke morfologische variaties zal hieronder nader worden verkend.



Figuur 4.1: Grafiek van de ontwikkeling van het sedimentvolume in de oostelijke helft van de Westerschelde (het negatieve verschil in het watervolume onder NAP 0 m t.o.v. 1955).

In dezelfde grafiek in figuur 4.1 is met 2 ook een grote sprong aangegeven die optreedt van 1967 naar 1969. Deze toename betreft ruim 25 x 10^6 m^3 en in tegenstelling tot de eerdere pieken wordt deze sprong niet gevolgd door een verandering in tegenovergestelde richting. Voor deze enorme toename van het sedimentvolume in een periode van twee jaar is geen morfologische verklaring. Een plausibele verklaring voor een dergelijke sprong is een structurele verandering in de meetmethode of in de verwerking van de gegevens. Een gedocumenteerd voorbeeld daarvan is de schijnbare afname van het sedimentvolume door de invoering van DGPS-LRK plaats- en hoogtebepaling. Voor de sprong van 1967 naar 1969 is vanuit het overzicht van de meetmethoden van Marijs en Parée (2004) geen wijziging in methoden bekend. Er zijn echter een aantal aspecten in de verwerking die niet zijn opgenomen in het overzicht. Zo is niet terug te vinden welke reductiekaarten (voor de waterstandscorrectie) zijn gebruikt, wat de locatie en het aantal van de gebruikte waterstandmeetstations was en op welke wijze de reductie van de waterstanden heeft plaatsgevonden (middelingen etc.). Mogelijk is een (niet-geregistreerde) overgang in de verwerking van de meetgegevens in de periode van 1967 naar 1969 een verklaring voor het optreden van de forse sprong.

4.2 PLAUSIBELE PIEKEN: DAADWERKELIJKE VARIATIES IN DE MORFOLOGIE

De verklaring voor het optreden van *sprongen* is hierboven genoemd, dat zijn de structurele veranderingen in de meet- en verwerkingsmethoden. Er zijn geen natuurlijke mechanismen in het Schelde-estuarium, die een verklaring bieden voor het optreden van de sprongen. Ook menselijke ingrepen waarbij in een kort tijdbestek (2 jaar) heel veel sediment wordt toegevoegd of onttrokken aan het estuarium geven geen afdoende verklaring voor het optreden van sprongen.

De verklaring voor het optreden van *pieken* in de metingen bestaat uit twee delen:

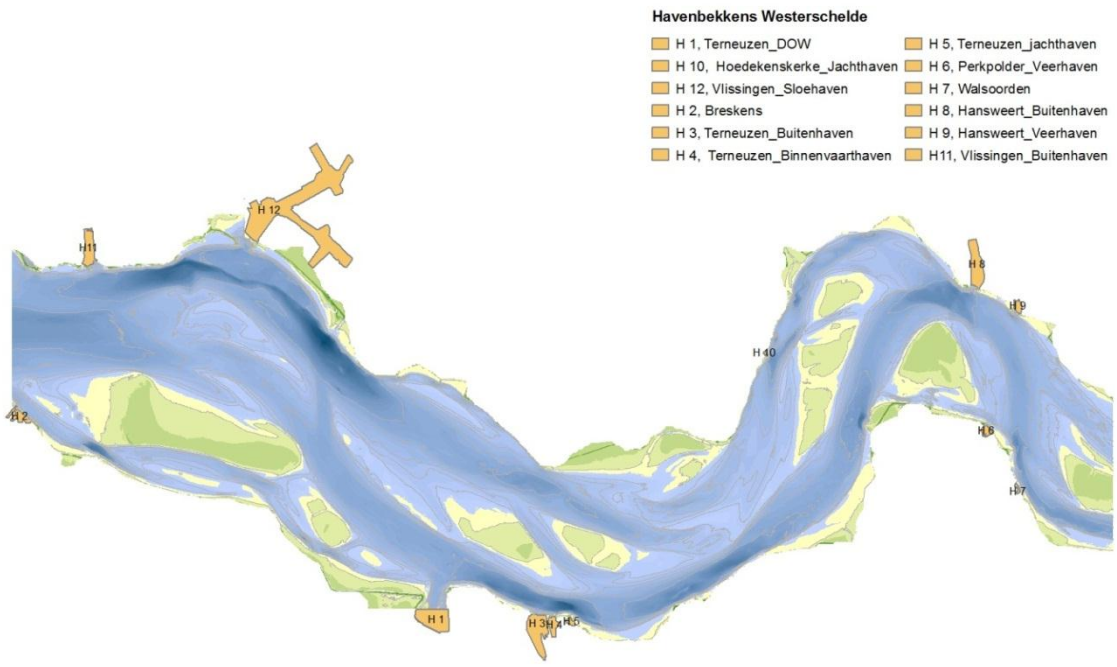
- Het optreden van daadwerkelijke variaties in het sedimentvolume, bijvoorbeeld doordat in de havenbekkens sediment wordt ingevangen;
- Het optreden van eenmalige afwijking van de lodingen, bijvoorbeeld afwijkingen in de waterstandmetingen of door menselijke fouten.

In deze paragraaf wordt gepoogd om de daadwerkelijke variatie in het sedimentvolume te kwantificeren. De kwantitatieve analyse levert een eerste schatting van de plausibele natuurlijke bandbreedte rond het sedimentvolume. De pieken die buiten deze bandbreedte liggen zijn hoogstwaarschijnlijk het gevolg van problemen met de gegevens.

Hieronder worden vier aspecten beschouwd die variatie kunnen opleveren in de gemeten sedimentvolumes, namelijk (i) de sedimentatie in havens in samenhang met het baggeren en storten van de havenbaggerspecie, (ii) de variaties die voortkomen uit de pakking van het sediment, (iii) de effecten van compactie en (iv) sedimentsamenstelling en de bodemdaling.

Havens

De havens rond de Westerschelde vormen sedimentatiebekkens waar slib en zand, afkomstig uit de Westerschelde worden afgezet. Omdat voor het gebruik van de havens een zekere diepte in de bekkens moet worden gehandhaafd, wordt er gebaggerd, waarbij de baggerspecie in de Westerschelde wordt gestort. Dit is wat de sedimentbalans betreft een gesloten systeem: het sediment dat in de havenbekkens wordt afgezet is afkomstig uit de Westerschelde en het wordt na het baggeren ook weer teruggestort in de Westerschelde. Toch kan er een effect optreden in de metingen, als de periode van baggeren uit fase is met de metingen. Als er bijvoorbeeld in de periode tussen twee metingen (die voor dit voorbeeld in de twee opeenvolgende jaren worden uitgevoerd in juni) niet wordt gebaggerd (omdat er in het eerste jaar is gebaggerd in mei en in het daaropvolgende jaar wordt gebaggerd in juli), dan is het gemeten sedimentvolume in het eerste jaar lager dan het volume in het tweede jaar. De afname van het sedimentvolume in de Westerschelde is hetzelfde als de sedimentatie die in dezelfde periode heeft plaatsgevonden.



Figuur 4.2: Havenbekkens langs de Westerschelde (oppervlakte in tabel 4.1).

Indicaties van de grootte van het hierboven beschreven effect bestaan uit de jaarlijkse baggervolumes in de havenbekkens langs de Westerschelde en uit globale schattingen van de sedimentatie in de havenbekkens. De jaarlijkse baggervolumes uit de grote havenbekkens bedragen in de orde van 1-2 x 10^6 m^3. (LTV V&T-rapport B-22). Een eerste schatting van de sedimentatie in de bekkens is gevonden door de totale oppervlakte van de havenbekkens, aangegeven in tabel 3.1 te vermenigvuldigen met een gemiddelde

sedimentatiesnelheid. Met een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 0,25 m/jaar bedraagt de totale sedimentatie per jaar dan 1,6 x 10^6 m^3.

Havenbekkens	Oppervlakte (ha)
Terneuzen DOW	66
Breskens	18
Terneuzen Buitenhaven	63
Terneuzen Binnenvaarthaven	14
Terneuzen jachthaven	5
Perkpolder Veerhaven	9
Walsoorden	3
Hansweert Buitenhaven	52
Hansweert Veerhaven	9
Hoedekenskerke Jachthaven	1
Vlissingen Buitenhaven	36
Vlissingen Sloehaven	361
Totaal	**635**

Tabel 4.1: Oppervlakte van de havenbekkens langs de Westerschelde.

Op basis van de getallen die volgen uit beide benaderingen is het plausibel om rekening te houden met een mogelijke variatie door de sedimentatie in de havenbekkens van 1 tot 2 x 10^6 m^3 per jaar. Het gaat hierbij dus altijd om een variatie, die kan leiden tot (bescheiden) pieken in het gemeten sedimentvolume. Trends kunnen ontstaan doordat bij de aanleg van havenuitbreidingen baggerspecie in de Westerschelde is gestort. Schattingen van de volumes die hier in het verleden mee gemoeid waren, zijn niet beschikbaar.

Pakking van het sediment

De metingen van de bodemligging hebben betrekking op de ligging van de bovenkant van het sedimentpakket en op basis daarvan wordt het sedimentvolume bepaald. Impliciet wordt er daarbij van uitgegaan dat pakking van het sediment, dat wil zeggen de wijze waarop de zandkorrels en slibdeeltjes op elkaar liggen, hetzelfde is. In het veld zijn echter op de platen gebieden aanwezig waar merkbaar variaties optreden in de pakking, bijvoorbeeld op de plaatsen waar zogenaamd blaasjeszand optreedt en op de plaatsen waar grote dichtheden aan slijkgarnalen aanwezig zijn (figuur 4.3).

Blaasjeszand of plofzand is zand waarin kleine luchtbelletjes zijn opgenomen tussen de zandkorrels, zoals zichtbaar is in de figuur 4.4. De wandelaar op platen (of op het strand, waar dit fenomeen ook optreedt) merkt de aanwezig van dit zand doordat de voeten er in weg zakken. Het proces waardoor blaasjeszand ontstaat is beschreven door de Boer e.a. (1979). Het invangen van lucht in het zand kan alleen plaatsvinden tijdens het droogvallen van de gebieden tijdens laagwater. Het areaal waar blaasjeszand kan ontstaan in de Westerschelde is beperkt tot de zandige delen van het areaal van de droogvallende platen en slikken. Op basis van waarnemingen aan luchtfoto's is vastgesteld dat blaasjeszand op maximaal 5% van het areaal droogvallende platen in de Westerschelde voorkomt (mededeling Edwin Parée, Rijkswaterstaat Zeeland). De hoeveelheid lucht in het zand varieert, zowel in de tijd als in de ruimte. De variatie heeft te maken met de mate van bedekking met water tijdens hoogwater en de eerdere bedekking die heeft plaatsgevonden (de Boer e.a., 1979)). Dat betekent dat er gedurende de doodtij-springtij cyclus verschillen optreden in de pakking en dat er afhankelijk van de mate van droogvallen (de hoogte van de plaat ten opzichte van het getij) verschil optreedt.

Figuur 4.3: Graafgangen van de slijkgarnaal (*Corophium volutator*) in het sediment (© Rijkswaterstaat/ Edwin Parée).

Figuur 4.4 Plofzand of blaasjeszand in het zand. De inzet toont de luchtbellen die verantwoordelijk zijn voor het effect.

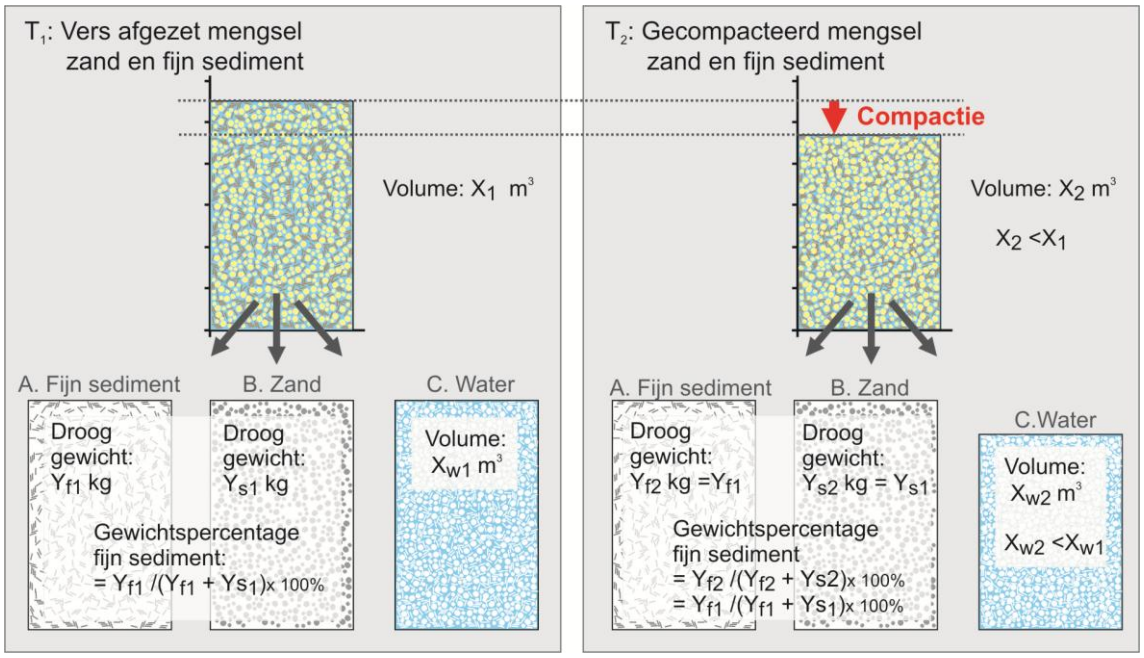
Om een indruk te geven van het (lucht)volume dat gemoeid kan zijn met het blaasjeszand is 5% van het areaal droogvallende platen vermenigvuldigd met een variatie van 5 cm. Het areaal bedraagt 2.250.000 m^2 en vermenigvuldigd met 5 cm levert dit een volume van 0,11 x 10^6 m^3. Dit is een eerste schatting van de

volumevariatie die kan optreden door blaasjeszand. Omdat de oppervlakte droogvallende platen waar slijkgarnaaltjes aanwezig zijn, groter is dan het areaal met blaasjeszand en het effect daarvan waarschijnlijk tenminste zo groot is als het effect van blaasjeszand (vergelijk figuren 4.3 en 4.4), is de schijnbare variatie in het sedimentvolume tenminste twee keer zo groot.

In de praktijk betekent de variatie in de pakking dat bij meetmethoden die het oppervlakte van de platen en slikken inmeten ('echosounding', LIDAR) de bodemhoogte van de platen en slikken niet één op één te vertalen is in sedimentvolume, omdat een deel van de platen en slikken bestaat uit lucht, in plaats van uit zand. Bij metingen waarbij over de platen wordt gelopen of gereden, is de lucht veelal uit het sediment gedrukt en is wel een op een vertaling van bodemhoogte naar sedimentvolume mogelijk. Een overgang van een meetmethode waarbij wordt gelopen of gereden, naar een methode die het oppervlakte meet (of omgekeerd) levert dus ook een schijnbaar verschil in de sedimentvolumes. Omdat niet bekend is welke methoden wanneer zijn ingezet en omdat de omvang van het schijnbare verschil niet bekend is, wordt dit niet gekwantificeerd.

Sedimentsamenstelling en compactie

Naast de aanwezigheid van lucht in het sediment, zoals die hierboven beschreven is, kan de graad van compactie, oftewel de pakking van het sediment verschillen. In figuur 4.5 is in beeld gebracht wat hiermee wordt bedoeld: de wijze waarop de korrels zijn gestapeld en de poriënruimte daartussen kan in de loop van de tijd veranderen. De mate waarin kan plaatsvinden is mede afhankelijk van de samenstelling van het sedimentmengsel en de condities waaronder het sediment is afgezet. Een kwantitatieve schatting van de bijdrage van compactie aan plausibele variaties in de morfologie is niet beschikbaar.



Figuur 4.5: Schematische weergave van compactie.

Een effect dat samenhangt met de pakking/stapeling van het sediment is dat de dichtheid van een mengsel zand en fijn sediment (niet lineair) samenhangt met het percentage fijn sediment in het mengsel. In de literatuur zijn verschillende formules voorhanden die deze relatie beschrijven, waarbij hier ter illustratie die van Mulder (1995) is weergegeven:

$$\rho_{dry} = 1550 - 17{,}5 \times p_{fijn} + 0{,}065 \times p_{fijn}^2$$

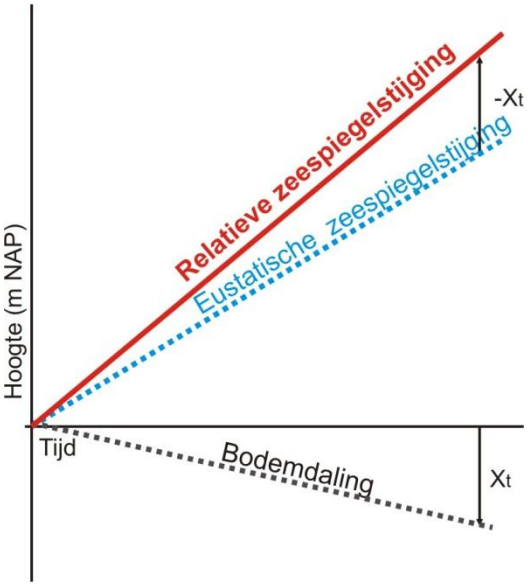
Een rekenvoorbeeld geeft weer wat de consequentie kan zijn van het mengen en ontmengen van sedimentmengsels op het sedimentvolume. In dit voorbeeld wordt 1 m^3 puur zand gemengd met 1m^3 puur fijn sediment. Samen is dat dus 2 m^3. Volgens de bovenstaande formule:
1 m^3 zand , met P_{fijn}= 0% heeft drooggewicht van 1550kg;
1 m^3 fijn sediment, met P_{fijn}=1000% heeft een drooggewicht van 450kg.
Het mengsel heeft een gewicht van 2000 kg en een gewichtspercentage met P_{fijn}= 22,5%. Invullen van dat percentage in de bovenstaande formule levert een droge dichtheid van het mengsel van 1181 kg/m^3. Delen van de 2000 kg door de dichtheid van 1181 kg/m^3 geeft een volume van 1,69 m^3 voor het mengsel

Los van elkaar is er dus sprake van een volume van 2m^3, terwijl gemengd sprake is van een volume van 1,69 m^3. De verklaring voor het verschil is dat het fijne sediment deels tussen de zandkorrels terechtkomt en daar poriënruimte opvult. Met dit extreme voorbeeld is een volumeverschil van 15% gemoeid. Maar ook kleinere verschillen in menging van het sediment kunnen verschillen opleveren in de volumes. Omdat er weinig kwantitatieve informatie beschikbaar is over de sedimentsamenstelling en al helemaal niet over de variatie in de tijd daarin, is het niet mogelijk om een kwantitatieve schatting te geven van de bijdrage van het mengen en ontmengen van sedimentmengsels.

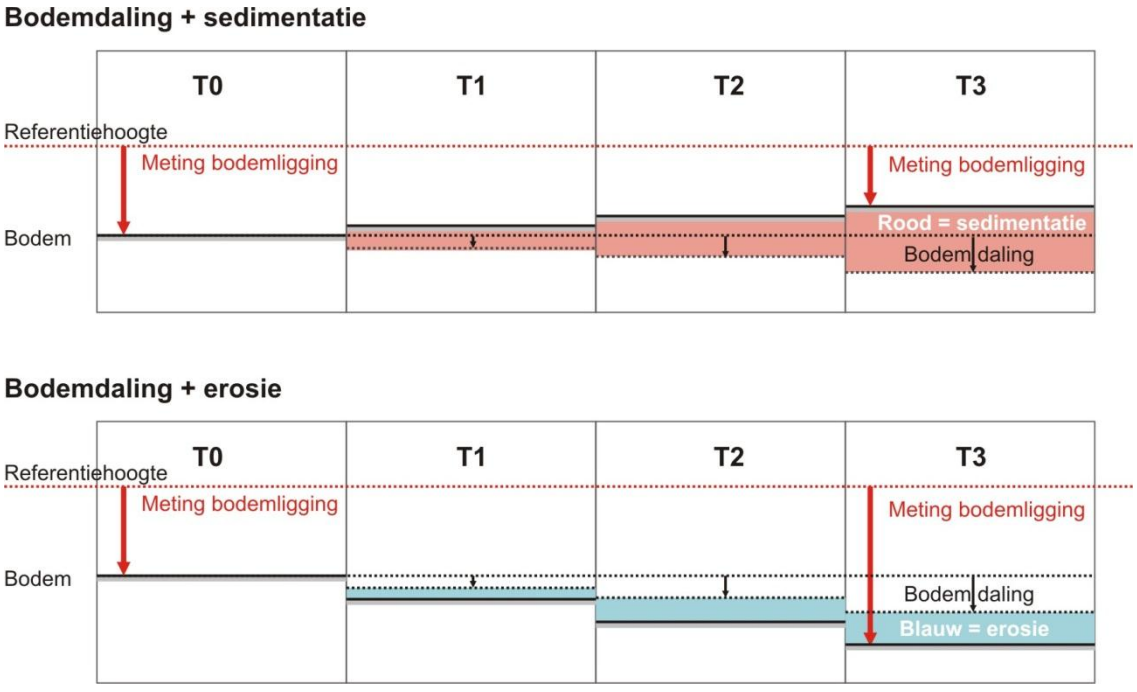
Voor de Waddenzee is beschreven dat er zomers sliblagen bovenop de wadplaten kunnen worden gevormd, die bij de eerste stromen worden opgebroken en weer verdwijnen (Janssen-Stelder, 2000, Spis & de Leeuw, 2009). Het wel of niet meten van zo'n seizoenafhankelijk sliblaag kan ook een schijnbare volumevariatie introduceren. Mogelijk kan dit zich voordoen op de slikken langs de Westerschelde.

Bodemdaling
In Nederland is sprake van een relatieve stijging van de zeespiegel, in de orde van 13 tot 24 cm per eeuw. Deze relatieve stijging van de zeespiegel is opgebouwd uit een deel eustatische zeespiegelstijging en de daling van de bodem (figuur 4.6). Op basis van de daling van de ondergrondse merken van het primaire net van het NAP wordt veronderstelt dat de bodemdaling van de diepere ondergrond in de omgeving van de Westerschelde circa 20 mm/ eeuw bedraagt (naar de getallen in Brand 2004, in de Bruijne e.a., 2005). De bodemdaling is een belangrijk aspect bij het meten van de sedimentatie en erosie. In gebieden met erosie leidt bodemdaling tot extra verlaging van de bodem, die bij het vergelijken van metingen tot uitdrukking komt in een extra erosie. In gebieden met sedimentatie leidt bodemdaling tot een tot een minder grootte gemeten sedimentatie. In figuur 4.7 zijn deze beide aspecten van bodemdaling geïllustreerd met hypothetische voorbeelden, waarin zowel bodemdaling optreedt, als sedimentatie en erosie.

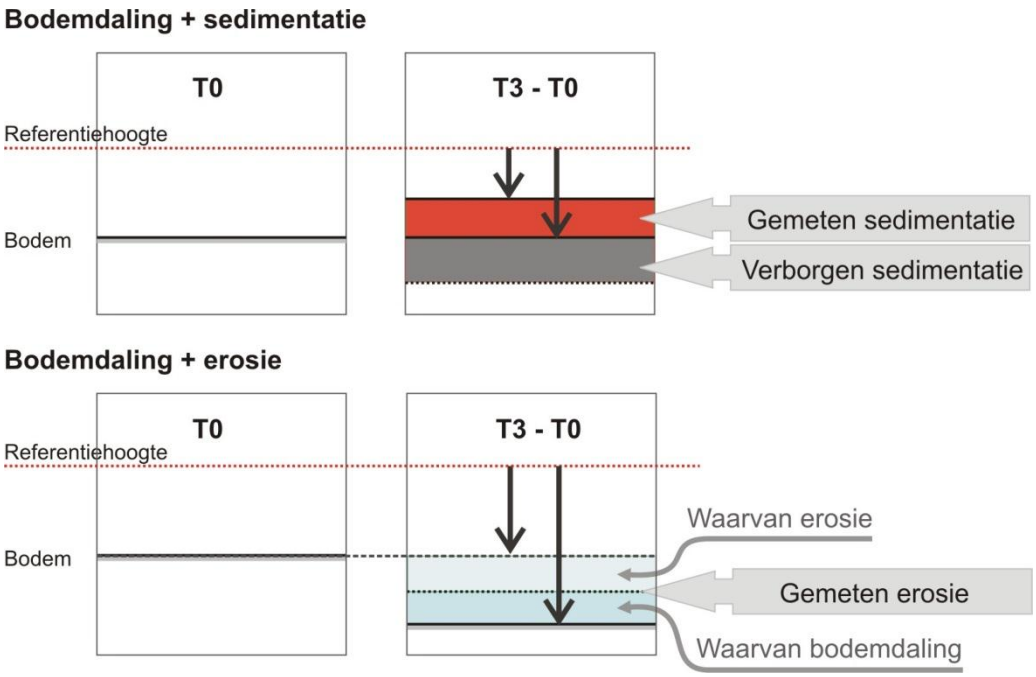
De wijze waarop de resultaten van de ontwikkelingen tot uitdrukking komen in de metingen van de bodemligging zijn geïllustreerd in figuur 4.8. In de gebieden met sedimentatie is de sedimentatie die plaatsvindt om de bodemdaling te compenseren aan het zicht onttrokken. Er is dan sprake van verborgen sedimentatie. In de gebieden waar erosie plaatst vindt, levert de bodemdaling een schijnbare erosie op. Het gemeten volume dat is gemoeid met de bodemdaling, bedraagt de totale oppervlakte van het gebied (sedimentatie + erosiegebieden), vermenigvuldigd met de bodemdaling. Bij een oppervlakte van 300 km^2 (de Westerschelde inclusief Saeftinghe) bedraagt het volume dat is gemoeid met een bodemdaling van 0,0002 m/jaar 60.000 m^3. Het getal van 0,2 mm/jaar heeft betrekking op de bodemdaling van de diepe ondergrond. Compactie van de (Holocene) afzettingen in de ondiepe ondergrond, vooral onder de platen en slikken, kan ook een volumebijdrage leveren. De omvang van de compactie en de bijdrage aan de metingen in vergelijking met de bodemdaling van de diepe ondergrond is niet bekend.



Figuur 4.6: Schematische weergave van de opbouw van de relatieve zeespiegelstijging uit de eustatische zeespiegelstijging + bodemdaling



Figuur 4.7: Illustratie van het effect van bodemdaling in gebieden met sedimentatie (boven) en erosie (onder)



Figuur 4.8: Illustratie van het effect van bodemdaling op metingen van de bodemligging bij sedimentatie (boven) en erosie (onder).

Plausibele variatie

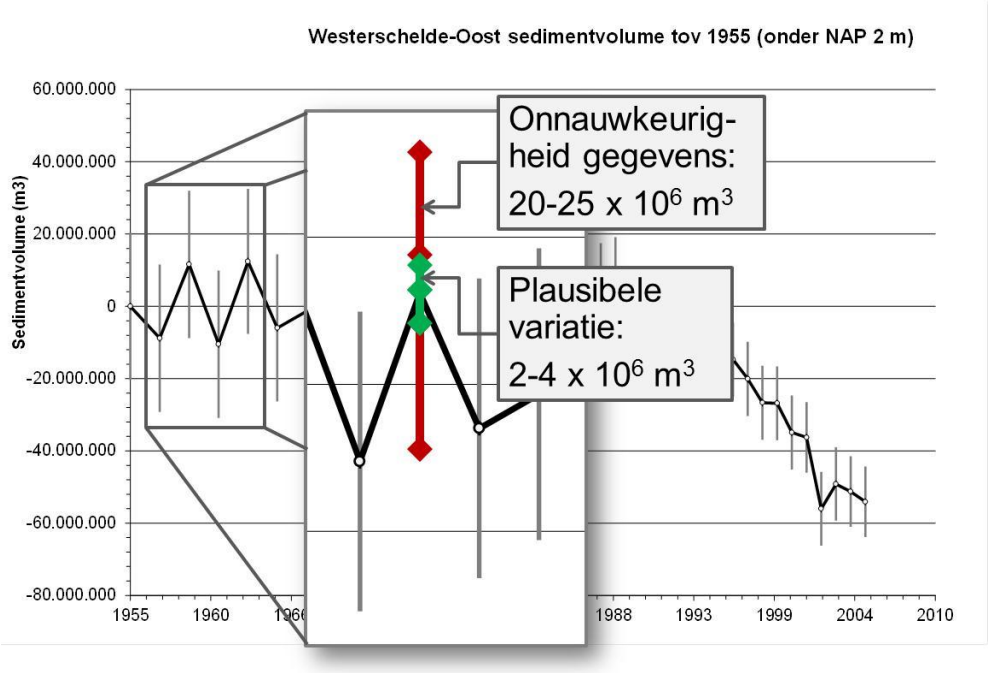
Hierboven zijn processen benoemd die kunnen leiden tot een daadwerkelijke variatie in de bodemligging. Van enkele van deze processen is een schatting beschikbaar van de volumes die er bij zijn betrokken. Voor andere processen (bijdragen van bodemleven, pakking van het sediment, menging en ontmenging) is dit niet het geval. Een werkelijke variatie in de bodemligging van +/- 1,5 cm per jaar over het oppervlakte van de Westerschelde lijkt plausibel. Dat betekent dat wordt uitgaan van een werkelijke variatie die kan optreden in de bodemligging tot 4 x 10^6 m^3 per jaar. Pieken (en dalen) in de ontwikkeling van het sedimentvolume die binnen deze bandbreedte liggen worden beschouwd als reële variaties. Bij de analyse van de ontwikkelingen en de bepaling van trends moet deze variatie in de beschouwing worden betrokken.

4.3 BANDBREEDTES ROND DE SEDIMENTVOLUMES

Plausibele morfologische verklaringen voor de relatief grote veranderingen met een wisselende signatuur (pieken) zijn er niet. Ook in de jaren vijftig en zestig waren er geen grote geulen of ondieptes die met een hoge snelheid (de veranderingen treden op na twee jaar) in en weer uit het kuberingsvak lopen. De plausibele variatie in de metingen bedraagt 2-4 x 10^6 m^3. Voor de variaties die groter zijn is de enige overblijvende verklaring dat deze pieken schijnbare veranderingen betreffen, die het gevolg zijn van afwijkingen in de metingen of de verwerking van de metingen.

Om een gevoel te krijgen voor de grootte van de afwijking in de metingen die bij de pieken en dalen in de periode 1955-1965 hoort, kan het maximale veranderingsvolume van 21,9 x 10^6 m^3 worden gedeeld door het oppervlakte van de oostelijke helft van 11.030 ha. Dat levert een gemiddelde hoogteverandering van 20 cm over het hele gebied. Gezien de fouten en problemen die kunnen optreden tijdens het meten en het verwerken van de gegevens is dat niet bijzonder veel. Daarmee bieden de afwijkingen een plausibele verklaring voor het optreden van de pieken en dalen in deze periode.

Bij de analyse van de ontwikkeling moet rekening worden gehouden met de bandbreedte rond het sedimentvolume. In figuur 4.9 is aangegeven dat deze bandbreedte uit twee delen bestaat, namelijk de plausibele variatie en de variatie die voorkomt uit de onnauwkeurigheid van de gegevens. De recente gegevens zijn wat betreft het laatste waarschijnlijk nauwkeuriger. Daarom wordt voor de meer recente gegevens (na 1987, zie figuur 3.11) uitgegaan van een kleinere bandbreedte.



Figuur 4.9: Weergave van de opbouw van een bandbreedte rond de volumes.

De bandbreedte is in de bovenstaande figuur 4.9 weergegeven als een foutenbalk rond de datapunten. De grootte van de bandbreedte bedraagt +/- 7,5 cm vermenigvuldigd met het oppervlakte van het gebied voor de gegevens van na 1987 en +/- 15 cm vermenigvuldigd met het oppervlakte van het gebied voor de gegevens van voor 1987. Hierbij moet steeds bedacht worden dat er geen sprake is van een 'echte' statistische fout. De bandbreedte bestaat uit nauwkeurigheden in de gegevens en plausibele variaties, waarop niet per se een foutenverdeling (Gauss, Poisson, …) van toepassing is. In alle eerlijkheid kan worden bekend dat het niet duidelijk is welke vorm de spreiding rond de gegevens heeft. De bandbreedte in de voorliggende rapportage wordt gehanteerd is dan ook expliciet *niet geschikt om te gebruiken als een normale verdeling in foutenberekeningen*. Bij de interpretatie van de volumeveranderingen en bij aangepaste statistische analyses (zie bijvoorbeeld Duin, 2005) kan rekening worden gehouden met het optreden van variaties in de metingen met de bovengenoemde omvang.

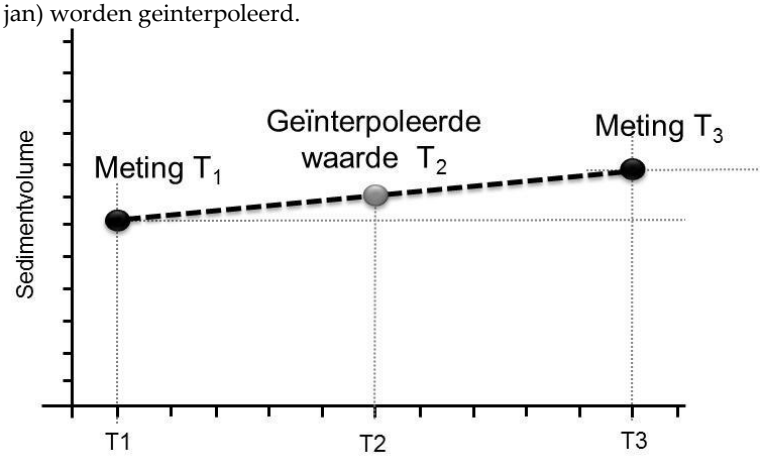
5 Gegevens combineren

5.1 INLEIDING

Niet van ieder jaar zijn bodemligginggegevens van de hele Westerschelde beschikbaar. Bovendien wisselen de jaren van opname elkaar af voor de westelijke en de oostelijke helft tot in de jaren ’80. Uitspraken doen over de ontwikkelingen van de gehele Westerschelde en het uitvoeren van een sedimentbalans voor dat gebied vereisen dat de gegevens voor de gehele Westerschelde worden gecombineerd. Er wordt in dit kader ook wel gesproken van de synchronisatie van de gegevens, omdat voor het opstellen van een sedimentbalans de momenten van opname rekenkundig (dus niet in de praktijk) gelijkgetrokken worden.
De twee bekende technieken die hiervoor worden gebruikt zijn lineaire interpolatie en het optellen van trends. In dit hoofdstuk worden deze twee technieken voor het combineren van de gegevens besproken, waarbij wordt ingegaan op de voor- en nadelen ervan. In de laatste paragraaf wordt het resultaat van het combineren van de gegevens van oost en west voor de gehele Westerschelde gepresenteerd.

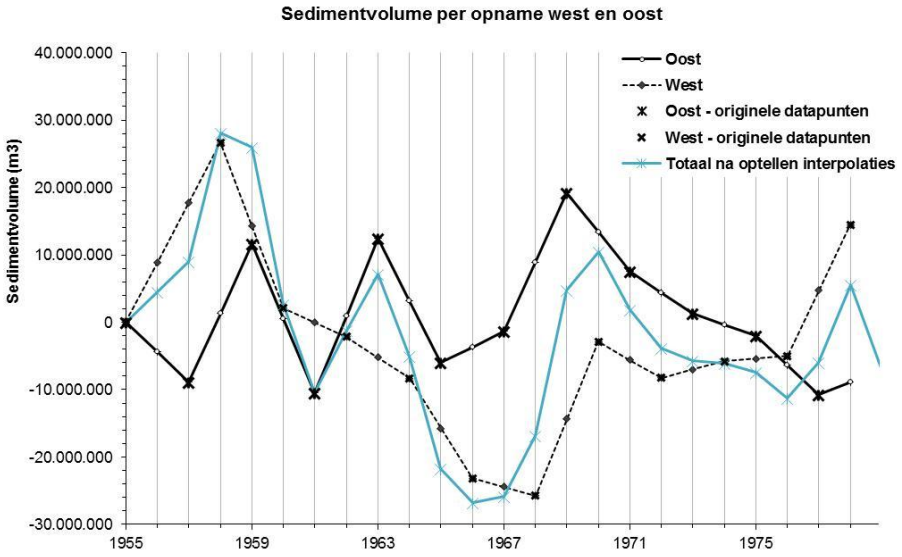
5.2 LINEAIRE INTERPOLATIE

Bij lineaire interpolatie worden de gegevens van twee verschillende jaren gebruikt, met een tussenliggende periode van ten minste 2 jaar. In de grafiek in figuur 5.1 is dit schematisch weergegeven, voor twee metingen die hebben plaatsgevonden op de momenten T_1 en T_3. De waarde voor het sedimentvolume op het moment T_2 wordt in dit voorbeeld verkregen door de sedimentvolumes op T_1 en T_3 op te tellen en te delen door 2. Als opnameperiode exact bekend zijn kan daar in de berekening rekening mee worden gehouden, de berekeningsmethode wordt dan iets complexer, omdat de metingen naar een vaste datum (1 jan) worden geinterpoleerd.



Figuur 5.1: Voorbeeld van de interpolatie van de waarde voor T2 uit de meetwaarden uit de jaren T1 en T3.

Na het bepalen van de waarden van de tussenliggende jaren kunnen de waarden voor oost en west per jaar worden opgeteld, zoals in de grafiek in figuur 5.2 is geïllustreerd. Deze methode is veel gebruikt bij de analyse van de sedimentontwikkeling van de Westerschelde, bijvoorbeeld in de rapportages van Haecon (2006), Liek en Nederbragt (2004) en vele andere.
Het grote voordeel van lineaire interpolatie is dat er "data"punten beschikbaar komen voor alle tussenliggende jaren waarvoor metingen ontbreken. Bij het combineren met de gegevens over baggeren, storten en zandwinning, blijkt dit zeer wenselijk.
Het grote nadeel van lineaire interpolatie is dat er geen rekening wordt gehouden met de (on)nauwkeurigheid van de gegevens.



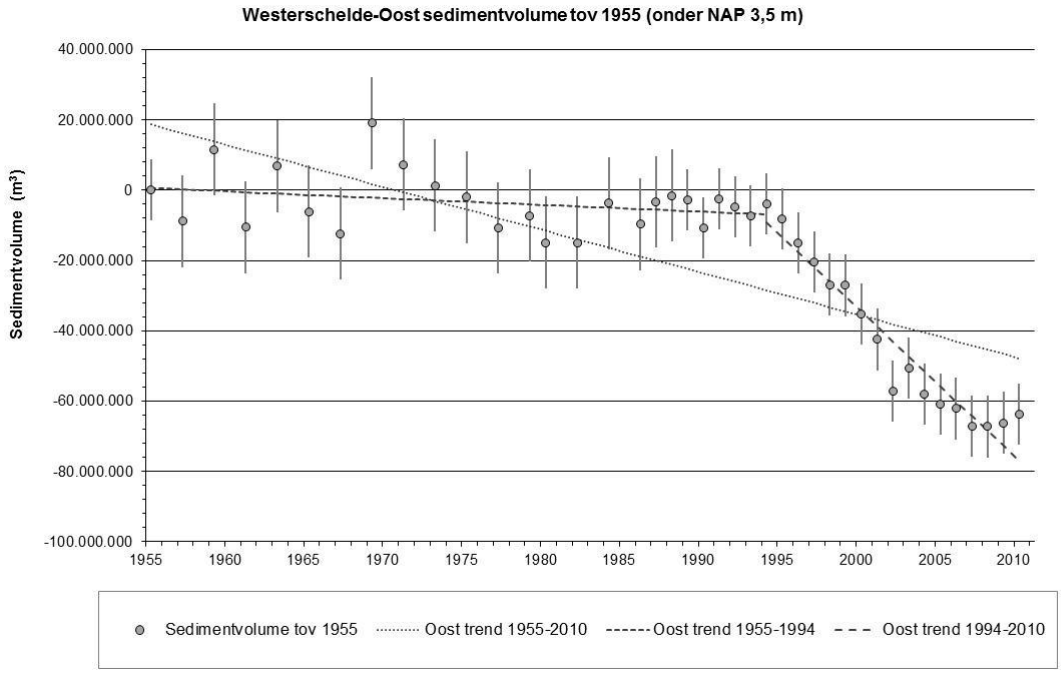
Figuur 5.2: Interpolatie van de waarden voor de oostelijke en westelijke helft van de Westerschelde en de optelsom voor het geheel.

5.3 TRENDS OPTELLEN

Bij het combineren van trends wordt eerst een trend bepaald door de meetpunten per deelgebied. Dat is relatief eenvoudig voor de gevallen waar er sprake is van een duidelijke trend, zonder trendbreuken. Relatief, omdat een aanname moet worden gedaan over de 'vorm' van de trend, bijvoorbeeld lineair, of exponentieel, dan wel een complexe trendanalyse moet worden uitgevoerd. Een complexe trendanalyse bij het bepalen van de trends in de zandbalans van de Nederlandse kust is uitgevoerd door Nederbragt (2005). Daarbij moet steeds worden gedacht dat niet alle bepaalde trends zondermeer mogen worden opgeteld. Bij het constateren van trendbreuken moet een (arbitraire) keuze worden gemaakt voor deelperioden waarover de trendbepaling wordt uitgevoerd.

Ter illustratie zijn in de onderstaande grafiek (figuur 5.3) drie lineaire trendlijnen weergegeven, op basis van de gemeten sedimentvolumes (genormaliseerd ten opzichte van 1955) van de oostelijke helft van de Westerschelde.
De eerste trendlijn is bepaald voor alle meetpunten in de periode 1955-2010 en deze geeft een afname van het sedimentvolume van -1,21 x 10^6 m^3 per jaar. Deze trendlijn loopt bij meerdere meetpunten buiten de geïndiceerde bandbreedte.
De twee andere trendlijnen zijn bepaald voor respectievelijk de periode tot en met 1994 en de periode na 1994. De trendlijn van 1955 tot en met 1994 laat een afname zien van het sedimentvolume van -0,21 x 10^6

m^3 per jaar. De trendlijn van 1994 tot en met 2010 laat een afname zien van -4,12 x 10^6 m^3 per jaar. Beide trendlijnen blijven binnen de geïndiceerde bandbreedte.



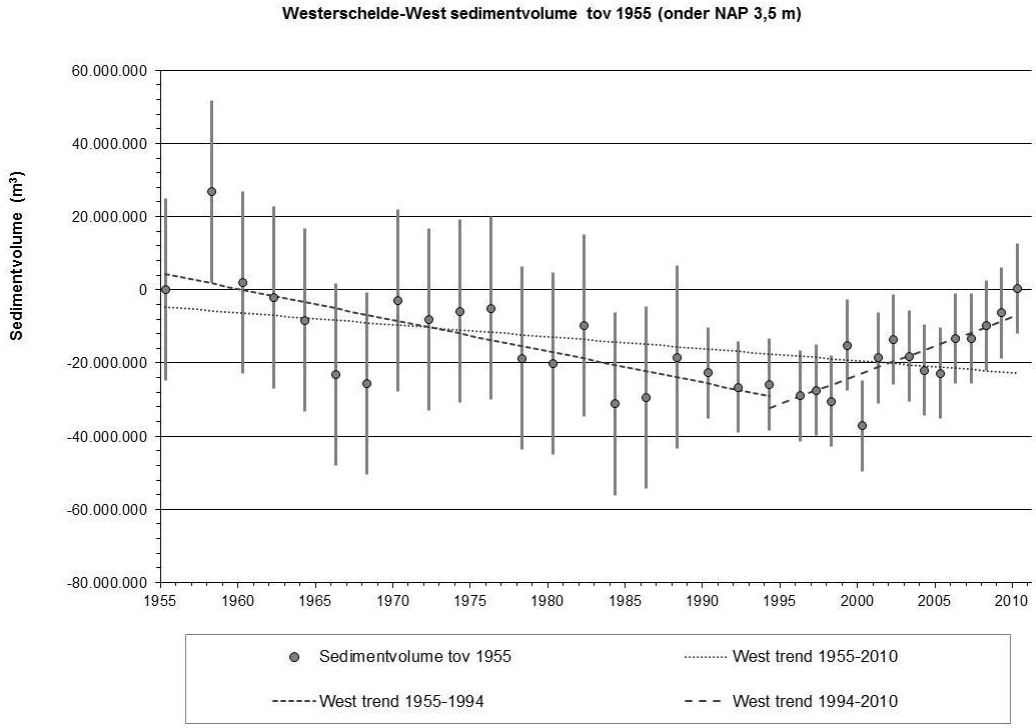
Figuur 5.3: Sedimentvolumes en drie trends voor de oostelijke helft van de Westerschelde (het negatieve verschil in het watervolume onder NAP +3,5 m t.o.v. 1955).

Een nadeel van het optellen van trends is dat er arbitraire keuzes worden gemaakt rond trendbreuken. Hieraan is tegemoet gekomen door met verschillende jaren voor de trendbreuk trendlijnen te bepalen. De trends zijn bepaald voor meerdere perioden en de resultaten daarvan zijn in de onderstaande tabel 5.1 weergegeven. Voor de bepaling over de eerste helft, die van 1955 tot 1992/1993/1994/1995/1996 is bepaald, is de range in de trends niet bijzonder groot. Steeds is sprake van een afname van -0,2 x $10^6 m^3$ per jaar. Dat is anders bij de resultaten van de trendbepaling vanaf 1992/1993/1994/1995/1996 tot en met 2010, deze zijn lager vanaf begin jaar 1993 tot 1996.In de grafiek in figuur 5.3 lijkt na 2007 sprake te zijn van stijgende waarden in de volumes, maar omdat deze mogelijke nieuwe ontwikkeling nog maar een beperkt aantal waarnemingen omvat die ruim binnen de bandbreedte vallen, is dit niet verder verkend.
De gemiddelde waarden voor de bepaalde trends zijn aangegeven in de onderstaande tabel.

Oostelijke helft van de Westerschelde: Trend in m^3/jaar					***Gemiddelde***
Gehele periode 1955 – 2010					
-1.208.193					*-1.208.193*
Eerste helft 1955 –					
1992	1993	1994	1995	1996	
-206.883	-208.364	-192.307	-196.984	-227.623	*-206.432*
Tweede helft …. -2010					
1992	1993	1994	1995	1996	
-4.141.769	-4.197.351	-4.240.882	-4.107.954	-3.921.792	*-4.121.950*

Tabel 5.1: Trends in de sedimentvolume van de oostelijke helft van de Westerschelde bepaald over verschillende periodes en de gemiddelden daarvan (in de laatste kolom).

De ontwikkelingen voor de westelijke helft van de Westerschelde zijn in de grafiek in figuur 5.4 getoond. In de grafiek zijn trendlijnen aangegeven die dezelfde periode omvatten als voor de oostelijke helft, van 1955 tot 2011,van1955 tot 1994 en van 1994 tot en met 2010. In de grafiek is een trendbreuk herkenbaar, waarbij de overgang van afname naar toename in de tweede helft van jaren negentig zichtbaar is. De ontwikkeling na de trendbreuk is tegengesteld aan de ontwikkeling in de oostelijke helft van de Westerschelde. Ook voor de westelijke helft van de Westerschelde zijn de trends over verschillende periode bepaald. Deze periodes komen niet geheel overeen met die van de oostelijke helft, omdat de jaren waarvoor meetgegevens beschikbaar zijn, verschillen.
De berekende afname over de eerste helft neemt af naarmate de periode waarover de trend wordt bepaald langer is, van maximaal 0,89 x $10^6 m^3$ per jaar voor de periode van 1955 – 1990 tot 0,82 x $10^6 m^3$ per jaar voor de periode van 1955 tot 1998. Het omgekeerde is het geval voor de tweede helft van de periode, daar wordt de trendmatige toename groter naarmate de periode waarover de wordt bepaald korter wordt, van 1,14 x $10^6 m^3$ per jaar voor de periode van 1990 tot en met 2010 tot 1,84 x $10^6 m^3$ per jaar voor de periode van 1998 tot en met 2010. De gemiddelde waarden voor beide periode liggen tussen de ander waarden in en komen dicht bij de waarden voor de periode tot en met 1994.



Figuur 5.4: Sedimentvolumes en drie trends voor de westelijke helft van de Westerschelde (het negatieve verschil in het watervolume onder NAP +3,5 m t.o.v. 1955).

Westelijke helft van de Westerschelde: Trend in m³/jaar					*Gemiddelde*
Gehele periode 1955 - 2010					
-1.208.193					*-326.923*
Eerste helft 1955 –					
1990	1992	1994	1996	1998	
-894.646	-881.568	-854.478	-843.354	-821.993	*-859.208*
Tweede helft …. -2010					
1992	1993	1994	1995	1996	
+1.140.989	+1.389.531	+1.577.187	+1.780.627	+1.843.559	*1.546.379*

Tabel 5.2: Trends in de sedimentvolumes van de westelijke helft van de Westerschelde bepaald over verschillende periodes en de gemiddelden daarvan (in de laatste kolom).

Na het vaststellen van de trend(s) voor de deelgebieden worden deze opgeteld, om te komen tot de ontwikkelingen voor de gehele Westerschelde. In de volgende paragraaf zal nader worden ingegaan op het combineren van trends en de waarde van verkregen getallen.

5.4 GEGEVENS COMBINEREN

De methoden lineaire interpolatie en trends optellen hebben duidelijke voor- en nadelen, die door Uit den Bogaard (1994) overzichtelijk zijn benoemd en hier *cursief* worden geciteerd:

Nadelen

- *Het belangrijkste nadeel van de trendlijnen methode is dat het statistisch gezien eigenlijk niet toegestaan is om deze trendlijnen bij elkaar op te tellen*[2] .
- *Verder hebben trendlijnen als nadeel dat de morfologische veranderingen die niet over een groot deel van de beschouwde periode spelen niet terug zijn te vinden in de gegevens. Ook tijdelijke veranderingen in de bagger- en stortstrategie zijn niet (meer) terug te vinden in de grafiek van de ontwikkeling van de inhoud.*
- *Een ander nadeel van trendlijnen is dat de keuzes voor het aanbrengen van trendbreuken en de plaats van deze trendbreuken niet objectief gemaakt kan worden.*
- *Lineaire interpolatie heeft als nadeel dat bij elke hobbel in de inhoudsgrafieken de, moeilijk te beantwoorden, vraag zich opdringt of deze het gevolg is van morfologisch processen of van lodingsfouten.*

Voordelen:

- *Het fitten van de trendlijn heeft als voordeel dat slingeringen in de inhoud die het gevolg zijn van lodingsfouten en dergelijke enigszins uitgemiddeld worden. Globale middellange (15 – 40 jaar) ontwikkelingen die ongeveer lineair, in één richting, verlopen kunnen er goed mee worden beschreven.*
- *Een ander voordeel is dat als trendlijnen bij elkaar worden opgeteld, de resulterende grafiek een vloeiende lijn oplevert waarmee uitspraak kan worden gedaan over de middellange termijn ontwikkeling voor het gehele estuarium.*
- *Lineaire interpolatie heeft als voordeel dat alle gegevens gebruikt worden.*

Uit den Bogaard (1994) heeft beide methodes toegepast en constateert dat er dan voor elk jaar twee getallen beschikbaar komen, die flink kunnen verschillen, waarmee de kans op onduidelijkheden toeneemt.

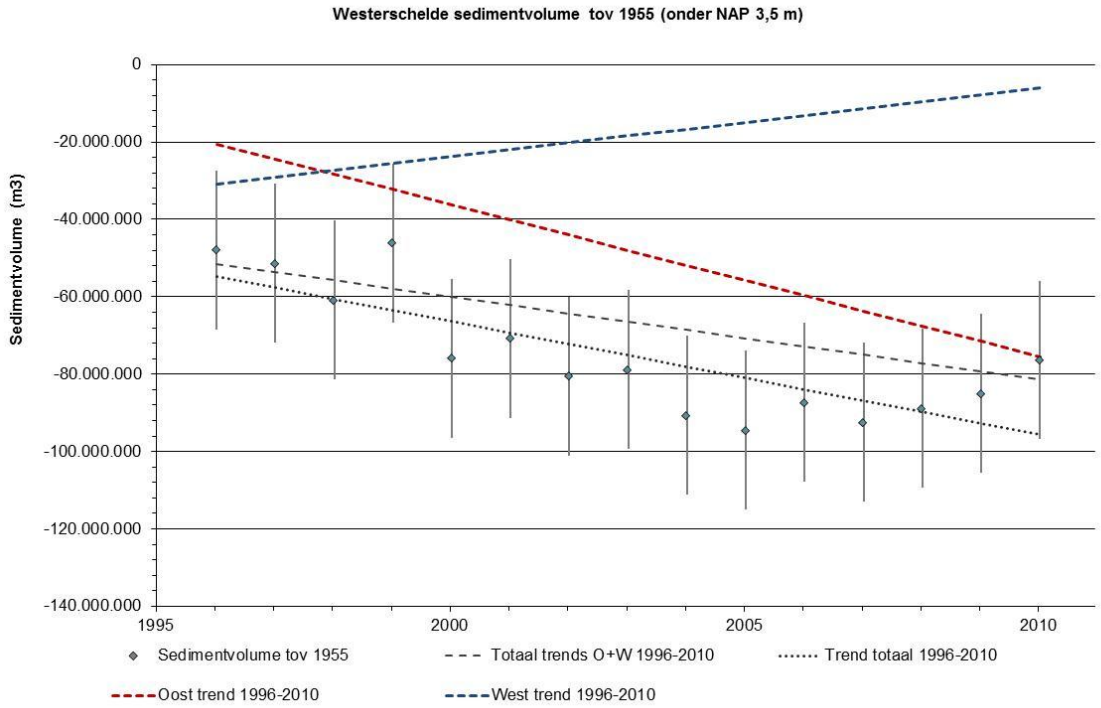
[2] Uit de Bogaard (1994) geeft geen motivatie hiervoor. Zolang de trends lineaire relaties betreffen, die in essentie een model zijn voor de sedimentvolume met de vorm Vsediment= A + B x Tijd, lijkt er niks mis mee om deze op te tellen.

In dit rapport wordt de voorkeur gegeven aan het combineren van trends. Bij lineair interpoleren en optellen blijven de pieken en dalen behouden. Omdat aan het waarheidsgehalte van de individuele pieken en dalen wordt getwijfeld lijkt het zinnig om deze 'kwijt te raken'. In de praktijk is het zo dat één grote uitbijter het beeld van de ontwikkelingen kan domineren, zeker als er sprake is van een beperkt aantal waarnemingen. Dit is gebleken bij de analyse van de gegevens van de Monding van de Westerschelde en de Voordelta (Cleveringa, 2008). Vandaar dat er een voorkeur is voor de combinatie van trends. De consequentie hiervan is dat er automatisch naar de ontwikkelingen op de langere termijn wordt gekeken. Zoals zal blijken levert deze aanpak voldoende informatie op over de morfologische veranderingen in de Westerschelde, in relatie tot de beheerstrategieën en –maatregelen.

Voor de periode van 1996 tot en met 2010 is van ieder jaar een opname beschikbaar van de gehele Westerschelde. In figuur 5.5 zijn deze waarden weergegeven. In de grafiek is ook een trendlijn weergegeven voor deze periode. Deze trend voor de gehele Westerschelde wordt vergeleken met de waarden die zijn bepaald door de trends van oost en west voor dezelfde periode op te tellen. Op deze manier wordt inzicht gegeven in de nauwkeurigheid van het combineren van trends. In tabel 5.3 zijn deze trends weergegeven. De ontwikkelingen voor de oostelijke en westelijke helft verlopen in deze periode tegengesteld, met een grote afname in het oosten en een toename in het westen. Omdat de toename in het westen beduidend kleiner is dan de afname in het oosten levert het optellen van deze twee trends een jaarlijkse afname van het sedimentvolume van -2,14 x 10^6 m^3. De afname die wordt berekend door de trend te bepalen voor de gehele Westerschelde voor de periode van 1996-2010 bedraagt -2,92 x 10^6 m^3 per jaar. Het verschil tussen deze twee trends is -0,8 x 10^6 m^3: Het combineren van de twee trends levert voor deze periode een onderschatting van het sedimentverlies. Dit geeft een indicatie van de bandbreedte die wordt geïntroduceerd door het combineren van de trends.

Methode	Verandering sedimentvolmue per jaar (m^3)	
Trend oostelijke helft 1996 - 2010	-3.921.792	[1]
Trend westelijke helft 1996 - 2010	1.780.627	[2]
Gecombineerde trends oost en west 1996-2010	-2.141.165	= [1] + [2]
Trend gehele Westerschelde 1996-2010	-2.920.403	

Tabel 5.3: Trends in de sedimentvolumes van de westelijke en oostelijke helft van de Westerschelde, de combinatie van beide en de trend bepaald over de gehele Westerschelde.



Figuur 5.5: Grafiek van de ontwikkeling van het sedimentvolume en de trends daarin (het negatieve verschil in het watervolume onder NAP 3,5 m t.o.v. 1955).

Door de eerder bepaalde trends met verschillende begin- dan wel eindjaren uit de tabellen 5.1 en 5.2 te combineren voor de oostelijke en de westelijke helft worden verschillende trends verkregen. In de onderstaande tabel 5.4 zijn deze getallen opgenomen. In tabel 5.4 zijn ook de getallen opgenomen voor de trend die is bepaald over de gehele periode voor de gehele Westerschelde, van 1955 tot en met 2010. Deze trend kan worden vergeleken met de gecombineerde trends voor de gehele periode.
De trends die zijn bepaald voor de gehele Westerschelde, tot de trendbreuk in eerste helft van de jaren negentig, vertonen slechts een beperkte variatie, met waarden tussen de -1,09 x 10^6 m^3 per jaar en -1,05 x 10^6 m^3 per jaar.
Voor de tweede helft is dat duidelijk anders, daar verschillen de waarden aanzienlijk, van -2,8 x 10^6 m^3 per jaar voor de periode van 1992 tot en met 2010, tot -2,1 10^6 m^3 per jaar voor de periode van 1996 tot en met 2010. Deze verschillen hebben te maken met de verschillen in de sedimentontwikkeling in de oostelijk en de westelijke helft. Dit wordt niet direct ondersteund door de ontwikkeling van het sedimentvolume van de gehele Westerschelde, zoals weergegeven in de bovenstaande grafiek.

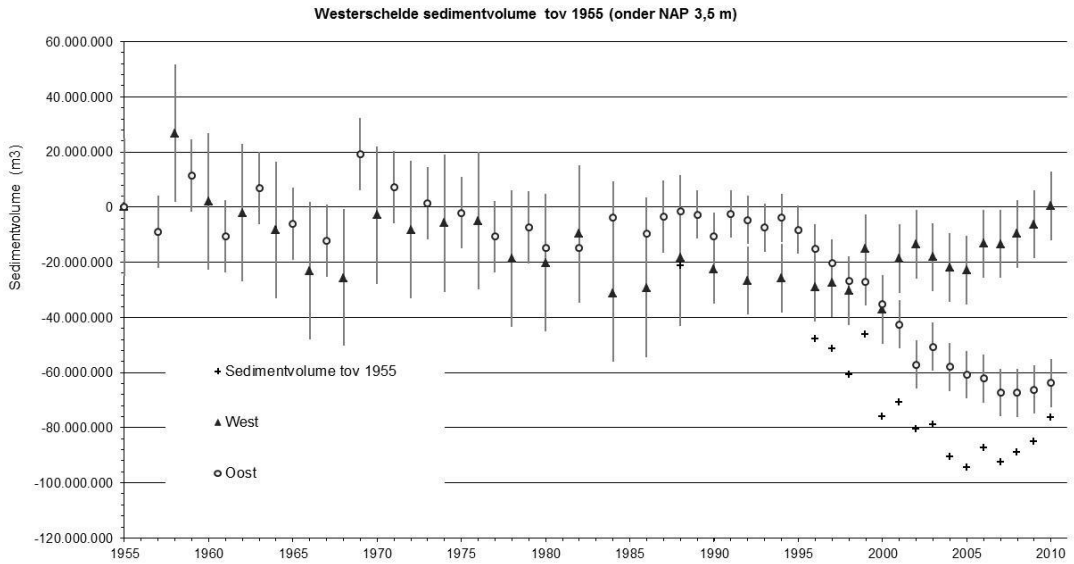
Gehele Westerschelde: Trend in m3/jaar				Gemiddeld
Gehele periode 1955-2010				
Trend Westerschelde totaal 1955-2010			-1.846.596	
Gecombineerde trends oost en west 1955-2010			-1.535.116	
Eerste helft				
Eerste helft gecombineerde trends oost en west				
	1955-1992	1955-1994	1955-1996	
	-1.088.452	-1.046.785	-1.070.977	-1.068.738
Tweede helft				
Tweede helft gecombineerde trends oost en west				
	1992-2010	1994-2010	1996-2010	
	-2.752.238	-2.663.695	-2.141.165	-2.519.033
Tweede helft Westerschelde totaal 1996-2010			-2.920.403	

Tabel 5.4: Trends in de sedimentvolumes van de gehele Westerschelde.

6 Ontwikkeling sedimentvolumes en ingrepen

6.1 ONTWIKKELINGEN 1955-2010

In het voorgaande hoofdstuk is al veel weergegeven van de waargenomen ontwikkelingen van de sedimentvolumes in Westerschelde, zonder het Land van Saeftinghe. In dit hoofdstuk worden deze ontwikkelingen samengevat en worden de gegevens van het Land van Saeftinghe nader beschouwd. In figuur 6.1 zijn de waargenomen sedimentvolumes voor de westelijke en oostelijke helft in dezelfde grafiek weergegeven, evenals de sedimentvolumes voor de gehele Westerschelde. In het oog springende elementen in deze grafiek zijn de grote sprongen in de volumes in beide delen van de Westerschelde in de periode tot ruwweg halverwege de jaren '70, de relatief stabiele periode van halverwege jaren '70 tot halverwege jaren '90 en de periode van afname van het sedimentvolume in de oostelijke helft daarna.



Figuur 6.1: Grafiek van de ontwikkeling van het sedimentvolume van de oostelijke en westelijke delen van de Westerschelde en het geheel (het negatieve verschil in het watervolume onder NAP 3,5 m t.o.v. 1955).

1955 tot halverwege de jaren '70

Harde uitspraken doen over de ontwikkelingen van het sedimentvolume in deze periode is eigenlijk niet mogelijk. De sprongen en pieken in de sedimentvolumes zijn dermate groot dat de waarde van de trendbepalingen betrekkelijk klein is. Voor de omvang van de trends wordt verwezen naar de volgende periode. De omvang van de pieken en sprongen doet vermoeden dat deze voortkomen uit de inwinning en verwerking van de gegevens. In de periode daarna zijn sprongen in de metingen schaarser, maar niet

volledig afwezig. Zelfs redelijk recent (2003) worden soms sprongen waargenomen die buiten de bandbreedte en buiten de trends vallen.

Halverwege de jaren '70 tot halverwege de jaren '90

In deze periode lijkt sprake te zijn van een relatief stabiele situatie. In tabel 6.1 is voor oostelijke helft de samenvatting gepresenteerd van de berekende trends, waarin de gemiddelde waarden uit tabel 5.1 zijn opgenomen. Voor de periode tot 1994 is sprake van een gemiddelde afname van 0,2 x 10^6 m^3/jaar . Voor de westelijke helft zijn de getallen weergegeven in tabel 6.2. Voor deze periode geldt een beduidend grotere afname van 0,9 x 10^6 m^3/jaar . De gecombineerde ontwikkeling voor de gehele Westerschelde bedraagt een afname van 1,1 x 10^6 m^3/jaar voor de periode van 1955 tot halverwege de jaren '90.

Halverwege de jaren '90 tot 2010

In deze periode is een zeer duidelijke trendbreuk zichtbaar in de ontwikkeling van de oostelijke helft van de Westerschelde. De afname van het sedimentvolume in de oostelijke helft neemt dan toe tot gemiddeld 4,1 x 10^6 m^3/jaar en dat is een vertwintigvoudiging ten opzichte van de afname van 0,2 x 10^6 m^3/jaar in de periode daarvoor. Het is overigens wel zo dat de mate van afname sterk wordt beïnvloedt door de periode waarover de trend wordt berekend (zie tabel 5.1). De meest recente waarnemingen suggereren dat vanaf 2007 de sterke afname is gestopt. In de westelijke helft van de Westerschelde is in dezelfde periode sprake van een toename van het sedimentvolume. De gemiddelde trend bedraagt + 1,5 x 10^6 m^3/jaar, maar ook de trends wordt sterk bepaald door de periode waarover wordt gerekend. Hoe korter de periode waarover wordt gerekend, des te sterker de toename die is bepaald. De combineerde ontwikkeling voor de gehele Westerschelde bedraagt een afname van 2,5 x 10^6 m^3/jaar .

	Oostelijke helft Westerschelde	Trend in m^3/jaar
A	1955-1994 Gemiddelde trend oost	-206.432
B	1994-2010 Gemiddelde trend oost	-4.121.950
C	1955-2010 trend oost	-1.208.193

Tabel 6.1: Trends voor de oostelijke helft van de Westerschelde (uit tabel 5.1).

	Westelijke helft Westerschelde	Trend in m^3/jaar
A	1955-1994 Gemiddelde trend west	-859.208
B	1994-2010 Gemiddelde trend west	+1.546.379
C	1955-2010 trend west	-326.923

Tabel 6.2: Trends voor de westelijke helft van de Westerschelde (uit tabel 5.2).

	Gehele Westerschelde	Trend in m^3/jaar
A	1955-1994 Gemiddelde gecombineerde trends oost en west	-1.068.738
B	1994-2010 Gemiddelde gecombineerde trends oost en west	-2.519.033
C	1955-2010 Gecombineerde trends oost en west	-1.535.116

Tabel 6.3: Gecombineerde trends voor de gehele Westerschelde (uit tabel 5.4)

6.2 HET LAND VAN SAEFTINGHE

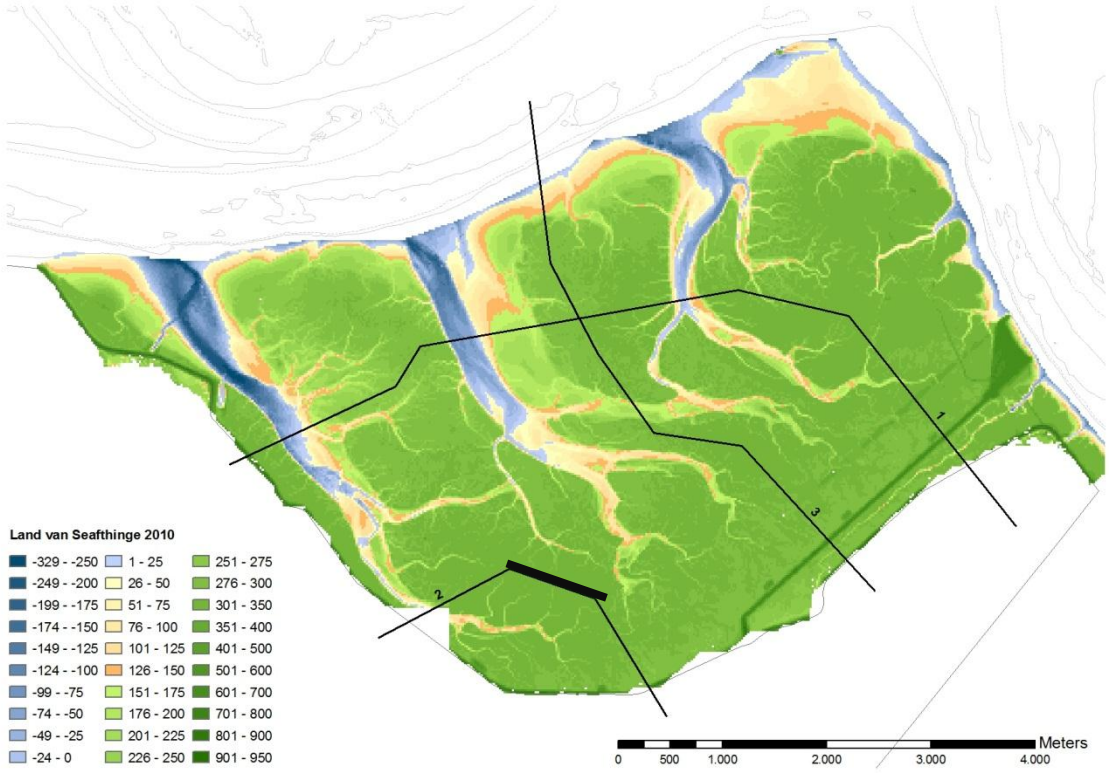
Van het Land van Saeftinghe wordt aangenomen dat het een netto sedimentatie gebied is, waarvan de hoogte in de periode na 1930 sterk is toegenomen. De toename van hoogte van het schor is groter geweest dan de lokale toename van de hoge waterstanden, zodat de schorren steeds minder frequent onderstromen. Daarmee samenhangend heeft ook veroudering van het schor plaatsgevonden (zie bijvoorbeeld Houtekamer, 1995).

De hoogteligging
Hoogtegegevens van het Land van Saeftinghe zijn schaars. De hier beschreven bodems bevatten een bodem van Saeftinghe die voor de periode 1955 tot 2001 identiek is. Uit eerdere studies is geen bodem van Saeftinghe van 1955 vermeld, maar wordt gerefereerd aan bodems van 1931, 1963 en 1992, waarvan ook digitale verschilkaarten zijn opgenomen (Houtekamer, 1995; Storm en Pieters, 1994). In een studie door WL Borgerhout (1991) worden hoogtegegevens uit 1914, 1933, 1961 en 1979 genoemd en gebruikt. Omdat de digitaal beschikbare bodem van 1955 (figuur 2.4) nergens wordt vermeld, lijkt het verstandig om bij een analyse deze bodem niet te beschouwen.

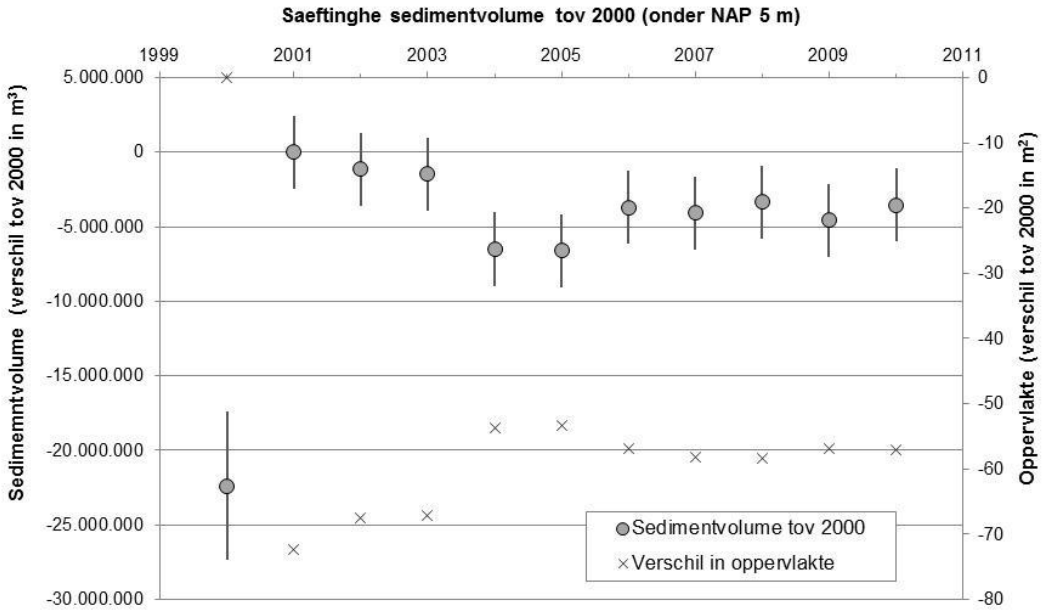
De door Houtekamer (1995) gerapporteerde kombergingvolumes (afname van 9,9 x 10^6 m^3 van 1963 – 1992 over 2988 ha) en de hoogteligging (gemiddelde toename voor Saeftinghe van 37 cm van 1963 - 1992) zijn gebruikt om sedimentatiesnelheden van 1,2 en 1,3 cm/jaar voor de periode 1963-1992 te berekenen. Uitgedrukt in sedimentvolume bedraagt de sedimentatie 0,34 x 10^6 m^3/jaar. Speuren in de oudere balansberekeningen en zandbalansen levert nog twee getallen, van 29,9 x 10^6 m^3 voor de periode 1878-1931 en 12,0 x 10^6 m^3 voor de periode 1931 -1952, die overeenkomen met een jaarlijkse sedimentatie van respectievelijk 0,56 en 0,57 x 10^6 m^3/jaar (uit de Looff, 1986, waarin als bron wordt verwezen naar een rapport Nr 1/1955 directie Benedenrivieren). In de balansberekeningen van de Looff (o.a. 1986), van den Berg (1991) en Uit den Bogaard (1995) zijn geen (bodemligging)gegevens over het Land van Saeftinghe opgenomen.
In het rapport van het WL Borgerhout (1991) wordt op basis van de daarin weergegeven volume ontwikkelingen gesproken over een sedimentatie van meer dan 700.000 m^3/jaar voor 1933 en tussen 1961 en 1979 636.100 m^3/jaar, of een jaarlijkse gemiddelde ophoging van 2 cm.

Van het Land van Saeftinghe zijn vanaf 2001 meerdere bodemligginggegevens beschikbaar. De beschikbaarheid van de nieuwe en gedetailleerde gegevens vanaf 2001 gaf de hoop dat een bepaling van de sedimentatie in het gebied mogelijk moest zijn. De kaart van het deelgebied Saeftinghe in 2010 is in figuur 6.2 weergegeven. Van dit deelgebied zijn de sedimentvolumes bepaald, waarbij als referentiejaar 2001 is gebruikt. In de grafiek in figuur 6.3 zijn de veranderingen in de sedimentvolumes ten opzichte van 2001 weergegeven. Een duidelijke trend in de periode van 2001 tot 2010 is niet herkenbaar en er is een fikse sprong zichtbaar van 5 x 10^6 m^3 in een periode van 1 jaar (2003 - 2004).
Ter verificatie van de kwaliteit van de gegevens is een aantal dwarsdoorsnedes (locaties in figuur 6.2) beschouwd. In de dwarsdoorsneden van het gebied, waarvan in figuur 6.3 een representatief voorbeeld is gegeven, is zichtbaar dat de bodemligging van jaar op jaar sterk verschilt. Deze grote variatie van jaar op jaar wordt niet verwacht van een schor. Verder is zichtbaar dat:

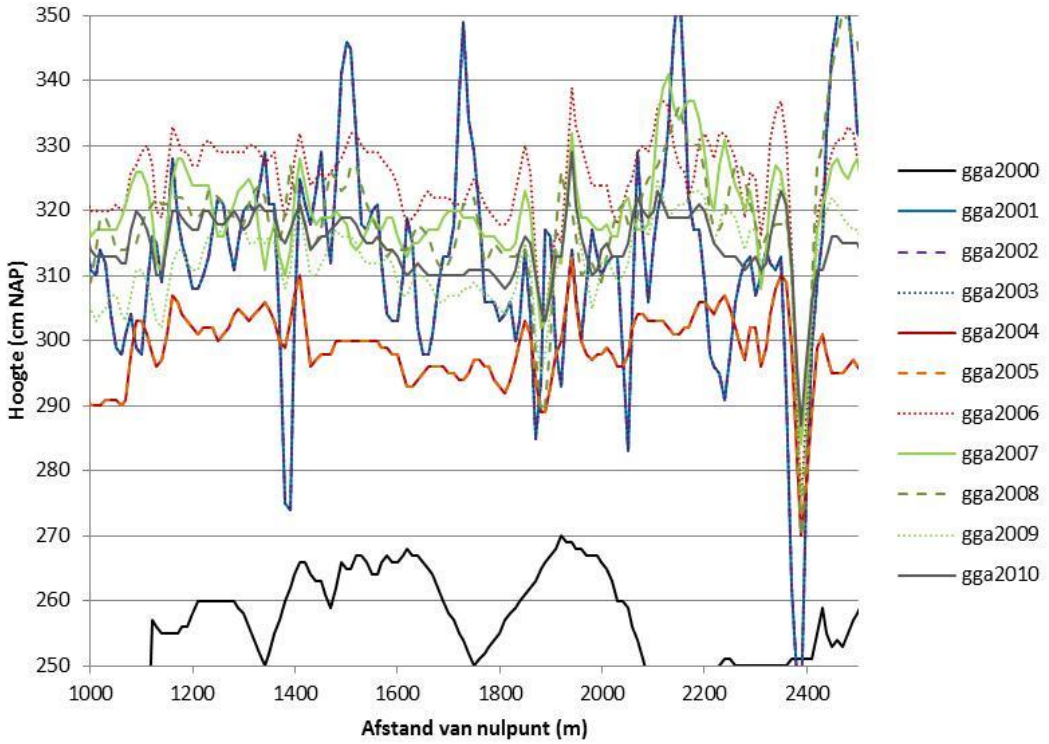
- De bandbreedte waarbinnen de bodemligging varieert in 2001 veel groter is dan in latere jaren;
- De bodem uit het jaar 2004 structureel lager ligt dan in de andere jaren (dit verklaart de eerder genoemde afname van 5 x 10^6 m^3).



Figuur 6.2: Bodemligging in het Land van Saeftinghe in 2010



Figuur 6.3: Grafiek met de ontwikkeling van het sedimentvolume onder NAP 5 m ten opzichte van 2001 in het land van Saeftinghe (figuur 6.2).



Figuur 6.4: Dwarsdoorsnede voor een aantal jaren uit het Land van Saeftinghe (locatie van dit detail in dik lijnsegment in figuur 6.2).

De analyse van de sedimentvolumes en het bestuderen van de dwarsdoorsnedes levert vooral aanwijzingen dat deze gegevens *niet* bruikbaar zijn om (de trend in) de sedimentatie in het Land van Saeftinghe te berekenen.

Sedimentatiesnelheid

Van de schorren in de Westerschelde, waaronder het land van Saeftinghe, zijn naast de metingen van de hoogte ook metingen van de sedimentatiesnelheid beschikbaar. Bij de sedimentatiemetingen is niet de hoogte ten opzichte van een vaste referentiehoogte (NAP of TAW) gemeten, maar is de hoogteverandering ten opzichte van een referentieniveau in het schor bepaald. Deze referentieniveaus zijn kunstmatig aangebracht, in de vorm van laagjes witte klei (kaolien), of zijn gebaseerd op een voor een moment of periode kenmerkende meetbare eigenschap van het sediment, bijvoorbeeld de Cesium-piek die het gevolg was de Tsjernobyl-ramp in 1986 (Zwolsman e.a., 1993).

De gerapporteerde waarden voor de sedimentatiesnelheden in het land van Saeftinghe, op basis van sedimentatiesnelheden bedragen 0,5 – 3,0 cm jaar (periode 1988-1998, Stapel en de Jong, 1998) en 10-38 mm/jaar (periode 1997-2002, Stikvoort en de Jong, 2003).

Verschil tussen gemeten sedimentatiesnelheid en uit de hoogteligging berekende sedimentatiesnelheid

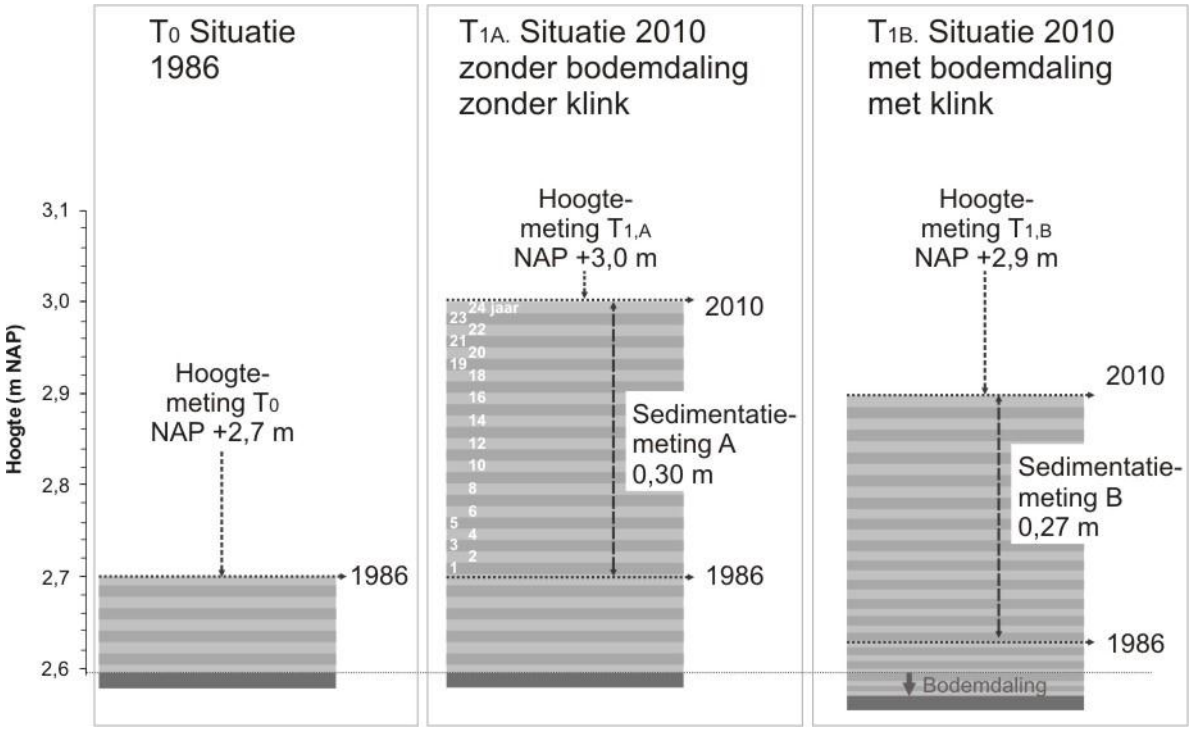
De sedimentatiesnelheid die wordt berekend met metingen van de hoogteligging levert voor Saeftinghe altijd een lager sedimentatievolume per jaar dan de sedimentatiemetingen, vanwege het optreden van bodemdaling en klink (compactie). In de onderstaande figuur 6.5 is dit geïllustreerd met een schematische dwarsdoorsnede van een opeenstapeling van sedimentlaagjes (een laag per jaar) waarbij ten opzichte van de uitgangsituatie in het ene geval (T_{1A}) geen bodemdaling en klink optreedt en in het ander geval (T_{1B}) wel. De bodemdaling is aangegeven met de pijl en de klink is zichtbaar in de naar beneden toe afnemende

laagdikte van de afzettingen in de rechterfiguur. Uit de getallen kunnen sedimentatiesnelheden worden berekend voor beide situaties:

Situatie T1A zonder bodemdaling en klink:
Hoogtemetingen: Gemeten sedimentatiesnelheid : NAP 3,0 m – NAP 2,7 m = 0,30 m in 24 jaar, oftewel 1,25 cm/jaar.
Sedimentatiemetingen: Gemeten hoogteverschil: 30 cm in 24 jaar, oftewel 1,25 cm/jaar.

Situatie T1B met bodemdaling en met klink:
Hoogtemetingen: Gemeten sedimentatiesnelheid : NAP 2,9 m – NAP 2,7 m = 0,20 m in 24 jaar, oftewel 0,83 cm/jaar.
Sedimentatiemetingen: Gemeten hoogteverschil: 27 cm in 24 jaar, oftewel 1,13 cm/jaar.

In deze voorbeeldsituatie met bodemdaling bedraagt het verschil tussen de sedimentatiesnelheid uit de hoogtemetingen en uit de sedimentatiemetingen 0,3 cm /jaar. Hoewel dit verschil in absolute termen niet groot lijkt, levert een analyse van de hoogtemetingen in dit geval een onderschatting van het sedimentatievolume van 36%.



Figuur 6.5 Voorbeeld van een sedimentkolom op de kwelder, met de uitgangssituatie (links), de doorsnede zonder (midden) en de doorsnede met klink en bodemdaling (rechts).

Sedimentsamenstelling
Waarschijnlijk bestaat een belangrijk deel van het sediment dat in het Land van Saeftinghe op de schorren wordt afgezet uit fijn sediment. Uit het proefschrift van Zwolsman (1999) is op te maken dat het schorsediment veel fijn sediment bevat: (in Zwolsman tabel 5.1) percentage <16 µm van gemiddeld 53% en 81%. In de geulen, waar volgens Houtekamer (1995) ongeveer de helft van de sedimentatie heeft plaatsgevonden wordt waarschijnlijk (fijn) zand afgezet.

Relatie met stortingen

In verschillende studies is een verband gelegd tussen de waargenomen snelle ophoging van het land van Saeftinghe en de stortingen van grote volumes baggerspecie bij het Konijneschor. Op basis van de metingen van de sedimentatiesnelheid op de schorren kon dit verband door Stapel en de Jong (1998) niet worden gevonden. Hierbij hoort de opmerking dat de grootste ophoging niet op het schor, maar in de geulen heeft plaatsgevonden (Storm en Pieters, 1994). De beperkte beschikbare gegevens van de hoogteligging maken een nieuwe analyse hiervan niet bijzonder zinvol, ondanks het veranderde stortbeleid.

Sedimentatiesnelheid in de balansen

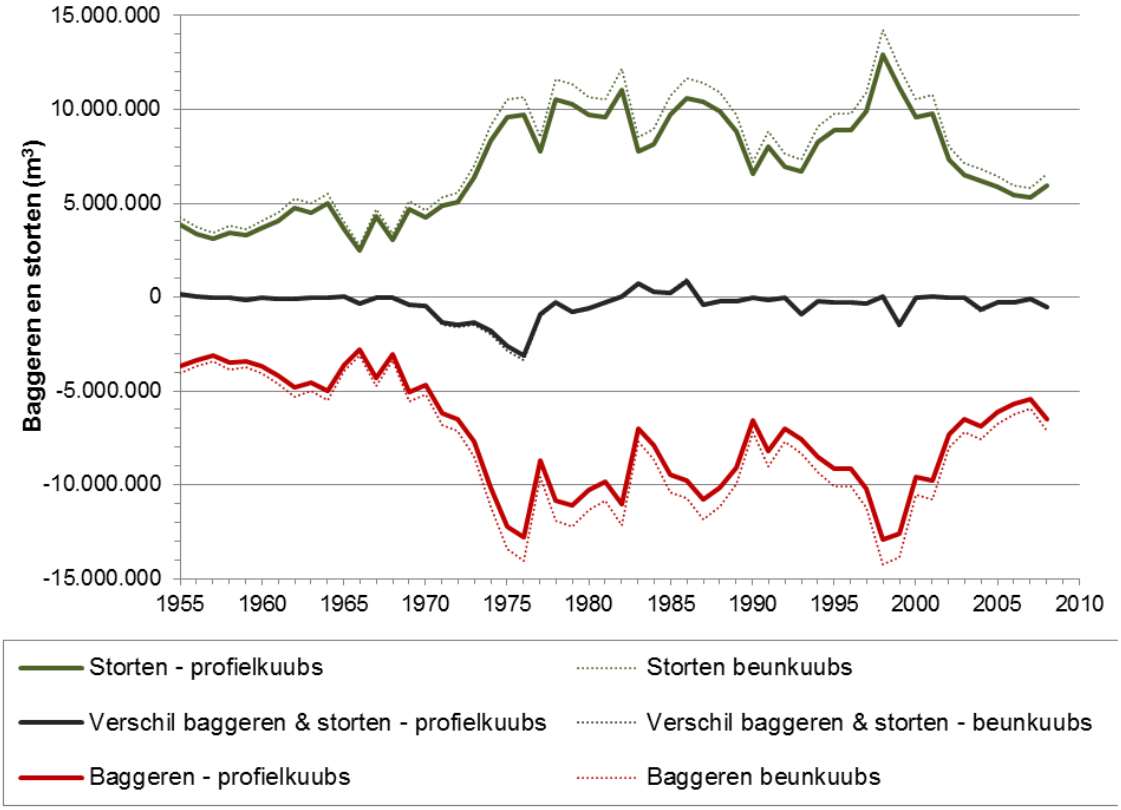
In de sedimentbalansen van Uit den Bogaard (1995), Nederbragt en Liek (2004) en Haecon (2006) wordt uitgegaan van een gemiddelde netto sedimentatie van 0,3 x 10^6 m^3/jaar, met een verwijzing naar Krijger (1993). Deze sedimentatiesnelheid komt overeen met een gemiddelde hoogteverandering van 1 cm/jaar. De in de sedimentbalansen gehanteerde waarde van 0,3 x 10^6 m^3/jaar voor de netto sedimentatie in het Land van Saeftinghe is laag, in vergelijking met andere berekeningen van het sedimentatievolume (0,55-6 x 10^6 m^3/jaar). Ook is deze waarde laag vergeleken met de gemeten sedimentatiesnelheden, waarin waarden van meer dan 1 cm/jaar algemeen worden gevonden. In Stapel en de Jong (1994) wordt expliciet gesteld dat de netto sedimentatie groter is dan de stijging van het gemiddelde hoogwater met circa 1 cm/jaar. Maar welke waarde gehanteerd zou mogen worden in de sedimentbalans is moeilijk vast te stellen op basis van de beschikbare gegevens. Een sedimentatiesnelheid van 0,6 x 10^6 m^3/jaar, oftewel gemiddeld 2 cm/jaar lijkt aan de hoge kant. Dat betekent namelijk dat er in een periode van 55 jaar (van 1955 tot 2010) gemiddeld 1,1 m sediment is afgezet. Vanwege het optreden van bodemdaling en klink hoeft deze sedimentatie van 1,1 m in het veld overigens niet resulteren in een hoogtetoename van 1,1m. Veel hogere sedimentatiesnelheden dan 0,6 x 10^6 m^3/jaar lijken wel uitgesloten. Vanwege de continuïteit is in de balansen in dit rapport 0,3 x 10^6 m^3/jaar gehanteerd, overeenkomend met eerdere balansen . In aanvulling daarop is gekeken naar het effect van hogere sedimentatiesnelheden op de sedimentbalans.

6.3 BAGGER- EN STORTVOLUMES

Figuur 6.6 toont de grafiek met de bagger- en stortvolumes in de Westerschelde. Deze volumes zijn ontleend aan de Rijkswaterstaat Zandbalans en komen tot 2004 overeen met de gegevens in de Haecon (2006) balans. De gerapporteerde ingreepvolumes zijn in deze balansen en ook in de voorliggende balans gedeeld door 1,1. Met deze factor is een 10% volumeverschil verdisconteerd dat ontstaat doordat het sediment in de beun van de baggerschepen, waar het volume wordt bepaald, minder compact gepakt is dan op de zeebodem (schematisch weergegeven in figuur 4.5). Dit staat wel bekend als het verschil tussen beunkuubs en profielkuubs.
Het is niet bekend in hoeverre de 10% volumeverschil werkelijk van toepassing is op alle gerapporteerde volumes. In het algemeen geldt dat schattingen van de nauwkeurigheid van de gerapporteerde volumes niet bekend zijn (Storm e.a., 1993). Ook is niet bekend in hoeverre de gebruikte volumes volledig zijn. Waarschijnlijk zijn stortingen die zijn uitgevoerd vanwege de verdieping of uitbreiding van haven en andere vaarwegen dan de Westerschelde , de verbreding van het Kanaal door Zuid-Beveland niet in de overzichten zijn opgenomen. Zonder nadere informatie over de wijze van inwinnen van de gegevens, de volledigheid, eventuele correcties en de wijze van rapporteren zijn hierover geen uitspraken te doen.

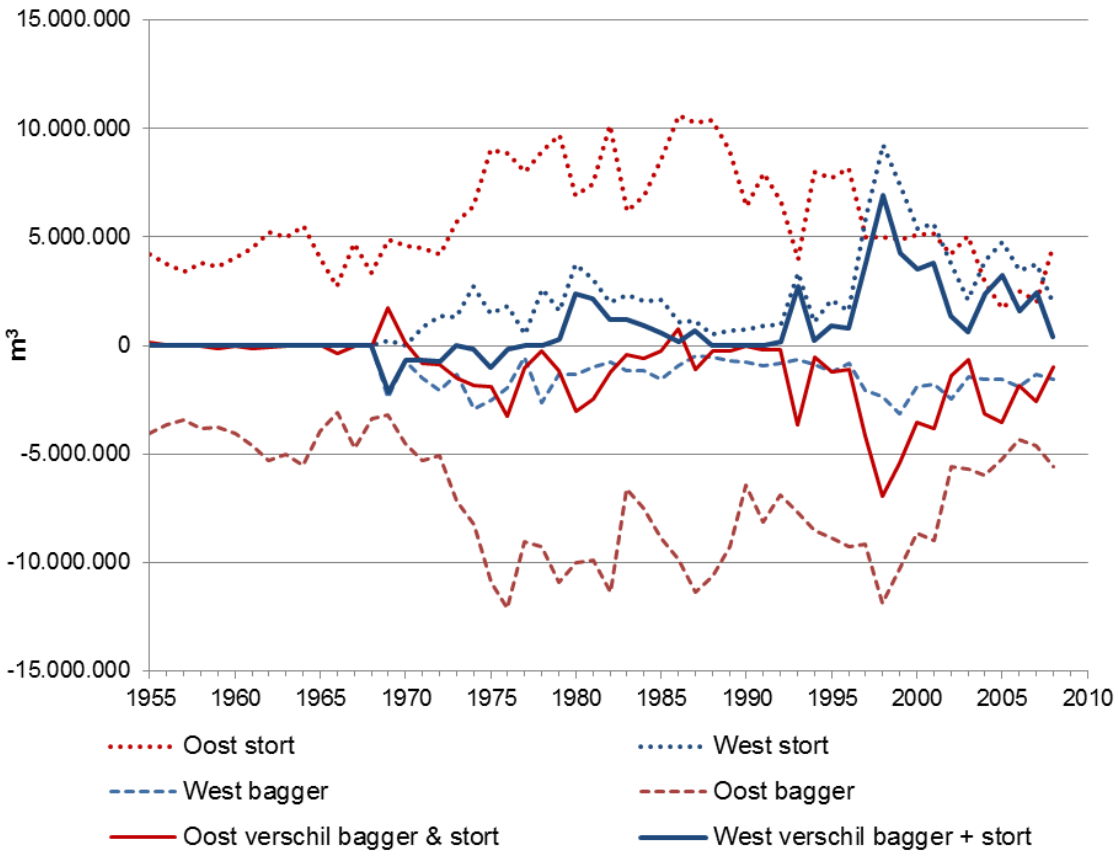
In figuur 6.6 is naast de gerapporteerde bagger- en stortvolumes ook het verschil tussen beide weergegeven. Dit verschil betreft niet de reguliere zandwinning, die in de volgende paragraaf wordt besproken. Waarschijnlijk betreft het in ieder geval deels voor onderhoud gebaggerd sediment dat naar Vlaanderen is afgevoerd.

In de grafiek in figuur 6.6 is te zien dat voor de periode van 1955 tot sprake was van het baggeren van relatief kleine volumes, tot 5 x 10^6 m^3 die ook werden gestort. Het volume liep van rond 1972 sterk op, zodat tot rond 2002 sprake was van bagger- en stortvolumes rond 10 x 10^6 m^3. Na 2002 nemen de volume dan weer af tot waarden boven de 5 x 10^6 m^3. In periode van 1970 tot ongeveer 1975 is sprake van een oplopend verschil in het gebaggerde en het gestorte volume, zodat sprake was van het netto onttrekken van sediment.



Figuur 6.6: Bagger en stortvolumes en het verschil voor de gehele Westerschelde in de periode 1955-2008

In de grafiek in figuur 6.7 zijn de bagger- en stortvolumes weergeven voor de oostelijke en de westelijk helft van de Westerschelde. Tot begin jaren '70 werd niet gebaggerd en gestort in het westelijke deel. De toename van het bagger- en stortvolume na ongeveer in 1972 die in de gehele Westerschelde optrad (figuur 6.6), vond vooral plaats in de oostelijke helft. Tot 1994 was sprake van een beperkte herverdeling van oost naar west en omgekeerd. Na 1994 namen de stortvolumes in de westelijke helft sterk toe. Deze stortingen betroffen sediment dat in het oosten werd gebaggerd.



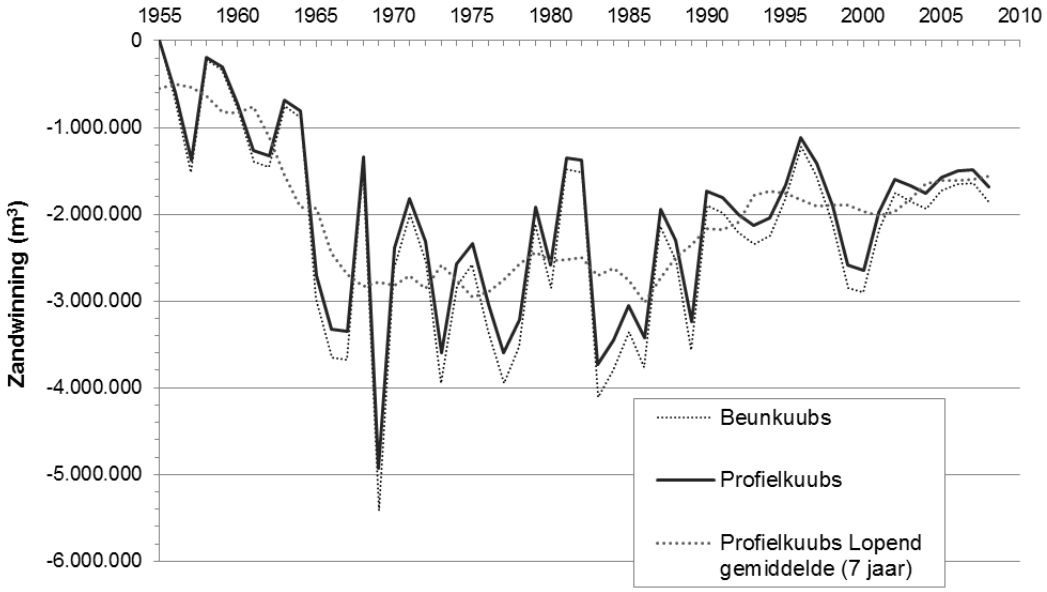
Figuur 6.7: Bagger en stortvolumes en het verschil voor de oostelijke en de westelijke helft van de Westerschelde in de periode 1955-2008 .

6.4 ZANDWINNING

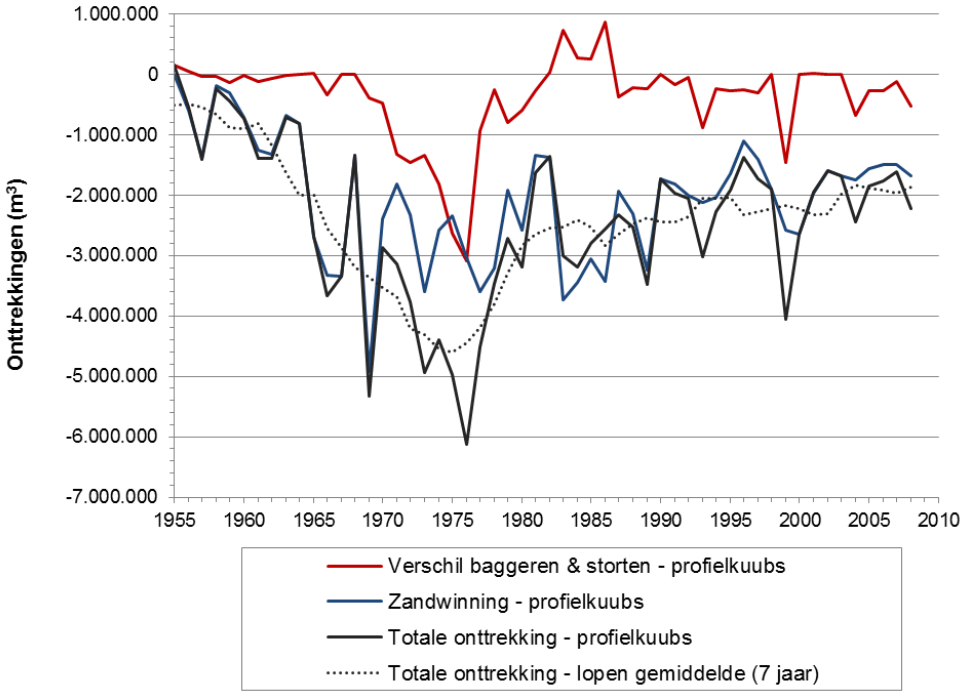
Voor de getallen over de zandwinning geldt hetzelfde als voor de getallen van het baggeren en storten. De getallen worden gecorrigeerd om de volumes in het schip te vertalen naar volumes op de bodem (delen door 1,1). De nauwkeurigheid van de opgave is niet bekend. Zonder nadere informatie over de wijze van inwinnen van de gegevens, de volledigheid, eventuele correcties en de wijze van rapporteren kan over de nauwkeurigheid van de getallen geen uitspraak worden gedaan. Figuur 6.8 is een grafiek met de gerapporteerde zandwinvolumes. Van jaar op jaar zitten er forse sprongen in de volumes, vandaar dat in de grafiek in figuur 6.8 ook een meerjaarsgemiddelde is opgenomen.
Tot begin jaren '70 was sprake van een toename van de zandwinvolumes. Bedenk hierbij dat zandwinning plaats heeft gevonden voor commerciële zandhandel èn voor dijkversterking èn het ophogen van (industrie)terreinen. Voor het Deltaveilig maken van de dijken en het ontwikkelen van industriegebieden (Sloehaven, Braakmanhaven) is in deze periode veel zand gebruikt. Van het begin van de jaren '70 tot halverwege de jaren '80 was het onttrekkingsvolume gemiddeld stabiel tussen de 2,5 en 3 x 10^6 m^3 per jaar. Vanaf halverwege de jaren '80 tot halverwege de jaren '90 was sprake van een geleidelijke afname tot rond de 1,8 x 10^6 m^3 per jaar.

In figuur 6.9 is een grafiek opgenomen waarin de zandwinvolumes zijn gecombineerd met het netto resultaat van het baggeren en storten (zie ook figuur 6.6). Vanwege de grote fluctuaties van jaar op jaar is ook hier een meerjaarsgemiddelde toegevoegd dat het verloop van de onttrekkingsvolume duidelijk weergeeft. Het totale onttrekkingsvolume vertoont iets andere ontwikkelingen dan het zandwinvolume.

Tot halverwege de jaren '70 was sprake van een snelle en sterke toename van het onttrekkingsvolume, van 0,5 x 10^6 m^3 per jaar in 1955 tot 10^6 m^3 per jaar tot ronde de 4,5 x 10^6 m^3 haverwege de jaren '70. Vanaf halverwege de jaren '70 tot begin jaren '80 was sprake van een snelle afname van de onttrekkingsvolumes. Na het begin jaren '80 tot heden nemen de onttrekkingsvolumes zeer geleidelijke af.



Figuur 6.8: Zandwinvolumes voor de gehele Westerschelde in de periode 1955-2008.

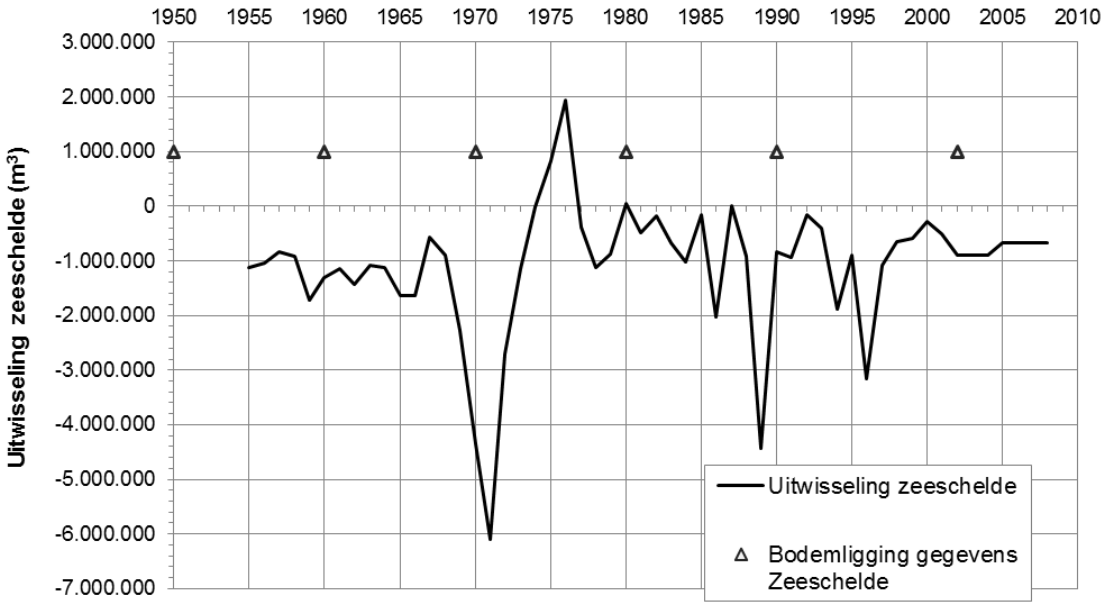


Figuur 6.9: Totale onttrekkingen voor de gehele Westerschelde in de periode 1955-2008.

6.5 ZEESCHELDE & MONDING VAN DE WESTERSCHELDE

In het voorliggende rapport wordt een sedimentbalans opgesteld voor de Westerschelde, zonder de Zeeschelde en het mondinggebied (zeewaarts van de lijn Vlissingen Breskens). Om een sedimentbalans op te stellen moet de uitwisseling van sediment over ten minste één rand van de Westerschelde worden gebruikt. Bij de Westerschelde wordt daarvoor altijd de uitwisseling met de Zeeschelde gebruikt[3]. In de sedimentbalans van Nederbragt en Liek (2004) is als basis aanname een uitwisseling van 0 m^3/jaar tussen Zeeschelde en Westerschelde opgelegd aan de balans. In Haecon (2006) zijn de gegevens gebruikt van de Zeeschelde over baggeren, storten en onttrekkingen en de metingen van de bodemligging, om een sedimentbalans van de Zeeschelde op te stellen (met een aanname over 0 m^3/jaar uitwisseling van zand ter hoogte van de Rupel).

In figuur 6.10 zijn in een grafiek de transporten van de Westerschelde naar de Zeeschelde weergegeven, zoals die zijn opgenomen in de Rijkswaterstaat Zandbalans. Deze getallen komen tot 2003 overeen met de getallen uit de Haecon (2004) balans. Voor de periode na 2003 zijn aannamen gedaan, die zijn gebaseerd op de onttrekkingsvolumes in de Zeeschelde. De grote pieken en dalen in de berekende transporten komen voort uit de jaarlijkse getallen voor het baggeren en storten. Omdat er slechts weinig gegevens over de bodemligging beschikbaar zijn, geeft deze 'piekerigheid' mogelijk een overdreven beeld van de variatie in de uitwisseling.



Figuur 6.10: Berekende randvoorwaarden over de rand van de Zeeschelde en Westerschelde (negatief is van de Westerschelde naar de Zeeschelde; naar Haecon 2006).

In de voorliggende studie is afgezien van het gebruik van de gegevens van de monding van de Westerschelde. In Nederbragt en Liek (2004) en Haecon (2006) is voor de monding een sedimentbalans opgesteld, waarin de bodemligging- en ingreepgegevens zijn gecombineerd. Uit een studie naar de morfologische ontwikkeling van de Voordelta en de monding van de Westerschelde (Cleveringa, 2008)

[3] Het opleggen van de uitwisseling van sediment tussen Westerschelde en Zeeschelde, om met de sedimentbalans de uitwisseling tussen Westerschelde en monding (import/export) te berekenen is een gewoonte, maar geen noodzaak. Het is ook mogelijk om de randvoorwaarden in de sedimentbalans aan de uitwisseling tussen Westerschelde en monding op te leggen, om daarmee de uitwisseling met de Zeeschelde te berekenen.

blijkt dat de volumeontwikkelingen in dit gebied gedomineerd kunnen worden door onnauwkeurigheden in de gegevens. Vanwege het grote oppervlak van de monding levert een kleine (structurele) afwijking in de hoogteligging een zeer grote schijnbare volumeverandering op. En omdat de meetfrequentie in deze gebieden lager lag dan in de Westerschelde, bepalen dergelijke schijnbare veranderingen de trends. Omdat ook rond de ingreepgegevens nog onduidelijkheden bestaan is besloten om de informatie over het mondingsgebied vooralsnog buiten de beschouwing te laten.

7 Sedimentbalans met 1 compartiment

7.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt de sedimentontwikkeling uit het voorgaande hoofdstuk gebruikt in een eenvoudige sedimentbalans om daarmee te achterhalen hoe de uitwisselingen met de omgeving van de Westerschelde heeft plaatsgevonden. Met deze sedimentbalans met één compartiment wordt duidelijk hoe sterk de berekende uitwisseling tussen de Westerschelde en de monding afhankelijk is van de gebruikte randvoorwaarden.

In de analyse van de sedimentontwikkeling zijn de sedimentuitwisseling met de havenbekkens en de effecten van bodemdaling van de ondergrond beschouwd als onderdelen van de plausibele variatie. Deze factoren worden daarom niet ondergebracht in de sedimentbalans. Wel zijn in de sedimentbalans opgenomen:

- Ontwikkeling van de sedimentvolumes (trends op basis van meetgegevens);
- Zandwinning en netto onttrekking door baggeren en storten;
- Sedimentatie op het Land van Saeftinghe;
- Transport van (en naar) de Zeeschelde.

Het resultaat van deze sedimentbalans bestaat uit de uitwisseling met de monding.

7.2 EÉN COMPARTIMENT EN HET BELANG VAN DE RANDEN

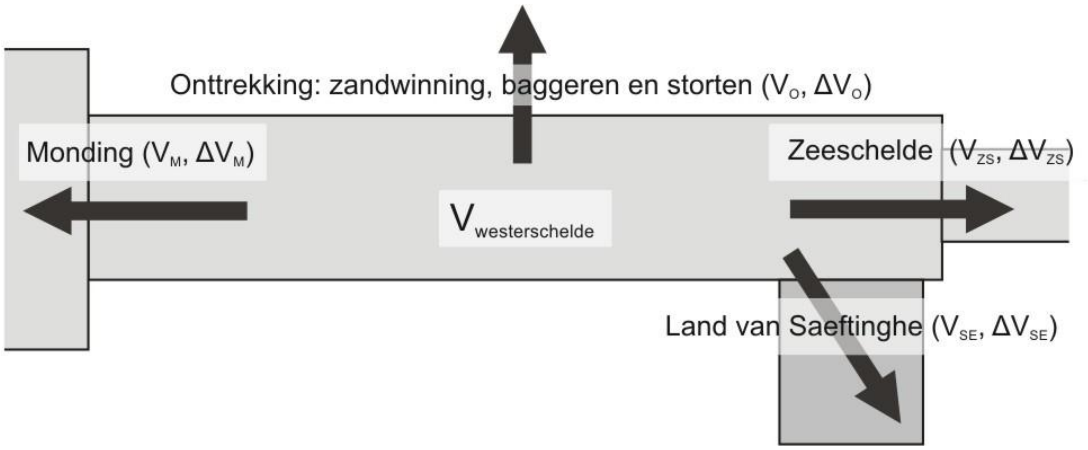
De basale sedimentbalans van de Westerschelde bestaat uit één compartiment voor de gehele Westerschelde, exclusief het Land van Saeftinghe. Dat betekent dat er drie randen zijn waarover sedimenttransport kan plaatsvinden (met de notatie voor het sedimentvolume V en de verandering daarin per tijdstap ΔV):

- Zeeschelde (V_{ZS}, ΔV_{ZS})
- Land van Saeftinghe (V_{SE}, ΔV_{SE})
- Monding (V_{M}, ΔV_{M})

Naast de uitwisseling over de randen vindt onttrekking van sediment plaats, die bestaat uit zandwinning en het verschil tussen baggeren en storten (V_{O}, ΔV_{O}). De schematische weergaven van deze balans met één compartiment is opgenomen in figuur 7.1. De ontwikkeling van het sedimentvolume per tijdstap (van één jaar) wordt beschreven door de onderstaande vergelijking:

$$V_{Westerschelde,\ t=n+1} = V_{Westerschelde,\ t=n} + \Delta V_{ZS} + \Delta V_{SE} + \Delta V_{M} + \Delta V_{O}$$

De ontwikkeling van het sedimentvolume van de gehele Westerschelde $V_{Westerschelde}$ is bekend, op basis van de waarnemingen en de daaruit herleidde trends, die zijn opgenomen in tabel 6.3. Ook de onttrekkingen ΔV_O zijn bekend, deze opgenomen in figuur 6.9. Verder zijn er randvoorwaarden gegeven voor de transporten over de rand met de Zeeschelde ΔV_{ZS} in figuur 6.10 en worden aannames gedaan over de sedimentatie in Saeftinghe ΔV_{SE}.



Figuur 7.1: Sedimentbalans voor de Westerschelde met één compartiment en de randen.

De uitwisseling met de monding is een uitkomst van deze sedimentbalans:

$$\Delta V_M = V_{Westerschelde,\ t=n+1} - V_{Westerschelde,\ t=n} - \Delta V_{ZS} - \Delta V_{SE} - \Delta Vo$$

Hieronder wordt één voor één bekeken welke aanname wat voor gevolgen heeft voor de uitwisseling met de monding (ΔV_M). Hiervoor zijn scenario's A tot en met F opgesteld, waarin steeds gevarieerd wordt met de verschillende trends en randvoorwaarden. Het scenario A, met vaste waarden voor alle invoeren is het vertrekpunt voor de berekeningen. De gebruikte waarden voor dit scenario en voor de andere scenario's zijn weergegeven in tabel 7.1. Hieronder worden de scenario's toegelicht

Tabel 7.1: Invoer voor de verschillende balansberekeningen in 10^6 m^3/per jaar.

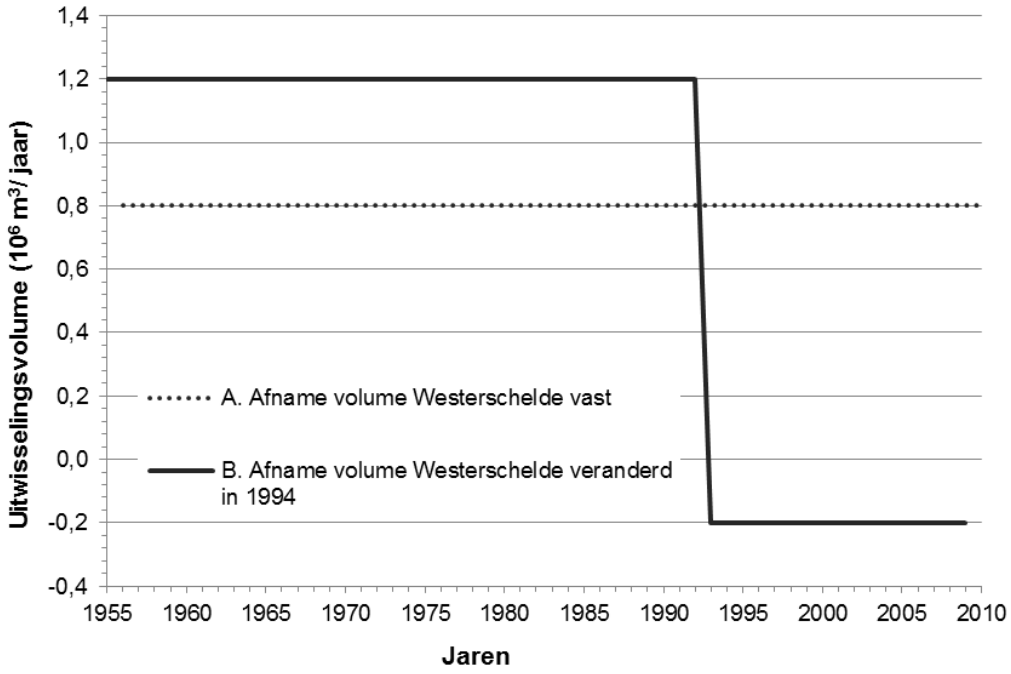
	A.	B.	C.	D.	E.	F.
Westerschelde volume verandering	-1,5	-1,1 (tot 1994) / -2,5 (vanaf 1994)	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5
Zandwinning	-1	-1	-1	-1	-1	Volgens grafiek
Netto sedimentatie Saeftinghe	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	Volgens grafiek	-0,3
Uitwisseling met Zeeschelde	-1	-1	-1,5 tot 0	Volgens grafiek	-1	-1

A.

In het meest eenvoudige scenario A in de sedimentbalans met één compartiment is sprake van vaste waarde voor de afname van het sedimentvolume van de Westerschelde. Uit de Westerschelde gaat jaarlijks 2.3 x 10^6 naar de Zeeschelde, Saeftinghe en zandwinning. Jaarlijks moet dan 0,8 x 10^6 m^3/jaar sediment van de monding naar de Westerschelde worden getransporteerd (import), zodat de balans sluit. In de grafiek in figuur 7.2 is dit weergegeven.

B. $V_{Westerschelde,\ t=n+1} - V_{Westerschelde,\ t=n}$

In scenario B zijn de berekende trends voor de van 1955 tot 1994 en van 1994 tot 2010 opgenomen. Dit leidt tot een aanvoer van de monding naar de Westerschelde van 1,2 x 10^6 m^3/jaar tot 1994 en een afvoer naar de monding van 0,2 x 10^6 m^3/jaar na 1994.

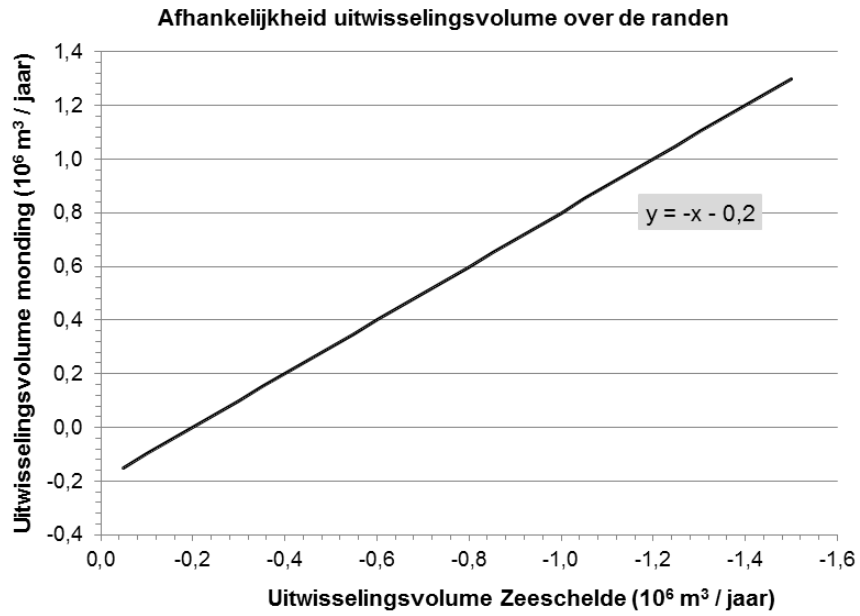


Figuur 7.2: Grafiek met de uitwisseling tussen Westerschelde en monding per jaar voor de scenario's A en B uit de sedimentbalans met een compartiment (positief is van de monding naar de Westerschelde).

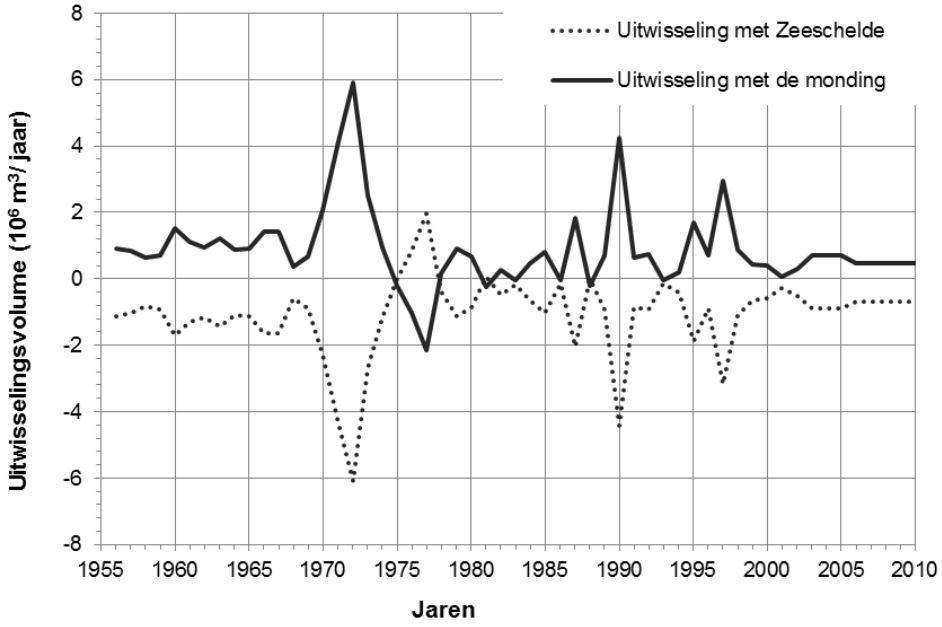
C. & D. ΔV_{ZS}

In de scenario's C en D is gevarieerd met het uitwisselingsvolume ΔV_{ZS} tussen Zeeschelde en Westerschelde. In scenario C varieert de waarde voor ΔV_{ZS} van -1,5 tot 0 x 10^6 m^3/jaar. De uitwisseling met de monding is hiermee één op één gecorreleerd.

In scenario D is de uitwisseling met de monding uit Haecon (2006) en de vigerende Rijkswaterstaat Zandbalans ingevoerd als randvoorwaarden voor het transport naar de Zeeschelde. Dit levert het gespiegelde patroon op aan de monding (figuur 7.4).



Figuur 7.3: Grafiek scenario C in sedimentbalans met één compartiment met de uitwisseling tussen Westerschelde en monding per jaar (positief is van de monding naar de Westerschelde) als functie van de uitwisseling met de Zeeschelde (negatief is van de Westerschelde naar de Zeeschelde).

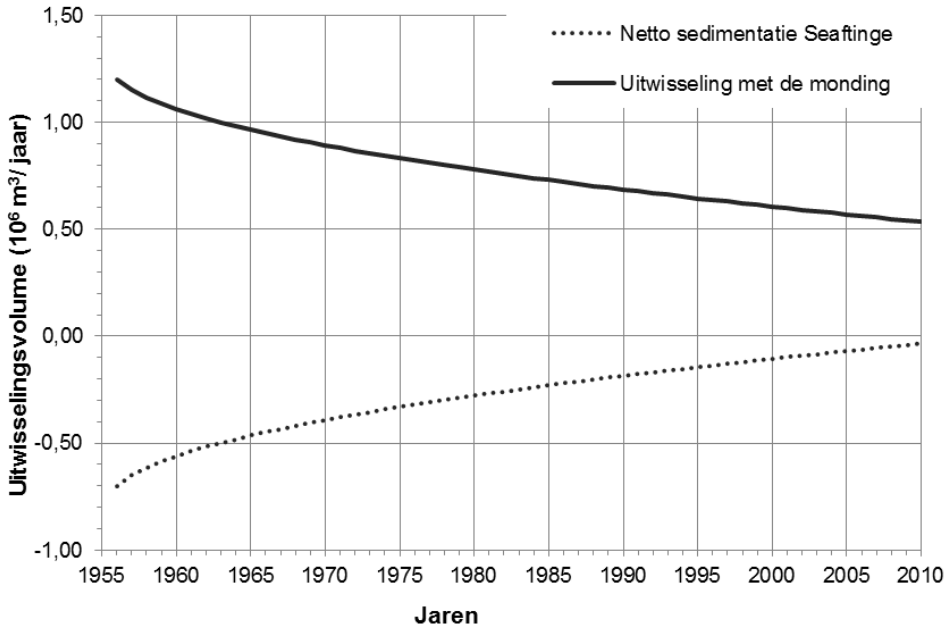


Figuur 7.4: Grafiek scenario D in sedimentbalans met één compartiment met de uitwisseling tussen Westerschelde en monding per jaar (positief is van de monding naar de Westerschelde) en de uitwisseling met de Zeeschelde (negatief is van de Westerschelde naar de Zeeschelde).

E. ΔV_{SE}

Het effect van veranderingen op de randen is bij dit lineaire model eenduidig en dit geldt ook voor veranderingen in de sedimentatie op het Land van Saeftinghe. De aanname zoals die tot nu toe wordt gehanteerd in sedimentbalansen is die van een constante sedimentatie met een waarde van 0,3 x 10^6 m^3/jaar. Omdat dit een constante is in de sedimentbalans levert dit geen veranderingen op in de richting van de uitwisseling met de monding. Als een andere constante sedimentatie wordt aangenomen voor

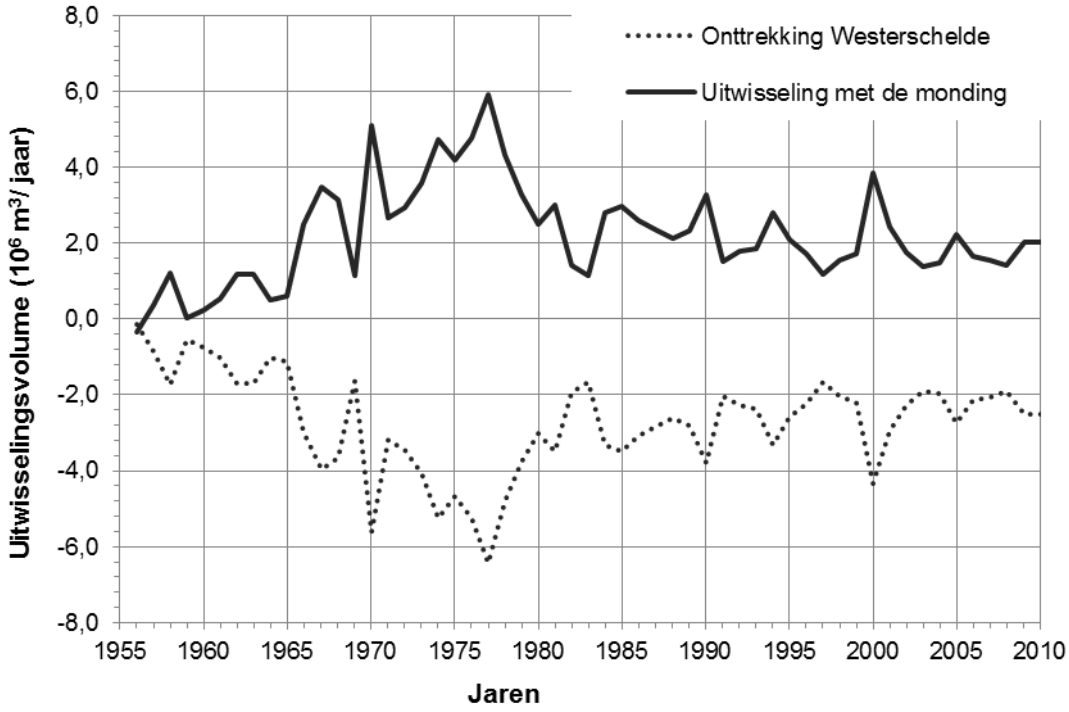
Saeftinghe verandert wel de waarde van de uitwisseling. Opleggen van een verandering in de sedimentatie levert wel een verandering in de uitwisseling met de monding, zoals is weergegeven in figuur 7.5. In de grafiek is te zien dat de sedimentatie in het Land van Saeftinghe in eerste instantie hoog is (0,7 x 10^6 m^3/jaar in 1955) om dan gaandeweg af te nemen (0,03 x 10^6 m^3/jaar in 2010). De uitwisseling met de monding spiegelt dit patroon. De getoonde afname is bedoeld als een voorbeeld, omdat er geen gegevens beschikbaar zijn waarop een echte verandering van de sedimentatiesnelheid kan worden gebaseerd. De getoonde afname, die eerst snel verloopt en daarna steeds langzamer, komt overeen met de beredeneerde ontwikkeling van de sedimentatie op schorren. Naarmate de hoogte van de schorren toeneemt en de frequentie van overstromen afneemt, zal waarschijnlijk de sedimentatie afnemen.



Figuur 7.5: Grafiek van scenario E met de uitwisseling tussen Westerschelde en monding per jaar (positief is van de monding naar de Westerschelde) en de uitwisseling met het land van Saeftinghe (negatief is van de Westerschelde naar Saeftinghe).

F. ΔVo

In scenario F zijn de jaarlijkse variërende netto onttrekkingen uit de Westerschelde (figuur 6.9) gehanteerd als randvoorwaarde. De berekende transporten van sediment van de monding naar de Westerschelde zijn weergegeven in figuur 7.6. Ook bij dit scenario zijn de berekende transporten naar de Westerschelde het spiegelbeeld van de netto onttrekkingen.

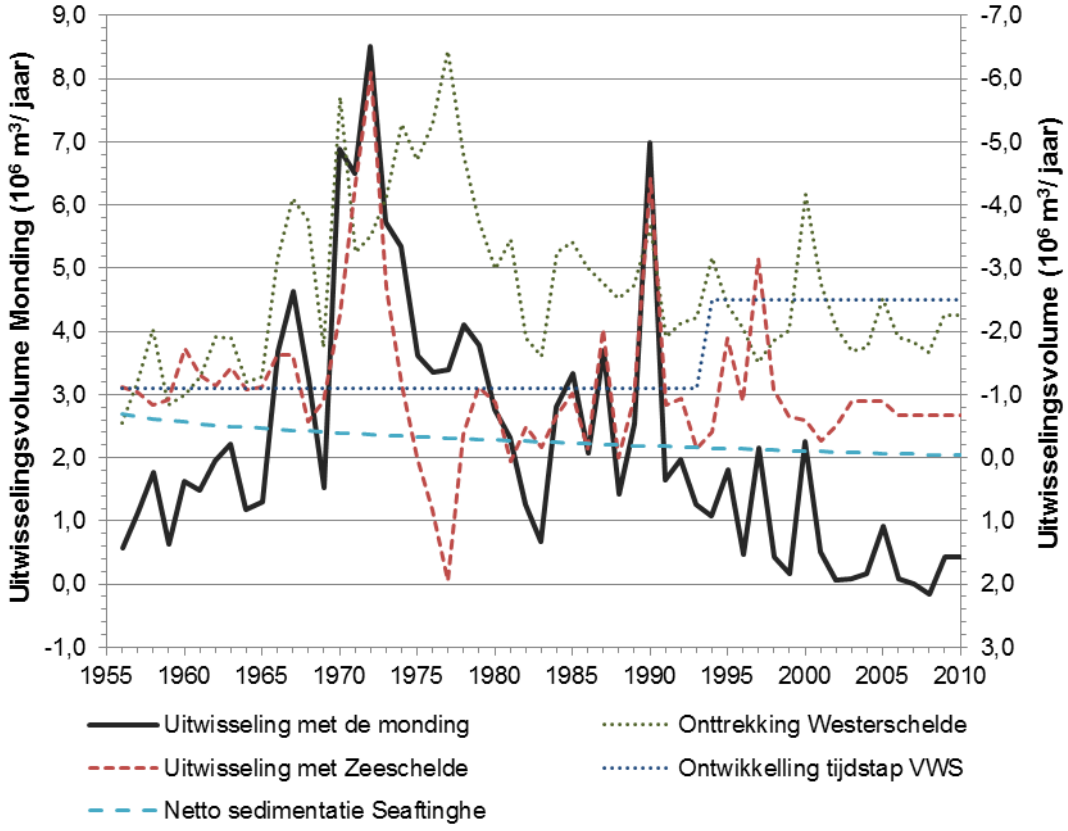


Figuur 7.6: Grafiek met de uitwisseling tussen Westerschelde en monding en de onttrekking van sediment per jaar (scenario F in sedimentbalans met één compartiment).

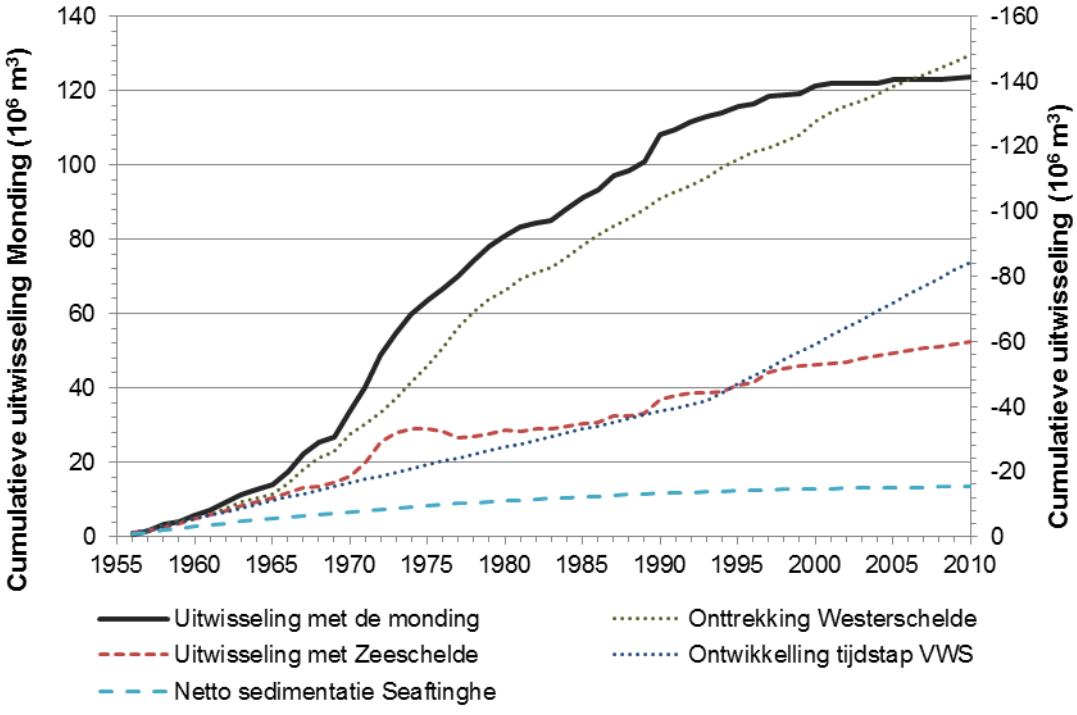
Het belang van de randen

In de bovenstaande voorbeelden is steeds met één van de randvoorwaarden gevarieerd die worden opgelegd aan de eenvoudige sedimentbalans met één compartiment. Duidelijk is dat een sterk variërende randvoorwaarde, zoals de onttrekkingen (scenario F) en de uitwisseling met de Zeeschelde (scenario D) een grote variatie kan introduceren in de uitwisseling met de monding. Het combineren van verschillende sterk variërende randvoorwaarden levert een nog complexer beeld op, omdat er dan verschillende effecten door elkaar gaan lopen. In figuur 7.7 is dit geïllustreerd met het berekeningsresultaat van de eenvoudige sedimentbalans, waarin alle randvoorwaarden variëren. Vooral de grote pieken uit de randvoorwaarden voor de onttrekkingen en de uitwisseling met de Zeeschelde domineren de uitkomst. De subtiele verandering in de sedimentatie in het Land van Saeftinghe wordt overvleugeld door de pieken en dalen. Dat geldt in iets mindere mate voor de sprong in het sedimentvolume van de Westerschelde in 1994, hoewel ook dit effect wordt gemaskeerd door de pieken en dalen in de grafiek.

Door in plaats van de jaar op jaar uitwisselingsvolumes in de grafiek de cumulatieve waarden weer te geven, zoals is gebeurd in figuur 7.8, ogen de ontwikkelingen veel 'gladder'. Maar met deze grafiek is het helemaal niet meer mogelijk om verbanden te leggen tussen veranderingen in de randvoorwaarden en de consequenties daarvan voor de sedimentuitwisseling. In de rapportage wordt deze cumulatieve weergave daarom niet gebruikt.



Figuur 7.7: Grafiek met de uitwisseling tussen Westerschelde en monding en de variërende randvoorwaarden per jaar (sedimentbalans met één compartiment).



Figuur 7.8: Grafiek met de cumulatieve uitwisselingsvolumes tussen Westerschelde en monding en de variërende randvoorwaarden per jaar (sedimentbalans met één compartiment).

7.3 KEUZE VOOR DE RANDVOORWAARDEN

In de voorgaande paragraaf zijn de gevolgen van de sterk variërende randvoorwaarden in de sedimentbalans gedemonstreerd. De 'piekerigheid' van de randvoorwaarden vertaalt zich direct door in de uitkomst van de balans. Het is door deze pieken niet meer goed mogelijk om structurele veranderingen in de sedimentbalans waar te nemen. Het is daarom wenselijk om te werken met gemiddelde of trendmatige randvoorwaarden, overeenkomstig trends die zijn gebruikt in de sedimentontwikkeling. Hieronder worden de gemiddelde randvoorwaarden gepresenteerd.

Uitwisseling met de Zeeschelde (ΔV_{ZS})

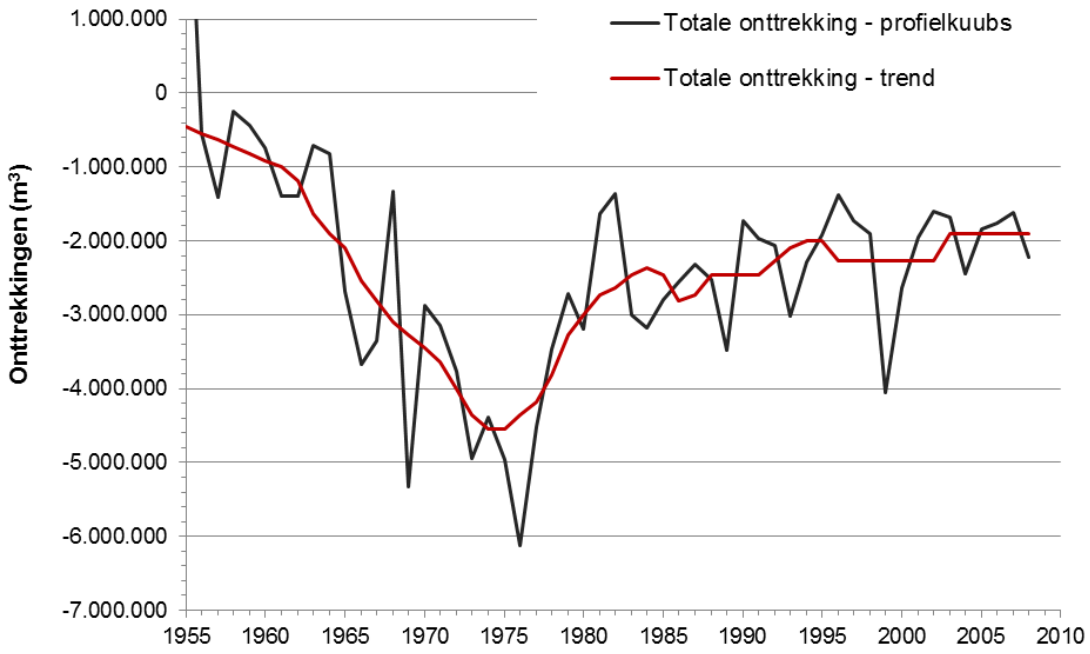
Uit de beschrijving in Haecon (2006) bij de uitwisselingsvolumes tussen Westerschelde en Zeeschelde is duidelijk dat de grote variaties daarin het gevolg zijn van het gebruiken van jaarlijkse bagger-, stort- en onttrekkinggegevens in combinatie met bodemligginggegevens die iedere tien jaar zijn ingewonnen. Hierover wordt opgemerkt: "*De jaarlijkse variatie van de zandbalans dient met de nodige voorzichtigheid gehanteerd te worden omdat deze gebaseerd is op geïnterpoleerde bathymetriegegevens die slechts om de 10 jaar beschikbaar zijn. Hierdoor kunnen tussentijdse bathymetrie variaties uitgevlakt zijn of eventueel zelfs versterkt tot uiting komen.*" En meer in algemene zin over de getallen uit de studie : "*Het is dan ook duidelijk dat de bekomen getallen op jaarbasis geen echt absolute waarde hebben en dus ook niet an sich kunnen gebruikt worden om conclusies en/of voorspellingen te formuleren. Hiervoor wordt best een gemiddelde over een aantal jaren genomen waardoor de fluctuaties eigen aan de werkwijze uitgemiddeld worden.*". In Haecon (2006) worden verschillende gemiddelde getallen gepresenteerd, waarvan in de voorliggende studie het getal van 1,0 x 10^6 m^3 per jaar is genomen, zonder veranderingen in trends.

Land van Saeftinghe (ΔV_{SE})

Voor het Land van Saeftinghe wordt vooralsnog vastgehouden aan de sedimentatie van 0,3 x 10^6 m^3 per jaar zoals die ook in andere sedimentbalansen (Uit den Bogaard, 1995, Nederbragt en Liek, 2004 en Haecon 2006). Ten opzichte van de andere randvoorwaarden en waargenomen sedimentontwikkelingen is de bijdrage van de sedimentatie in het Land van Saeftinghe relatief klein, zodat de keuze van deze randvoorwaarde geen noemenswaardige invloed heeft op de trends in de Westerschelde.

Onttrekkingen (ΔV_O)

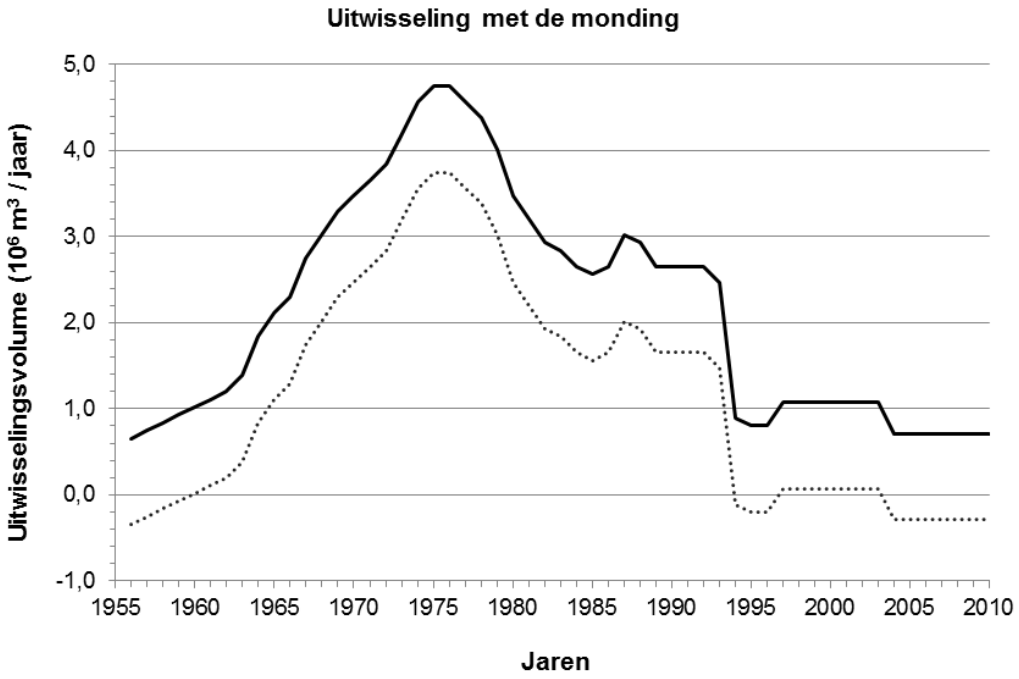
In figuur 7.9 zijn de onttrekkingen voor de Westerschelde als geheel weergegeven die zijn opgebouwd uit de zandwinning en het verschil tussen de bagger- en stortvolumes. De gegevens van de totale onttrekkingen zijn weergegeven, in combinatie met de trend die het lopende gemiddelde volgt en niet de pieken en dalen vertoond van de waarnemingen.



Figuur 7.9: Grafiek met de geschematiseerde totale onttrekkingen voor de gehele Westerschelde in de periode 1955-2008.

7.4 RESULTATEN

Invullen van de bovenstaande randvoorwaarden in de sedimentbalans met één compartiment levert een grafiek voor de uitwisseling met de monding die is opgenomen in figuur 7.10. De doorgetrokken lijn geeft aan dat met deze randvoorwaarden altijd sprake is van netto aanvoer van sediment van de monding naar de Westerschelde. De grote piek in het begin van de jaren '70 is het gevolg van de grote zandwinvolumes in die periode. De scherpe overgang in 1994 is het gevolg van de waargenomen trendverandering in de sedimentontwikkeling van de Westerschelde, van een afname van -1,1 x 10^6 m^3 naar een grotere afname van -2,5 x 10^6 m^3 per jaar. Door deze overgang uit te smeren over meerdere jaren zou het effect minder plotsklaps tot uitdrukking komen in de grafiek.
In figuur 7.10 is met een stippellijn ook het effect weergegeven van het hanteren van een randvoorwaarden van 0 m^3 per jaar sedimenttransport van en naar de Zeeschelde, zoals die ook is gehanteerd in Nederbragt en Liek (2004). Het patroon blijft dan hetzelfde, maar de waarden van de sedimentuitwisseling komen dan onder de nul te liggen. Dit is de aan discussie onderhevige overgang van import naar export. Zo'n overgang kan dus onder andere voortkomen uit de keuze voor de randvoorwaarden.



Figuur 7.10: Grafiek met de uitwisseling per jaar tussen Westerschelde en monding en trendrandvoorwaarden per jaar (sedimentbalans met één compartiment).

Samenvattend:

- De netto onttrekking in de Westerschelde voor de zandwinning domineert het berekende transport van de monding naar de Westerschelde;
- De trendbreuk in de ontwikkeling van het sedimentvolume van de Westerschelde leidt tot een scherpe afname van het sedimenttransport van de monding naar de Westerschelde;
- Het optreden van transport naar dan wel vanuit de Westerschelde wordt gestuurd door de randvoorwaarden.

8 Sedimentbalans voor oost en west

8.1 INLEIDING

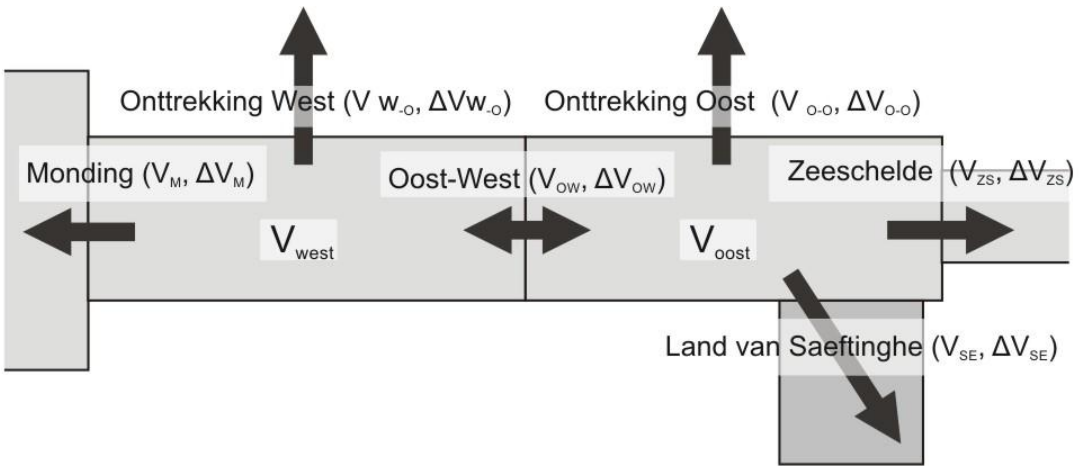
In dit hoofdstuk wordt voortgebouwd op de sedimentbalans met één compartiment uit het voorgaande hoofdstuk. De Westerschelde wordt nu beschouwd als twee compartimenten, een oostelijke en een westelijke helft, om daarmee te achterhalen hoe de uitwisseling van sediment tussen oost en west in de loop van de jaren is veranderd.
In aanvulling op de factoren die in het voorgaande hoofdstuk zijn benoemd wordt bij de sedimentbalans meegenomen:

- Netto verplaatsing door baggeren en storten;

Het resultaat van deze sedimentbalans bestaat uit de uitwisseling tussen oost en west.

8.2 TWEE COMPARTIMENTEN

Deze sedimentbalans van de Westerschelde bestaat uit twee compartimenten, exclusief het Land van Saeftinghe. Deze compartimenten zijn de oostelijke en de westelijke helft, overeenkomend met de indeling die is gebruikt in de analyse van de sedimentontwikkeling (figuur 2.2).



Figuur 8.1: Schematische weergave van de sedimentbalans voor de Westerschelde met twee compartimenten.

Per compartiment vinden er onttrekkingen plaats, die bestaan uit zandwinning en het verschil tussen baggeren en storten:

- Onttrekking Oost (V o-o, ΔVo-o);
- Onttrekking West (V w-o, ΔVw-o).

En er zijn vier randen zijn waarover sedimenttransport kan plaatsvinden:

- Zeeschelde (V_{ZS}, ΔV_{ZS});
- Land van Saeftinghe (V_{SE}, ΔV_{SE});
- Oost-West (V_{OW}, ΔV_{OW});
- Monding (V_{M}, ΔV_{M}).

De schematische weergaven van deze balans met twee compartimenten staat in figuur 8.1.
De ontwikkeling van het sedimentvolume per tijdstap (van één jaar) per compartiment wordt beschreven door de onderstaande vergelijkingen:

$$V_{Oost,t=n+1} = V_{Oost,t=n} + \Delta V_{ZS} + \Delta V_{SE} + \Delta V_{OW} + \Delta V_{O-O}$$

$$V_{West,t=n+1} = V_{West,t=n} - \Delta V_{OW} + \Delta V_{M} + \Delta V_{W-O}$$

Deze vergelijkingen zijn om te schrijven tot:

$$\Delta V_{OW} = V_{Oost,t=n+1} - V_{Oost,t=n} - \Delta V_{ZS} - \Delta V_{SE} - \Delta V_{O-O}$$

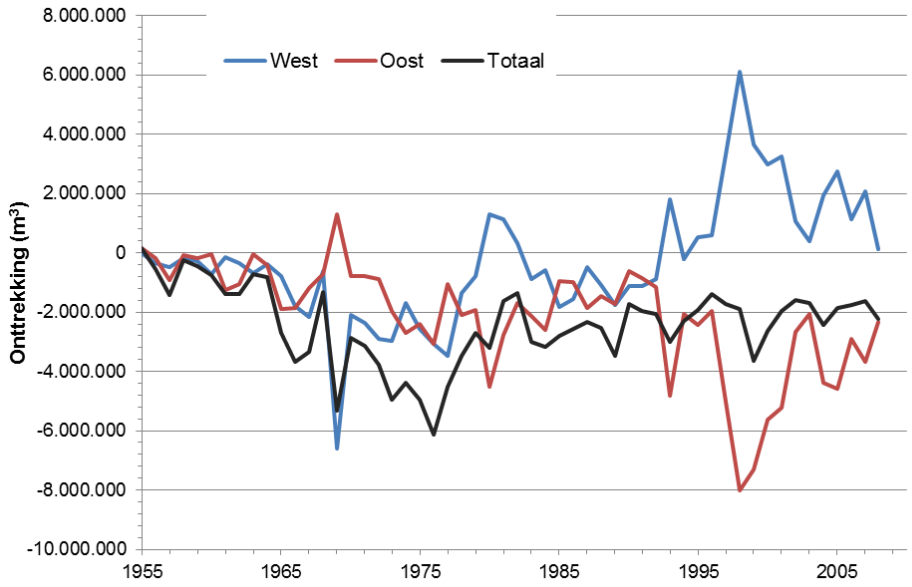
$$\Delta V_{M} = V_{West,t=n+1} - V_{West,t=n} + \Delta V_{OW} - \Delta V_{W-O}$$

De ontwikkeling van het sedimentvolume van de gehele Westerschelde is bekend, op basis van de waarnemingen en de daaruit herleidde trends, die zijn opgenomen in de tabellen 6.1 en 6.2. De getallen voor de randvoorwaarden voor de Saeftinghe en de Zeeschelde worden aan het voorgaande hoofdstuk ontleend. Voor de sedimentatie op het Land van Saeftinghe wordt uitgegaan van $-0{,}3 \times 10^6$ m^3 per jaar en voor de transporten naar de Zeeschelde van $-1{,}0 \times 10^6$ m^3 per jaar. In de volgende paragraaf worden de onttrekkingen aan oost en west beschouwd.

8.3 NETTO ONTTREKKINGEN OOST EN WEST

Onder de netto onttrekkingen wordt verstaan de zandwinning en het verschil tussen en baggeren en storten van sediment. Deze term is goed toepasbaar bij één compartiment, waar in de Westerschelde altijd sprake van onttrekking aan het systeem. Bij het hanteren van twee compartimenten is deze term soms ongelukkig, omdat er in bepaalde periode dermate veel sediment vanuit het ene aan het ander compartiment wordt toegevoegd dat deze de zandwinning ruimschoots overstijgt. Toch wordt de term “onttrekking" consequent gebruikt, ook bij positieve waarden die betrekking hebben op de netto aanvoer van sediment.
In figuur 8.2 zijn de netto onttrekkingen voor de twee deelsystemen weergeven, evenals de netto onttrekkingen voor het totaal. In deze figuur zijn de bagger- en stortvolumes uit figuur 6.7 en de zandwinvolumes (voor de gehele Westerschelde weergegeven in figuur 6.8) gecombineerd. In de perioden met grote verschillen in de netto waarden, bijvoorbeeld na 1994, heeft een grote herverdeling van oost naar west plaatsgevonden.

Het direct toepassen van de netto onttrekkingen, zoals die zijn weergegeven in figuur 8.2 levert grote sprongen op in de berekende transporten over de randen. In het voorgaande hoofdstuk is dit effect gedemonstreerd voor de zandwinning en daar is ook getoond dat het gebruik van een reeks waarin de pieken zijn uitgemiddeld een minder ‘piekerig’ resultaat oplevert. Ook voor de netto onttrekkingen voor west en oost is daarom gebruik gemaakt van gemiddelde reeksen.

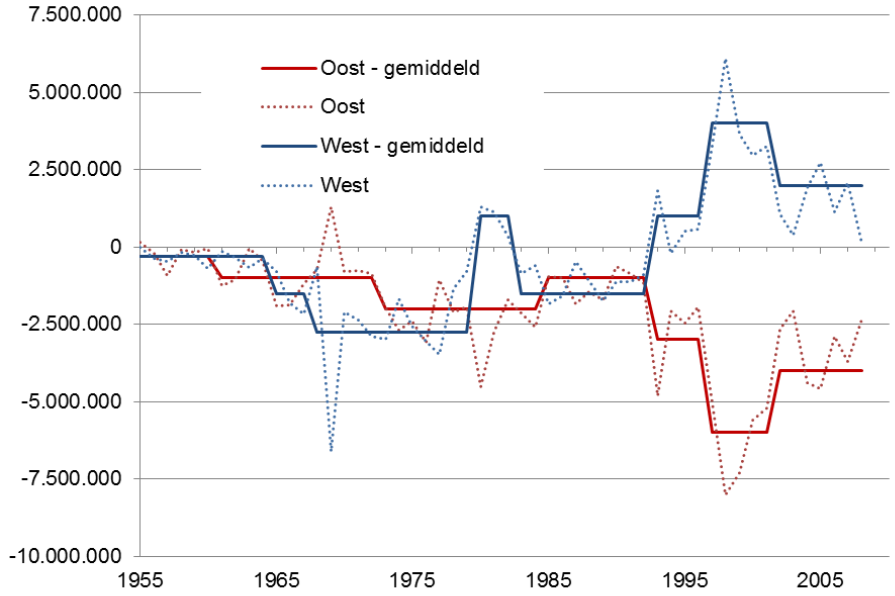


Figuur 8.2: Grafiek met de onttrekking (zandwinning en de het netto resultaat van baggeren en storten) voor de oostelijke en westelijke helft en het totaal voor de gehele Westerschelde.

Uitgangspunten voor deze gemiddelde reeksen zijn dat:

- Reeksen de ontwikkeling voor beide volgen;
- Trends in de netto onttrekkingen worden gevolgd;
- Cumulatieve volumes van oost, west en het totaal overeenkomen met de gemeten cumulatieve volumes.

In figuur 8.3 zijn de reeksen voor oost en west weergegeven, zoals die in de berekeningen zijn gehanteerd.

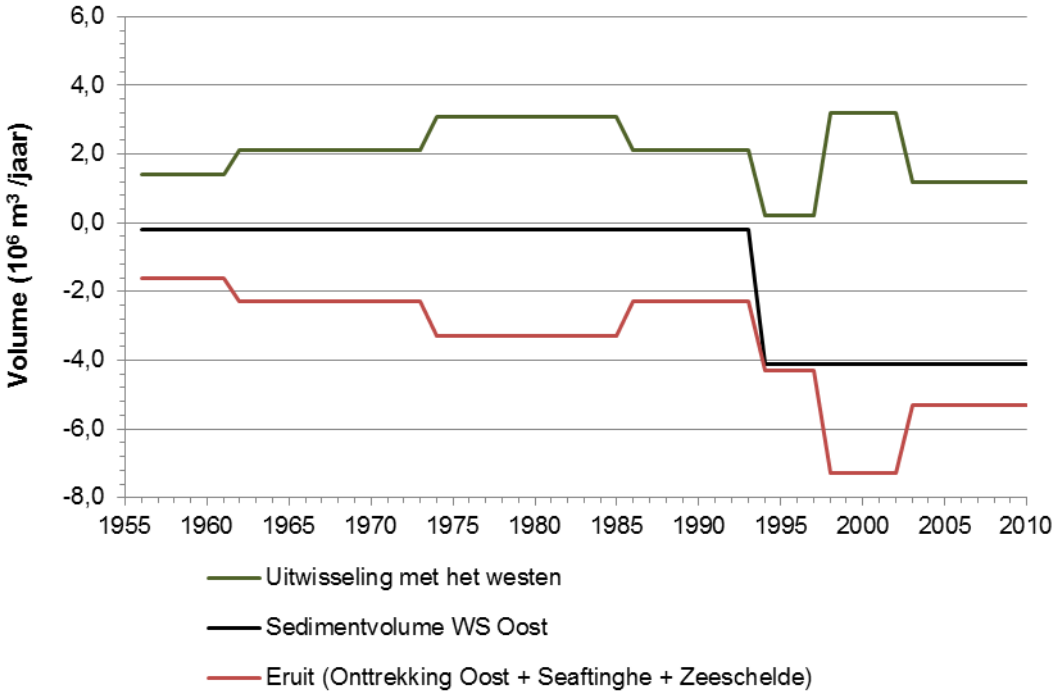


Figuur 8.3: Grafiek met de gemeten en gemiddelde onttrekking voor de oostelijke en westelijke helft van de Westerschelde.

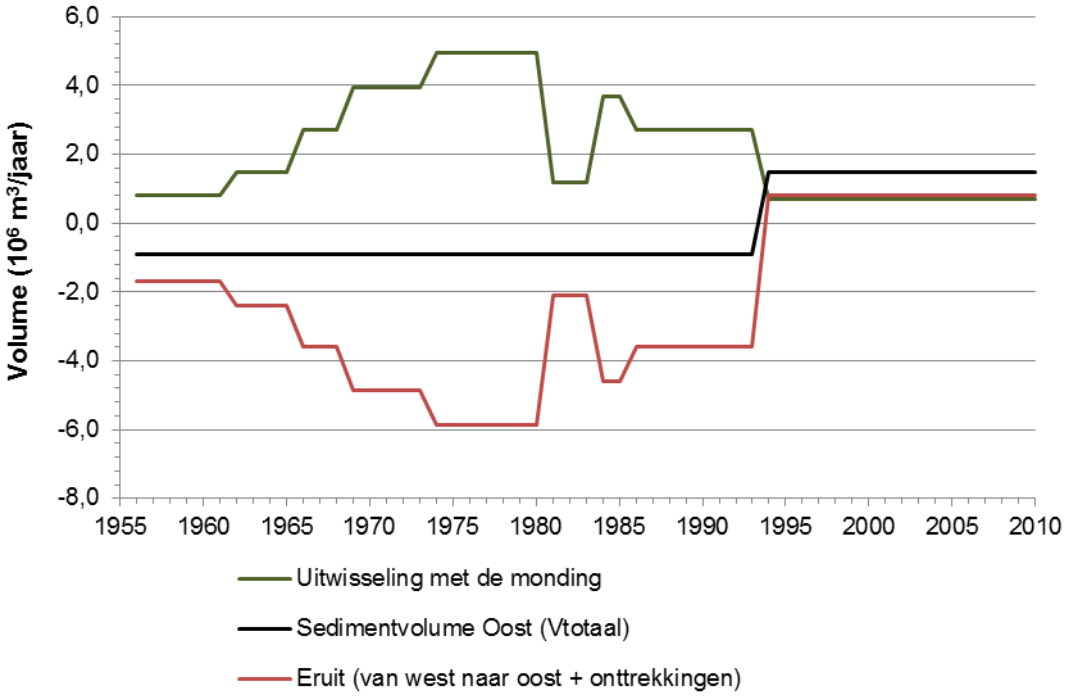
8.4 UITWISSELING TUSSEN OOST EN WEST

De berekeningen voor de sedimentbalans met twee compartimenten zijn uitgevoerd met de in figuur 8.3 getoonde randvoorwaarden voor de netto onttrekkingen. Voor de ontwikkeling van de sedimentvolumes van beide compartimenten zijn de getallen uit de tabellen 6.1 en 6.2 gehanteerd. Dat betekent dat voor de oostelijke helft is uitgegaan van een afname van het sedimentvolume van -0,2 x 10^6 m^3 per jaar tot 1994 en daarna een afname van -4,1 x 10^6 m^3 per jaar. Voor de westelijke helft is uitgegaan van een afname van -0,9x 10^6 m^3 per jaar tot 1994 en een toename van 1,5 x 10^6 m^3 per jaar daarna. Voor de sedimentatie op het Land van Saeftinghe wordt uitgegaan van -0,3 x 10^6 m^3 per jaar en voor de transporten naar de Zeeschelde van -1,0 x 10^6 m^3 per jaar.

De resultaten van de berekeningen zijn voor de oostelijke helft getoond in figuur 8.4 en voor de westelijke helft in figuur 8.5. De uitwisseling met het westen, zoals die wordt getoond in figuur 8.4, vertoont ten opzichte van de twee andere getoonde waarden (de sedimentontwikkeling en het sedimentvolume dat uit de oostelijke helft 'verdwijnt') weinig variatie. De waarden liggen tussen 0,2 en 3,2 x 10^6 m^3 per jaar. De oostelijke helft van de Westerschelde ontvangt volgens de berekeningen met deze randvoorwaarden altijd een transport van sediment vanuit de westelijke helft. Nota bene, dit transport van west naar oost komt bovenop het verplaatsen van sediment door het baggeren en storten. De laagste waarden voor het transport van sediment vanuit het westen treden op in de periode na 1994, direct na de trendbreuk in de ontwikkeling van het sedimentvolume en juist voor de periode met grote netto onttrekkingen.

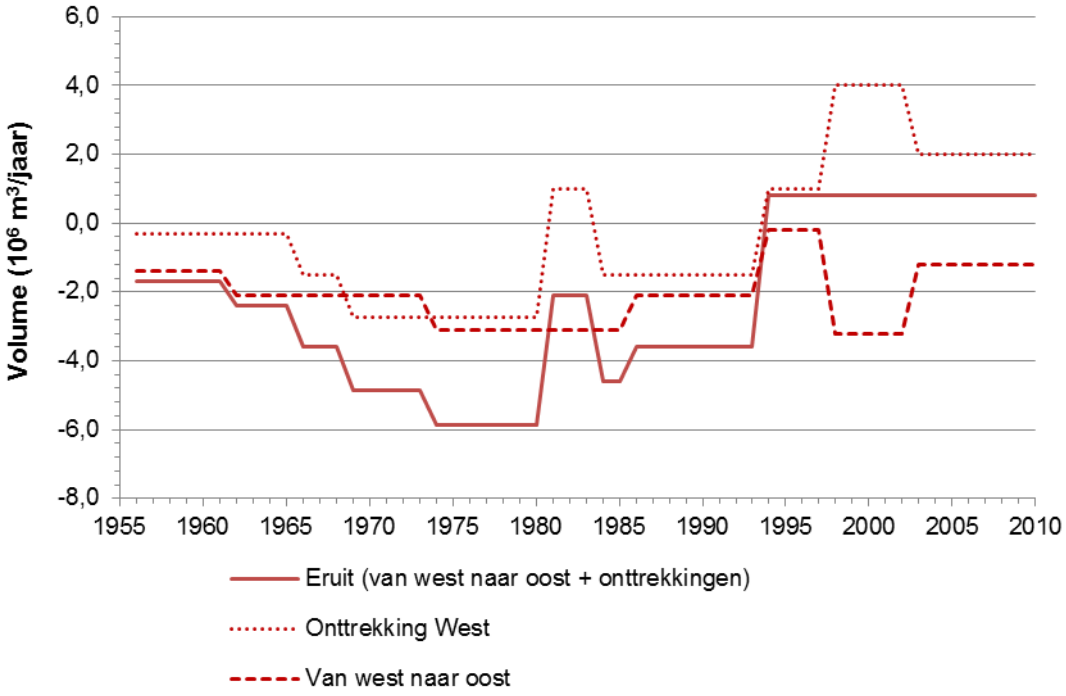


Figuur 8.4: Grafiek van de jaar op jaar ontwikkeling van de oostelijke helft van de Westerschelde met de berekende uitwisseling tussen oost en west (positief is van west naar oost), de trendmatige ontwikkeling van het sedimentvolume en de onttrekkingen en transporten naar aangrenzende compartimenten.



Figuur 8.5: Grafiek van de jaar op jaar ontwikkeling van de westelijke helft van de Westerschelde met de berekende uitwisseling met de monding (positief is van de monding naar de Westerschelde), als functie van de waargenomen ontwikkeling van het sedimentvolume en de onttrekkingen met het transport naar de oostelijke helft.

De uitwisseling met de monding, zoals die is weergegeven in Figuur 8.5, laat grotere verschillen in de waarden zien, van 0,8 tot 4,9 x 10^6 m^3 per jaar. Met de gehanteerde uitgangspunten is er dus altijd sprake van sedimenttransport van de monding naar de Westerschelde, maar de omvang ervan varieert. De combinatie van het volume sedimentvolume dat uit de westelijke helft 'verdwijnt' en de verandering van de sedimentinhoud, met de trendbreuk rond 1994, levert de sterke variaties in de transporten van de monding naar de westelijke helft van de Westerschelde.
Op hoofdlijnen komt de berekende ontwikkeling van de uitwisseling met de monding uit het model met twee compartimenten overeen met de uitkomsten van het model met een compartiment (figuur 7.10). De toename in de jaren '70 is het gevolg van de toename in de zandwinning en de sprong in 1994 gaat gelijk op met de waargenomen ontwikkeling van het sedimentvolume van de Westerschelde.
De verschillen tussen de uitkomsten zijn het gevolg van de herverdeling van sediment binnen de Westerschelde, in de zandbalans met twee compartimenten. De vlakke curve na 1994 betekent niet dat er na deze periode niets verandert. In figuur 8.6 is zichtbaar dat weliswaar de factor 'eruit' voor de periode na 1994 constant is met +0,8 x 10^6 m^3 per jaar (en de naam de lading niet helemaal dekt, omdat dit sediment aan de westelijke helft wordt toegevoegd), maar dat de twee factoren waaruit deze bijdrage is opgebouwd variëren. De onttrekkingen nemen in 1998 toe tot +4,0 x 10^6 m^3 per jaar, omdat in de periode veel sediment dat in het oosten wordt gebaggerd in het westen wordt gestort. Dat vertaalt zich ook in een groot tegengesteld transport van west naar oost. De balans van deze verplaatsing is neutraal en dat verklaart de constante 'eruit' na 1994.



Figuur 8.6: Grafiek van de jaar op jaar sedimentvolumes uit de westelijke helft (eruit) en de twee bijdragende factoren daarin: de sedimentonttrekkingen en het berekende transport vanuit het westen naar het oosten.

Gevoeligheid

De sprongen die het gevolg zijn van de scherpe overgang in de trends in de sedimentvolumes van de Westerschelde zouden meer geleidelijk worden, wanneer de overgang wordt uitgesmeerd over een periode van enkele jaren. Dit ligt op basis van de waarnemingen aan de sedimentvolumes meer voor hand voor de westelijke helft dan voor de oostelijke helft. Weliswaar zou een geleidelijke overgang beter ogen, maar de uitkomsten van de berekeningen veranderen hierdoor niet wezenlijk. De bandbreedte in de uitwisseling van west naar oost en van de monding naar west blijft hetzelfde.

Variëren met de randvoorwaarden van de transporten naar de Zeeschelde en naar Saeftinghe levert vergelijkbare figuren als in het voorgaande hoofdstuk. Een lagere uitwisseling met de Zeeschelde betekent dat het patroon in de transporten precies hetzelfde blijft, maar dat er in plaats van transport van de monding naar de Westerschelde ook omgekeerd transport plaatsvindt (conform figuur 7.10). Het gebruik van de 'piekerige' waarden voor de rand met de Zeeschelde levert dezelfde piekerigheid in de berekende transporten over de randen, maar biedt daarmee geen alternatieve verklaring voor de ontwikkelingen. Een afnemende sedimenttoevoer naar het Land van Saeftinghe, in plaats van de gebruikte constante aanvoer van 0,3 x 10^6 m^3 per jaar levert een kleine modulatie op van de getoonde ontwikkeling, maar veroorzaakt geen trendbreuk of een ander patroon in de transporten.

Het gebruik van andere randvoorwaarden met variaties met een plausibele omvang bieden geen alternatieve verklaringen voor de waargenomen ontwikkelingen en veranderingen in de westelijke en oostelijke helft van de Westerschelde. Ten opzichte van de andere variaties (baggeren, storten en zandwinning) zijn de bijdrage van deze randvoorwaarden relatief klein.

Resumerend:

Voortbordurend op de uitkomsten van de sedimentbalans met één compartiment levert de sedimentbalans met twee compartimenten een aantal *verfijningen en aanvullingen*:

- De netto onttrekking *in de westelijke helft* van de Westerschelde tot de jaren negentig voor de zandwinning domineert het berekende transport van de monding naar de Westerschelde;
- De trendbreuk in de ontwikkeling van het sedimentvolume van de Westerschelde leidt tot een afname van het sedimenttransport van de monding naar de Westerschelde;
- Het optreden van transport naar, dan wel vanuit, de Westerschelde wordt *met name* gestuurd door de randvoorwaarden;
- De berekende uitwisseling van sediment van west naar oost is relatief constant;
- De trendbreuken in de ontwikkelingen van het sedimentvolume gaan gelijk op met veranderingen in de netto ingrepen, specifiek, met het in het westen storten van in het oosten gebaggerde specie (rond 1994).

9 Zand- en Slibbalans

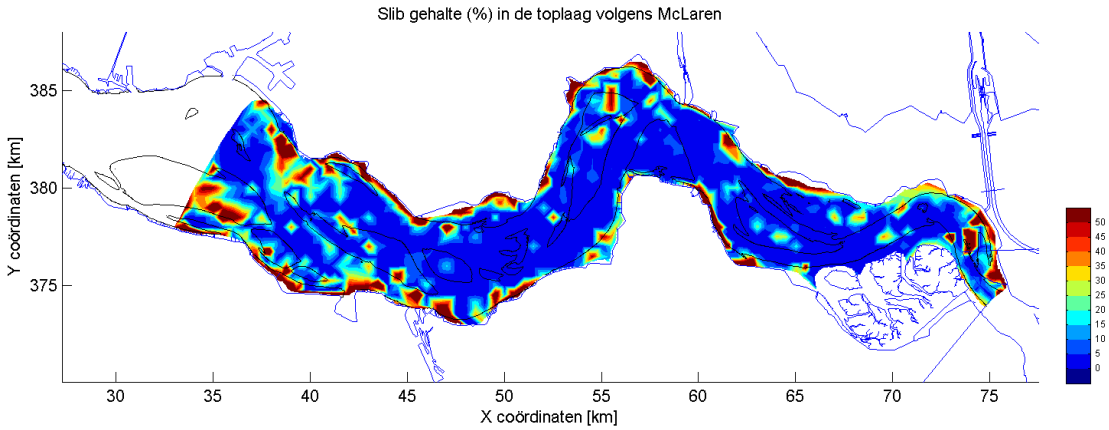
9.1 INLEIDING

In de voorgaande hoofdstukken is steeds gesproken over *sediment*balansen voor de Westerschelde. In deze balansen is het volume aan sediment beschouwd, zonder een onderscheid te maken naar zand dan wel slib. Overigens zijn de bestaande *zand*balansen van de Westerschelde (onder andere Nederbragt Liek, 2004, Haecon, 2006, en de vigerende Rijkswaterstaat Zandbalans) in feite sedimentbalansen of nog specifieker volumebalansen. In deze bestaande balansen wordt het volume zand gelijkgesteld aan het sedimentvolume.
Erosie, transport en sedimentatie van zand verloopt anders dan dat van slib. Daardoor komt slib op andere plekken in het estuarium tot afzetting dan zand. Ook de aanvoer van zand en slib langs de kust en uit het achterland verschilt. Deze verschillen komen niet tot uitdrukking in een sedimentbalans. In dit hoofdstuk worden de gescheiden zand- en slibbalansen gepresenteerd voor de Westerschelde, op de ruimtelijke schaal van de macrocellen. Deze gescheiden balans is afkomstig uit het rapport 'De rol van het slib in de sedimentbalans van de Westerschelde' (LTV V&T rapport 3, LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013). In dat rapport staat naast een volledige beschrijving van de gevolgde methoden ook een beknopt overzicht van bestaande slibbalansen. In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van de gehanteerde methoden en van de uitkomsten uit het LTV V&T rapport 3, (LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013) en wordt een vergelijking gemaakt met de uitkomsten uit de voorgaande hoofdstukken.
De uitkomst van de zand- en slibbalans zijn transportpatronen die voor zand en slib duidelijk verschillen. Deze transportpatronen voor en zand en slib zijn waarschijnlijk beter toe te passen voor de vergelijking met numerieke modelsimulaties dan de sedimenttransporten.

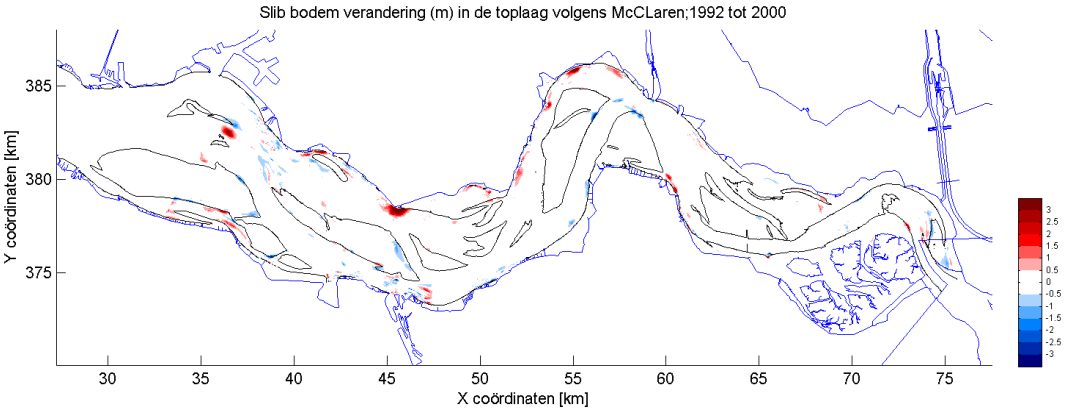
9.2 STRUCTURELE SEDIMENTATIE VAN SLIB

Het slibgehalte in de bodem van de Westerschelde is gemeten in de jaren '70 (de Looff, 1978 en 1980) en in de jaren '90 (McLaren-kartering, gegevens via Rijkswaterstaat). Een kaart met de geïnterpoleerde slibgehalten volgens de metingen van McLaren is weergegeven in figuur 9.1. Het slibgehalte wordt, zoals gebruikelijk, weergegeven als een gewichtspercentage. De slibgehaltes in deze McLaren-kaart zijn relatief hoog vergelijken met die van de Looff (1978 en 1980) en ook vergeleken met andere lokale bepalingen. De hoge percentages zijn waarschijnlijk het gevolg van verschillen in de voorbehandeling en de meetmethode ten opzichte van de andere metingen (Zwarts, 2004). Gebieden met hoge slibpercentages worden aangetroffen op de slikken langs de oevers van de Westerschelde, op delen van de platen en in sommige geulen.
Voor de zand- en slibbalans zijn alleen die gebieden van belang waar structureel sedimentatie dan wel erosie van slib plaatsvindt. Die gebieden zijn in beeld gebracht door erosie- en sedimentatiekaarten (van verschillende perioden) te vermenigvuldigen met de kaart met slibpercentages. De aanname die daarbij wordt gehanteerd is dat het gewichtspercentage slib wordt gebruikt als volumepercentage slib (dit is een

voorzichtige aanname). Voor de periode 1992-2000 is het resultaat weergegeven in figuur 9.2, met daarin het slibvolume. In de kaart overheerst het rood van sedimentatie, hoewel lokaal ook sliberosiegebieden zichtbaar zijn. Ook voor twee andere perioden (1980-1992 en 2000-2010) zijn dergelijke kaarten gemaakt, steeds met dezelfde kaart met slibpercentages als invoer, maar met een andere verschilkaart. Door de drie kaarten te vergelijken wordt duidelijk dat in twee gebieden structureel sedimentatie van slib plaatsvindt, namelijk het Middelgat (de nevengeul in macrocel 4) en het Vaarwater langs Hoofdplaat (mesocel 2). In macrocellen 6 en 7 blijkt consequent erosie van slib plaats te vinden.



Figuur 9.1: Gemeten slibpercentage volgens McLaren.



Figuur 9.2 Slibvolumeverandering voor de periode 1992-2000.

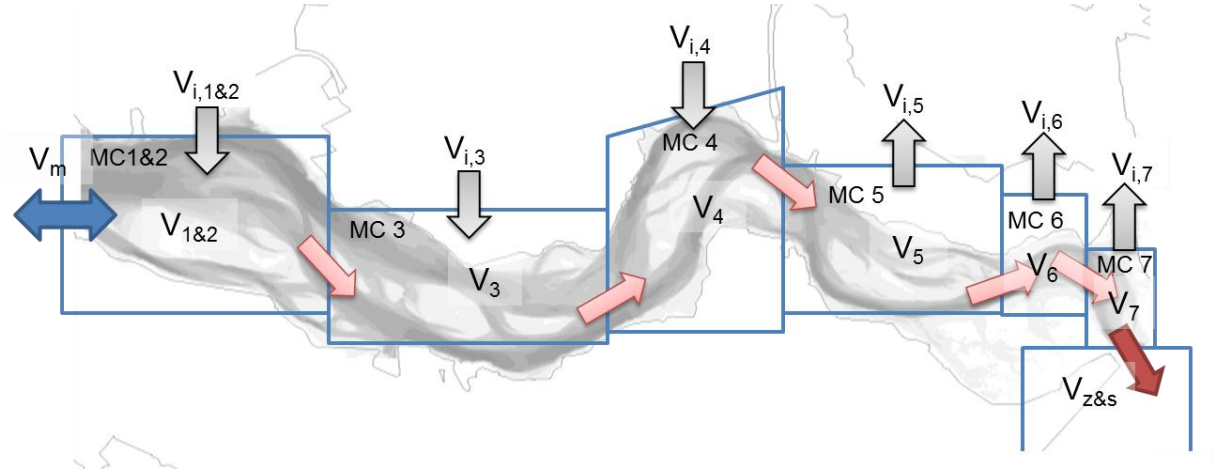
De getallen die uit de kaarten volgen zijn niet zonder meer bruikbaar om toe te passen in een zand- en slibbalans. Op basis van de kennis van de sedimenterende en eroderende delen van de Westerschelde is voor de macrocellen een schatting gemaakt van de bijdrage van slib, voor gebruik in de zand- en slibbalans:

- Macrocel 1. Geen bijdrage slib aan de sedimentatie en de erosie.
- Mesocel 2. Constante sedimentatie, uitgangspunt is een vaste procentuele volumebijdrage van slib van 10%.
- Macrocel 3. Geen bijdrage slib aan de sedimentatie en de erosie.
- Macrocel 4. Constante sedimentatie in het Middelgat van 1,7 x 10^6 m^3/jaar, uitgangspunt is een vaste procentuele volumebijdrage van slib van 10%.

- Macrocel 5. Geen bijdrage slib aan de sedimentatie en de erosie.
- Macrocel 6 en 7. Constante erosie, uitgangspunt is een vaste procentuele volumebijdrage van slib van 10%.

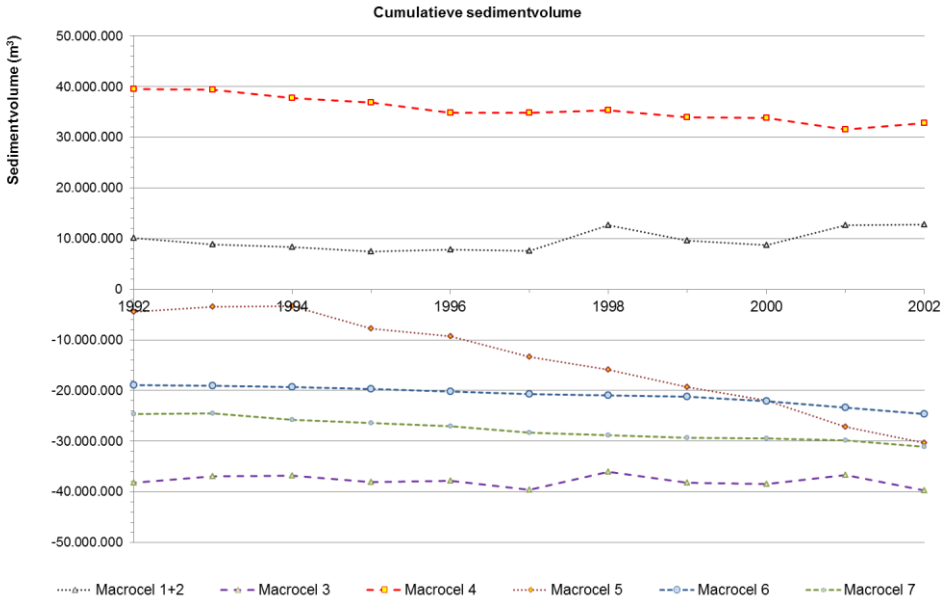
9.3 TRENDS PER MACROCEL

De zand- en slibbalans in het LTV V&T rapport 3, (LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013) is opgesteld voor de macrocellen van de Westerschelde. Iedere macrocel is een compartiment, waarbij de macrocel 1 en mesocel 2 worden gecombineerd. Basis voor het bepalen van de volumes zand en slib zijn de sedimentatievolumes en ingreepvolumes, die zijn afgeleid uit de Rijkswaterstaat Zandbalans. Figuur 9.3 laat deze schematisatie zien, evenals de benodigde gegevens voor de sedimentvolumes per macrocel ($V_{1\&2}$ tot en met V_7) en de menselijke ingrepen ($V_{i,1\&2}$ tot en met $V_{i,7}$). De rode pijl in figuur 9.3 is de randvoorwaarde die bestaat uit het transport uit de Westerschelde naar de Zeeschelde en het Land van Saeftinghe ($V_{z\&s}$). De uitkomst van de balans bestaat uit de transporten tussen de macrocellen (de roze pijlen) en het transport over de grens van macrocel 1&2 met de monding, gemarkeerd met de blauwe pijl (V_m). Deze balans is opgesteld voor zand en slib.



Figuur 9.3 Schematisatie in macrocellen (MC) voor de zand- en slibbalans van de Westerschelde.

In figuur 9.4 zijn de cumulatieve sedimentvolumes (t.o.v . het beginjaar 1955) uit de Zandbalans Rijkswaterstaat weergegeven voor de macrocellen in de Westerschelde, waarbij is ingezoomd op de periode van 1992-2002. Van deze gegevens is voor de periode van 1994-2000 een lineaire trend bepaald in de ontwikkeling van het sedimentvolume. De resultaten hiervan zijn in de rij sedimentvolume opgenomen in tabel 9.1. Voor deze periode neemt het sedimentvolume in macrocel 1 en 2 toe, voornamelijk door de constante doorgaande sedimentatie in mesocel 2. In de andere macrocellen neemt het sedimentvolume af, waarbij macrocel 5 de grootste afname laat zien.
Op basis van de schatting van de bijdrage van slib aan de sedimentatie per macrocel uit de voorgaande paragraaf is met de trend in het sedimentvolumes de sedimentatie van slib berekend. De slibsedimentatie is opgenomen in tabel 9.1 in de rij 'Waarvan slib'. Het zandvolume is opgenomen in dezelfde tabel, in de rij 'Waarvan zand'. Het volume zand volgt uit het sedimentvolume minus de bijdrage van slib.
Voor het ingrepenvolume is ook gewerkt met de trends voor de periode van 1994-2000. De grafiek van de cumulatieve ingrepenvolumes (t.o.v. het beginjaar 1955) is opgenomen in figuur 9.5 en de trends zijn opgenomen in tabel 9.1 in de rij 'ingrepenvolume'. Aangenomen is dat de netto ingrepen alleen zand betreffen.



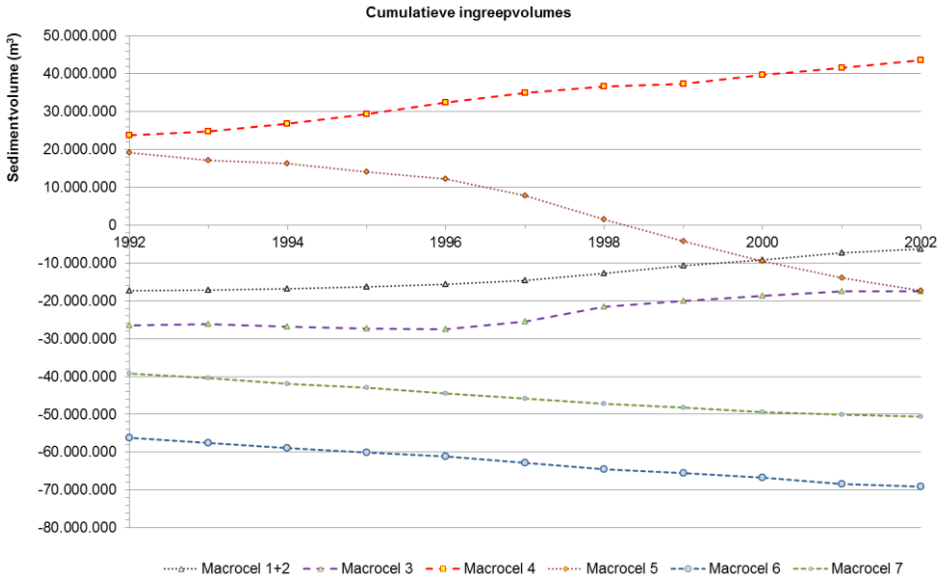
Figuur 9.4 Grafiek met de ontwikkeling van het sedimentvolume per macrocel ($V_{tot\ cum}$)voor de periode 1992-2002 (bron Rijkswaterstaat Zandbalans).

Voor het transport naar het naar het Land van Saeftinghe is aangenomen dat de jaarlijkse aanvoer 0,3 x 10^6 m^3 bedraagt en dat de helft daarvan uit slib bestaat. Voor het transport naar de Zeeschelde is het langjarige gemiddelde genomen uit de Rijkswaterstaat Zandbalans over de periode 1994-2000, dat bedraagt jaarlijks 1,23 x 10^6 m^3. Ook hierbij is aangenomen dat het volume voor de helft uit slib bestaat. Dat betekent dus dat is aangenomen dat over de gecombineerde rand naar het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde jaarlijks 0,615 x 10^6 m^3 slib en hetzelfde volume aan zand de Westerschelde uitgaat.

X 10^6 m^3 / jaar	Macro-cel 1+2	Macro-cel 3	Macro-cel 4	Macro-cel 5	Macro-cel 6	Macro-cel 7	Naar Saeftinghe & Zeeschelde
Sedimentvolume	0,82	-0,28	-0,39	-1,99	-0,66	-0,45	1,23
Waarvan slib	0,064	0	0,17	0	-0,066	-0,045	0,615
Waarvan zand	0,757	-0,28	-0,56	-1,99	-0,60	-0,41	0,615
Ingrepenvolume	1,24	0,85	1,70	-3,70	-1,26	-0,77	Nvt

Tabel 9.1 Gehanteerde volumes zand en slib in de zand- en slibbalans.

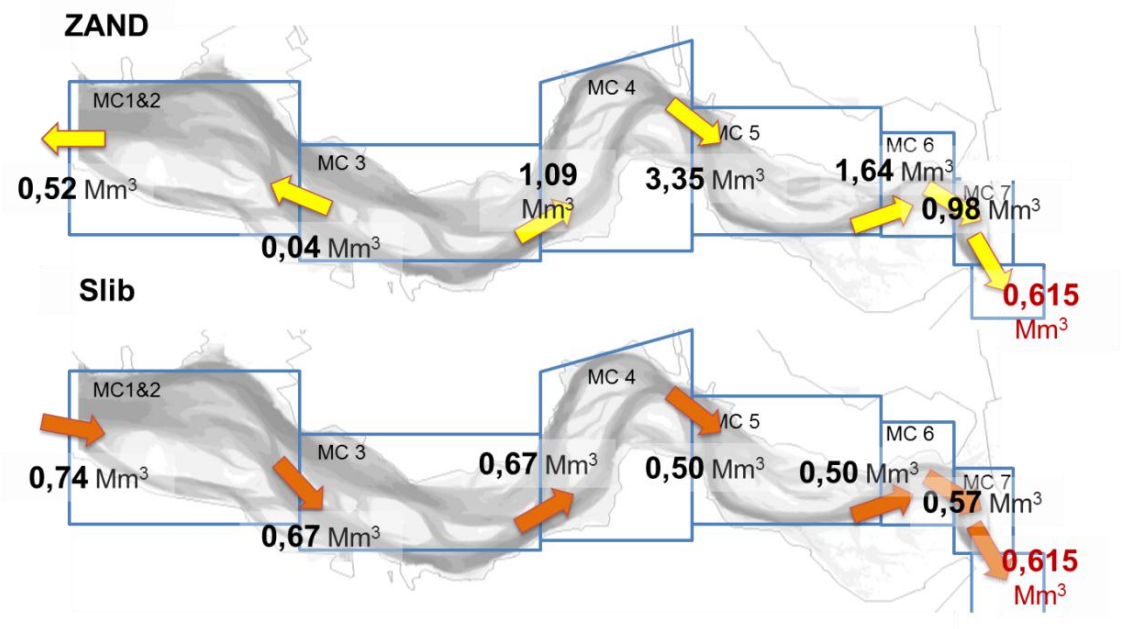
De keuze voor de verdeling van 50% slib 50% zand over de grens van de balans naar het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde is arbitrair. Betrouwbare bepalingen van de slib- en zandvolumes die naar beide gebieden worden getransporteerd ontbreken. Modelsimulaties lijken te wijzen op een netto transportcapaciteit voor zand over de grens met de Zeeschelde die niet meer dan enkele honderdduizenden kuubs kan bedragen. In de voorgaande hoofdstukken is al gebleken dat de aannames voor de transporten over de rand van het balansgebied bepalend zijn voor de berekende transporten. Dat is ook zo voor de zand- en slibbalans. Randvoorwaarden voor de transporten van zand en slib die beter zijn onderbouwd dan de arbitraire 50% slib en 50% zand zullen dan ook tot betrouwbaarder uitkomsten leiden. Voor het illustreren van het belang van de zand- en slibbalans voldoet deze arbitraire keuze. In het LTV V&T rapport 3, (LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013) zijn de uitkomsten met andere randvoorwaarden voor zand en slib weergeven.



Figuur 9.5 Grafiek met de cumulatieve ingreepvolumes per macrocel voor de periode 1992-2002 (bron Rijkswaterstaat Zandbalans).

9.4 BEREKENDE ZAND- EN SLIBTRANSPORTEN

De getallen in tabel 9.1 zijn gebruikt voor het berekenen van een zandbalans en een slibbalans. De berekening van deze balansen is van oost naar west uitgevoerd. Voor iedere macrocel wordt de netto volumeverandering bepaald door van de ontwikkeling van het volume het ingrepenvolume af te trekken (dat bij slib dus steeds nul is). Het transport over de westelijke rand wordt dan berekend door van de netto volumeverandering het transport over de oostelijke rand af te trekken. Voor de zand- en slibbalans worden deze berekeningen afzonderlijk voor zowel het zand als het slib uitgevoerd.
De resultaten van de zand- en slibbalans staan in figuur 9.6. Het belangrijkste verschil tussen transporten in de zand- en slibbalans is, dat in het zandtransport de transporten van macrocel 1 en 3 naar de monding zijn gericht. Het slibtransport is van west naar oost gericht.
De omvang van de berekende transporten in figuur 9.6 moeten worden gezien als een eerste indicatie, omdat de gebruikte getallen voor de sedimentatie van slib en die voor de transporten van zand en slib naar het Land van Saeftinghe en naar de Zeeschelde een betere onderbouwing nodig hebben. De gebruikte slibpercentages zijn gebaseerd op de McLaren bemonstering en analyse, die een momentopname is van de toplaag van het sediment. De wijze van voorbewerken en analyseren van de monsters heeft een grote invloed op de uitkomsten (Zwarts, 2004), zoals blijkt uit vergelijking met de schaarse andere gegevens over de sedimentsamenstelling. Verder is in de gebruikte verschilkaarten de omvang en locaties van de erosie en sedimentatie afhankelijk van de gebruikte jaren. De locaties waar de ontwikkeling varieert en waar de slibpercentages relatief hoog zijn, leveren grote variaties in de berekende bijdrage van slib aan de sedimentatie dan wel erosie. Vooralsnog is op basis van expertkennis vastgesteld welke gebieden langjarige putten en bronnen van slib zijn.



Figuur 9.6 Berekende transporten per jaar uit de zand- en slibbalans op basis van de getallen in tabel 9.1 (trends 1994-2000).

Alle zand en slib die in de Zeeschelde en het land van Saeftinghe terechtkomen wordt door de Westerschelde aangevoerd en daarom zijn de randvoorwaarden aan de oostelijke rand zeer bepalend voor de berekende transporten in de Westerschelde. Zowel het totale volume dat over de randen wordt getransporteerd als de onderverdeling in zand en slib zijn geen 'harde' getallen. Eerder in dit rapport is al opgemerkt dat de bepalingen voor de totale jaarlijkse sedimentatie in het Land van Saeftinghe variëren met een factor twee, van 0,3 tot 0,6 x $10^6 m^3$. Hoeveel zand in verhouding tot slib wordt afgezet is al helemaal niet duidelijk. Het is daarbij belangrijk om te bedenken dat Saeftinghe niet volledig uit (slibrijk) schor bestaat, maar ook een belangrijk areaal (zandrijk) slik herbergt, in de vorm van de toevoergeulen. Voor de Zeeschelde geldt dat berekende totale transporten afhangen van de bodemligging (die iedere 10 jaar wordt opgemeten), de gerapporteerde onttrekkingsvolumes en aannames over de transporten over de bovenranden. De betrouwbaarheden hiervan zijn niet bekend. In Haecon (2006) is bijvoorbeeld voor de sedimentbalans van de Zeeschelde aangenomen dat er ter hoogte van de Rupelmonding geen netto uitwisseling van sediment plaatsvindt, terwijl in veel studies (zie voor een samenvatting daarvan het LTV V&T rapport 3, LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013) blijkt dat via de Boven-Zeeschelde en de Rupel netto slib wordt aangevoerd. Omdat vooralsnog geen actuele zand- en slibbalans van de Zeeschelde beschikbaar is, is er geen recente uitspraak over de bijdrage van zand en slib aan het totale volume in de Zeeschelde. Oude studies geven aanwijzing voor relatief grote transporten van slib over de grens tussen de Westerschelde en de Zeeschelde.

Hoewel de exacte getallen ter discussie staan, is de belangrijke uitkomst van de zand- en slibbalans dat de berekende zandtransporten deels een andere richting hebben dan de slibtransporten. Een gescheiden zand- en slibbalans levert andere transporten dan een sedimentbalans. Slib levert hoogstwaarschijnlijk een netto positieve bijdrage aan de sedimentbalans van het Schelde-estuarium. Wat aan slib sedimenteert in de Westerschelde, het Land van Saeftinghe en de Zeeschelde wordt niet in de vorm van zand afgezet. Daarmee verloopt de omvang en het patroon van de zandtransporten anders dan van het sediment. Waarschijnlijk wordt zand naar de monding getransporteerd, terwijl slib de andere kant op gaat, van de monding naar de Westerschelde.

10 Discussie en conclusies

10.1 IS ER EEN MEERWAARDE?

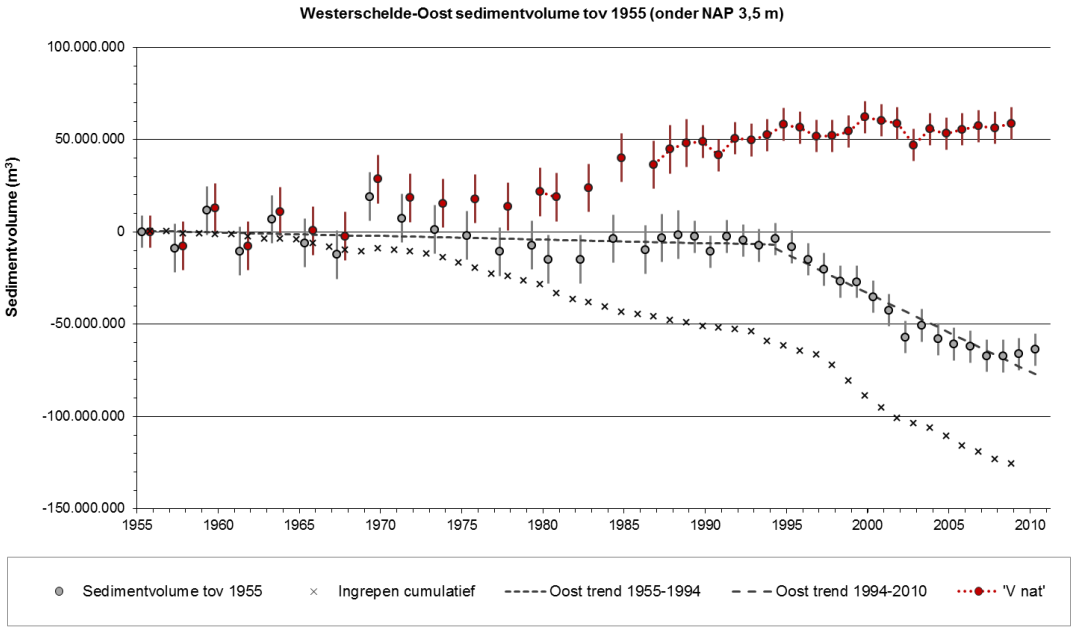
Voor de Westerschelde is een gedetailleerde sedimentbalans beschikbaar, tot op het niveau van de macrocellen en de daarin onderscheiden deelgebieden (de Rijkswaterstaat Zandbalans). Deze sedimentbalans wordt van jaar tot jaar *up to date* gehouden en ingezet voor het operationele beheer. De aanpak en resultaten van de voorliggende studie hebben als aanvullende waarde op deze operationele sedimentbalans:

1. Het in beeld brengen van de problemen met de gegevens en de weerslag daarvan in de sedimentvolumes;
2. De analyse op hoofdlijnen, waarmee de ontwikkelingen op het schaalniveau van oost en west is geanalyseerd;
3. Het verschil tussen de berekende transporten voor zand en slib.

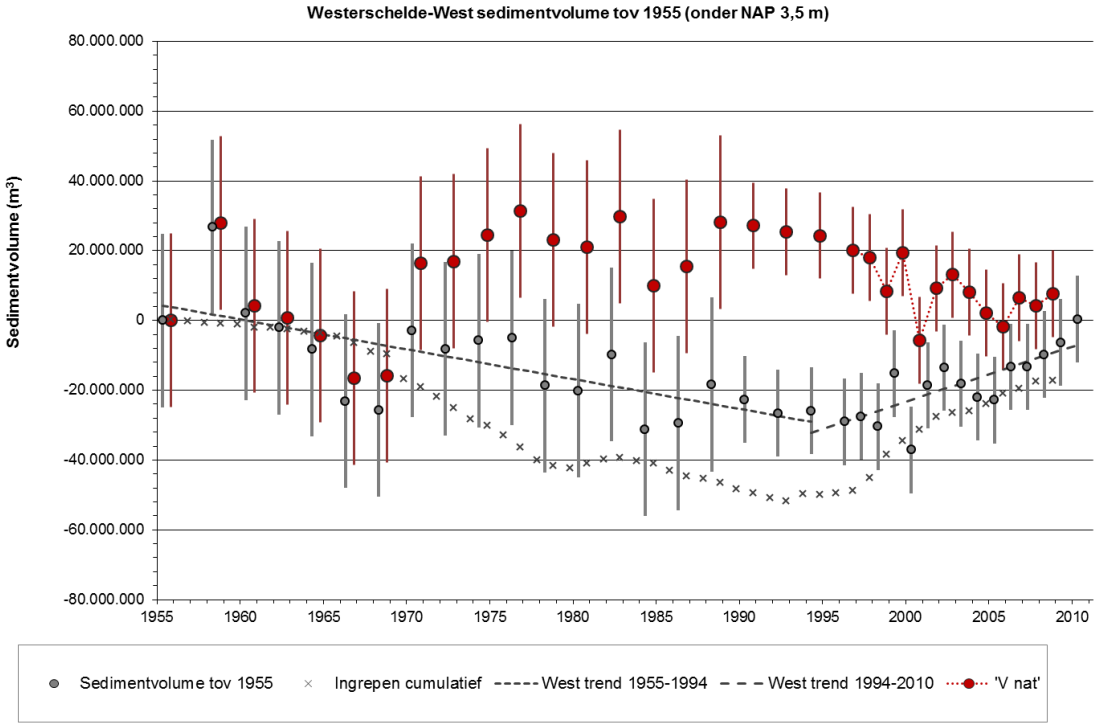
Als illustratie op het eerste punt zijn in de figuren 10.1 en 10.2 grafieken weergeven van de ontwikkeling van het sedimentvolume (in balansstudie vaak aangeduid met 'V_{tot}' of 'Vtotaal'), de cumulatieve ingrepen ('V_i' of 'Vingrepen'in balansstudies) en het verschil tussen beide (aangeduid met 'V_{nat}' of 'Vnatuurlijk', zoals in de balansstudies, hoewel deze waarde niet noodzakelijkerwijs de natuurlijke volumeverandering is). De foutmarge die is gehanteerd voor de bodemligging is overgenomen voor 'V_{nat}'. Rekening houden met deze marge levert meer bandbreedte of interpretatieruimte voor 'Vnat'. Er is dan nog geen rekening gehouden met fouten in de gerapporteerde ingreepvolumes, zodat de bandbreedte feitelijk nog groter is. Door deze bandbreedte of interpretatieruimte zichtbaar te maken wordt duidelijker hoeveel waarde gehecht moet worden aan waargenomen veranderingen in de getallen.

10.2 OVERZICHT VAN DE ONTWIKKELINGEN IN DRIE PERIODEN

In deze paragraaf worden de ontwikkelingen beschreven in drie perioden die in de sedimentbalansen zijn onderscheiden. De informatie die hierin is verwerkt omvat de waargenomen ontwikkeling van de sedimentvolumes, de bagger-, stort- en zandwinvolumes en de doorwerking hiervan in de berekeningen met de sedimentbalansen met één en twee compartimenten. In figuur 10.3 zijn de beschreven ontwikkelingen schematisch weergegeven. s



Figuur 10.1: Grafiek met de cumulatieve weergave van het sedimentvolume van de oostelijke helft van de Westerschelde en de cumulatieve (netto) ingrepen in het gebied.



Figuur 10.2: Grafiek met de cumulatieve weergave van het sedimentvolume van de westelijke helft van de Westerschelde en de cumulatieve (netto) ingrepen in het gebied.

Periode 1955-1976

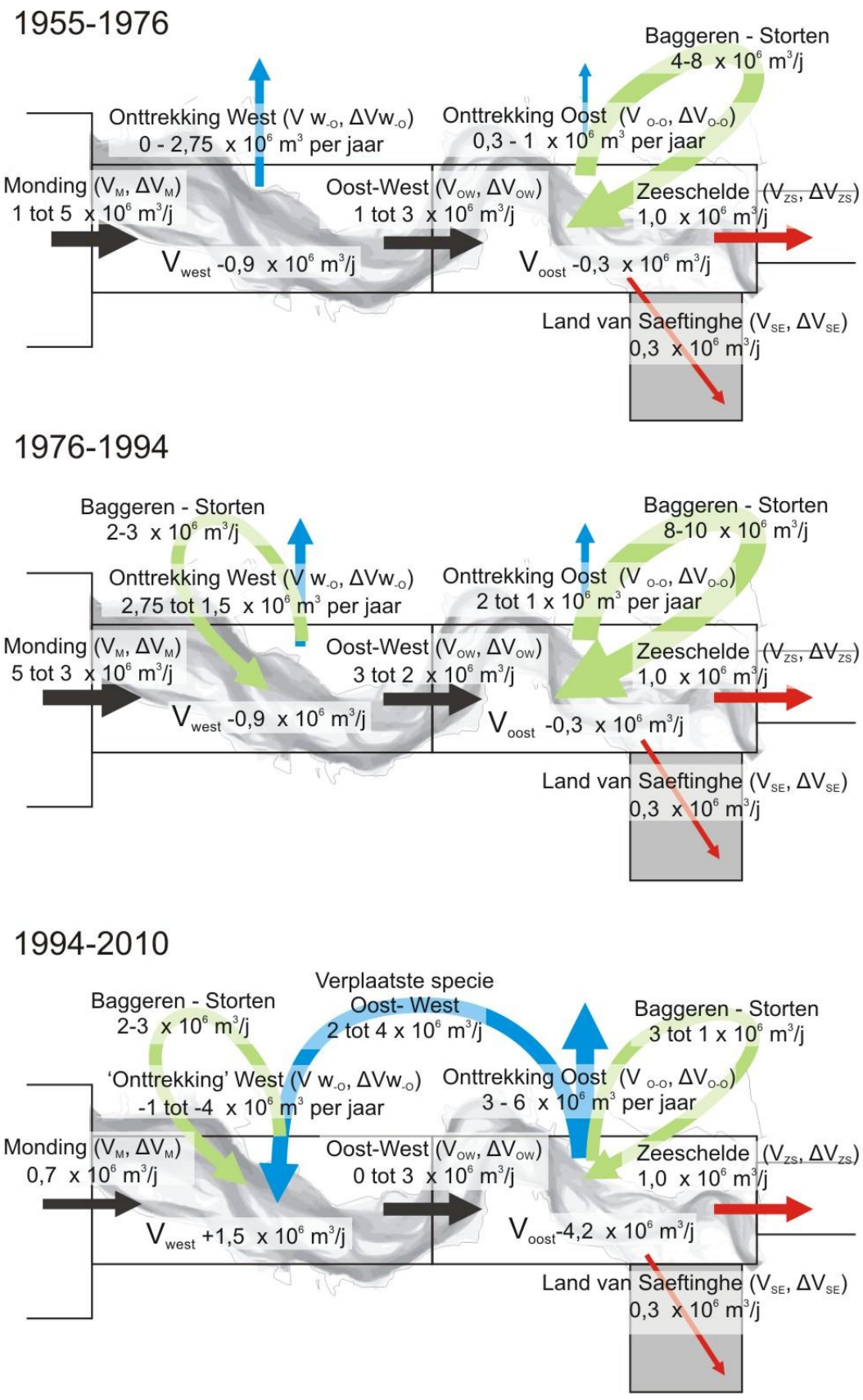
- Onbetrouwbare gegevens: grote schommelingen in de waarden waar geen plausibele verklaring voor is;
- Mogelijk afname in sedimentvolume westelijke helft van -0,9 x 10^6 m^3 per jaar;
- Mogelijk afname in sedimentvolume oostelijk helft (trend bepaald op -0,2 x 10^6 m^3 per jaar);
- Toenemende netto onttrekkingen, in eerste instantie vooral in de westelijke helft, voor zandwinning. Maximum in 1976, met zowel in de westelijke als in de oostelijke helft zandwinning;
- Baggeren en storten tot 1972 voornamelijk in het oosten, rond de 4 x 10^6 m^3 per jaar, in de periode 1972 -1976 sterke toename baggeren en storten, vooral in het oosten, tot rond de 8 x 10^6 m^3 per jaar;
- Berekende toename van het transport van monding naar Westerschelde van ongeveer 1 tot 5 x 10^6 m^3 per jaar;
- Berekende toename van het transport van west naar oost van ongeveer 1 tot 3 x 10^6 m^3 per jaar.

De berekende toename van het transport van de monding naar de Westerschelde is het gevolg van een bepaalde trend in de Westerschelde, die relatief vlak is. Op basis van de gegevens van de bodemligging en de grote schommelingen erin, kan niet worden uitgesloten dat in de periode een afname van het sedimentvolume van de westelijke helft van de Westerschelde heeft plaatsgevonden. Als dat het geval zou zijn geweest, dan zou de toename van het transport van de Westerschelde naar de monding kleiner of nul zijn geweest. Ook de berekende toename van het transport van west naar oost is het gevolg van de bepaalde trends in de westelijke en de oostelijke helft. Ook hiervoor geldt dat de schommelingen in de waarden van de bodemligging ruimte bieden aan andere ontwikkelingen. De berekende toename zou daarom in werkelijkheid ook kleiner kunnen zijn.

Periode 1976-1994

- Minder betrouwbare gegevens: schommelingen in de waarden waar geen plausibele verklaring voor is;
- Mogelijk afname in sedimentvolume westelijke helft van -0,9 x 10^6 m^3 per jaar;
- Mogelijk afname in sedimentvolume oostelijke helft (trend bepaald op -0,2 x 10^6 m^3 per jaar);
- Afnemende netto onttrekkingen, zowel in de westelijke als in de oostelijke helft. Rond 1979 is gemiddeld niveau bereikt, rond de 2,5 x 10^6 m^3.
- Grote volumes baggeren en storten vooral in het oosten, met maxima eind jaren ’80 van 10 x 10^6 m^3 per jaar;
- Berekende afname van het transport van monding naar Westerschelde van ongeveer 5 tot 3 x 10^6 m^3 per jaar;
  Berekende afname van het transport van west naar oost van ongeveer 3 tot 2 x 10^6 m^3 per jaar.
- In 1980-1982 tijdelijke verplaatsing van gestorte specie uit oost naar west, waarmee positieve netto ‘onttrekking’ in westen.
- Dat levert een berekende ‘dip’ in de het transport van monding naar Westerschelde, van ruim 1 x 10^6 m^3 per jaar.

Ook voor deze periode geldt dat de berekende transporten moeten worden beschouwd in het licht van de bepaalde trends. En omdat ook voor deze periode sprake is van schommelingen in de bodemligginggegevens, kan niet worden uitgesloten dat de transporten van de monding naar het westen en van het westen naar het oosten in werkelijkheid in detail anders zijn verlopen.



Figuur 10.3: Schematische weergave van de sedimentstromen in en rond de Westerschelde in drie perioden.

Periode 1994-2010

- Grotere betrouwbaarheid gegevens (vanaf 1992);
- Toename sedimentvolume westelijke helft (trend bepaald op +1,5 x 10^6 m^3 per jaar);
- Grote afname sedimentvolume in oostelijk helft (trend bepaald op -4,1 x 10^6 m^3 per jaar);
- Stabiele volumes netto onttrekkingen rond 2 x 10^6 m^3 per jaar;
- Afnemend volume baggeren in het oosten, met maximum van bijna 12 x 10^6 m^3 in 1998 en minimum van 4,3 x 10^6 m^3 in 2006;
- Sterke afname van het stortvolume in het oosten, na maximum van 8 x 10^6 m^3 in 1996 tot minimum van 1,2 x 10^6 m^3 in 2006;
- Kleine toename in het volume baggeren in het westen in begin jaren negentig, van minder dan 1 x 10^6 m^3 per jaar tot boven de 3 x 10^6 m^3 per jaar, daarna stabiel tussen 1 en 2 x 10^6 m^3 per jaar;
- Sterke toename van het stortvolume in het westen, met maximum van ruim 9 x 10^6 m^3 in 1996 daarna stabilisatie tussen 2 en 5 x 10^6 m^3 per jaar;
- Resultaat is netto verplaatsing van baggerspecie van oost naar west;
- Berekende afname van het transport van monding naar Westerschelde stabiel op ongeveer 1 x 10^6 m^3 per jaar;
- Berekend transport van west naar oost van ongeveer 1 x 10^6 m^3 per jaar. Twee slingers in deze ontwikkeling door een waargenomen trendbreuk in ontwikkeling sedimentvolume rond 1994 en door een grote verplaatsing baggerspecie van oost naar west in de periode 1997-2001.

Aanvullend op bovenstaande laat de analyse van de afzonderlijke zand- en slibbalans zien dat de berekende transporten voor het sediment (hierboven) niet noodzakelijk hetzelfde zijn als de transporten van het zand en het slib. Het is waarschijnlijk dat in ieder geval voor de geanalyseerde periode (1994-2000) zand van de Westerschelde naar de monding is getransporteerd, terwijl slib in de omgekeerde richting is getransporteerd.

10.3 DISCUSSIE

De perioden in de voorgaande paragraaf wijken af van de perioden die in ander studies zijn gehanteerd. De belangrijkste reden voor het hanteren van een beperkt aantal lange perioden is dat de nauwkeurigheid van de bodemligginggegevens het identificeren van trends over een korter tijdsbestek niet mogelijk maakt. De variatie die in de loop van de tijd optreedt in de ingrepen is (nog) groter. Dat maakt in potentie een meer gedetailleerde indeling mogelijk, maar vanuit die indeling is geen koppeling te maken met de ontwikkeling van het sedimentvolume.
Aanvullend kan worden opgemerkt dat de doorwerking van de ingrepen op de morfologie en daarmee de doorwerking op de waterbeweging, niet instantaan verloopt, maar een periode van meerdere jaren omvat. Dit wordt hysterese genoemd. Opknippen in deelperioden op basis van de ingrepen gaat voorbij aan deze vertraagde beïnvloeding. Dat neemt niet weg dat lokaal, op het niveau van macrocellen en de deelgebieden wel degelijke sprake kan zijn van een directe en meetbare relatie tussen ingreep en morfologie. Op dat niveau kan een meer gedetailleerde indeling in tijdsperioden nuttig zijn. En die indeling zal naar verwachting anders zijn dan de driedeling die hierboven is gehanteerd.

11 Referenties

Brand, G.B.M., G. van Brussel, J.H. ten Damme en J. Gerritsen (2004). Herberekening van het primaire net van het NAP, Verbetering precisie en betrouwbaarheid ten behoeve van de nieuwe NAP publicatie. AGI/GAP-04/004, Rijkswaterstaat AGI.

Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis. (2013). Analyse alle havenstortvakken Westerschelde. LTV V&T-rapport B-22.

de Boer, P.L. (1979). Convolute lamination in modern sands of the estuary of the Oosterschelde, the Netherlands, formed as the result of entrapped air. Sedimentology, Volume 26 Issue 2, Pages 283 – 294.

de Bruijne, A. J. van Buren, A. Kösters, H. van der Marel (2005) De geodetische referentiestelsels van Nederland; Definitie en vastlegging van ETRS89, RD en NAP en hun onderlinge relaties; Geodetic reference frames in the Netherlands; Definition and specification of ETRS89, RD and NAP, and their mutual relationships. Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission 43

de Looff, D. (1986) Inhoudsberekeningen en zandbalans Westerschelde voor de periode 1980 - 1984/85, aansluitend op eerdere berekeningen voor het tijdvak 1978 -1980.

de Looff, D. 1978, Kartering van de bodemsamenstelling van het oostelijk gedeelte van de Westerschelde. Methode en Resultaten. Nota WWKZ-78.V013.

de Looff, D. 1980, Kartering van de bodemsamenstelling van het westelijk gedeelte van de Westerschelde. Methode en Resultaten. Nota WWKZ-80.V009.

Duin, R.N.M., 2005. Trends in de zandhuishouding van het Nederlandse kustsysteem. Werkdocument RIKZ/KW/2005.132w, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Haecon (2006) . Actualisatie van de zandbalans van de Zee-en Westerschelde. Rapport.

Houtekamer, N.L. (1995). Het Verdronken Land van Saeftinge : schor onder druk ?. Nota: Deltadienst, Afdeling Milieu-Onderzoek, AX 94.018; RIKZ 94.033. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. Directie Zeeland: Middelburg.

Janssen-Stelder, B.M. (2000) A synthesis of salt marsh development along the mainland coast of the Dutch Wadden Sea. Proefschrift Universiteit Utrecht.

Jeuken, C.J.L.; Ruessink, G.; Wang, Z.B. (2002). Adviezen voor het maken van een gezamenlijke zandbalans voor Westerschelde en monding: bureau- en literatuurstudie. Rapport Z3213 WL|Delft Hydraulics.

Krijger, G.M. (1993). Het Verdronken Land van Saeftinge komt weer boven water. Werkdocument GWWS, 93,838x. MSc Thesis. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat (RWS) Dienst Getijdewateren (DGW)/RWS Waterdistrict Westerschelde: Middelburg.

Marijs, K.; Parée, E. (2004). Nauwkeurigheid vaklodingen Westerschelde en -monding: "de praktijk". Rijkswaterstaat Meetinformatiedienst Zeeland.

Mulder, H.P.J. (1995). De droge dichtheid als functie van het slibgehalte t.b.v. een sediment balans. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIKZ Werkdocument RIKZ/OS -95.614x.

Nederbragt G.J. & G.J. Liek (2004). Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding. Rapport Rijkswaterstaat RIKZ 2004.020.

Spis H. & C. de Leeuw (2009) Natuurherstelplan Waddenzee Bouwsteen thema 1: Wadbodem en waterkolom (edit. N. Dankers, V. de Jonge, A.P. Oost, H. Ridderinkhof & H. de Swart).

Stapel, J.; de Jong, D.J. (1998). Sedimentatiemetingen op het schor bij Waarde en het Verdronken Land van Saeftinge, Westerschelde (ZW Nederland): sedimento et submergo. Rapport RIKZ 98(22). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat (RWS), Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ): Middelburg.

Stikvoort, E.C.; de Jong, D.J. (2003). Sedimentatiesnelheid op Westerschelde-schorren, 1998-2002. Werkdocument RIKZ, OS/2003.807X. RWS, RIKZ[s.l.].

Storm, C.; Bollebakker, P.; de Jong, J.; Mol, G. (1993) Nauwkeurigheid zandbalans Westerschelde 1965-1990 en aanbevelingen ter optimalisatie ; Rapport RIKZ = Report RIKZ, 94.008. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Directie Zeeland.

Storm, K. en T. Pieters (1994) Het verdronken land verlandt; Het Verdronken land van Saeftinge een uniek gebied nu en in de toekomst; folders Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Uit den Bogaard, L.A. (1995) Resultaten zandbalans Westerschelde 1955-1993. IMAU-rapport, R95-08. Universiteit Utrecht, IMAU.

Van den Berg, J.H.; Schouten, D.; van Westenbrugge, C.J. (1991) Zandbalans Westerschelde 1965 -'70-'75-'80-'85. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. Directie Zeeland:

Zwarts, L. (2004) Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIZA rapport RIZA/2004.028.

Zwolsman, J.J.G., Berger, G.W. & Van Eck, G.T.M. (1993). Sediment accumulation rates, historical input, postdepositional mobility and retention of major elements and trace metals in salt marsh sediments of the Scheldt estuary, S.W.-Netherlands.

Zwolsman, J.J.G. (1999). Geochemisch gedrag van zware metalen in het Schelde-estuarium = Geochemistry of trace metals in the Scheldt estuary. Geologica Ultraiectina, 171. MSc Thesis. Universiteit Utrecht: Utrecht.

LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013:

Data-analyse waterstanden Westerschelde. LTV V&T-rapport G-1

Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde. LTV V&T-rapport G-2

De rol van het slib in de sedimentbalans van de Westerschelde. LTV V&T-rapport G-3

Influence morphology on tide and sand transport. LTV V&T-rapport G-4

Data-analysis water levels, bathymetry Western Scheldt. LTV V&T-rapport G-5

Tidal Phenomena in the Scheldt Estuary, part 2. LTV V&T-rapport G-7

Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij. LTV V&T-rapport G-8

Probleemanalyse zandwinning. LTV V&T-rapport G-10

Simulaties met effectanalyse op schaal estuarium. LTV V&T-rapport G-11

Effect morfologie monding Westerschelde op getij. LTV V&T-rapport G-12

Synthese en conceptueel model. LTV V&T-rapport G-13

Response of tidal rivers to deepening and narrowing. LTV V&T-rapport G-14

Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets). LTV V&T-rapport K-16

Samenhang ontwikkelingen tijd- en ruimteschalen. LTV V&T-rapport K-17

Ontwikkeling mesoschaal Zeeschelde (factsheets). LTV V&T-rapport K-18

Zeeschelde- nota analyse bodemligging. LTV V&T-rapport K-19

Simulaties met effectanalyse op mesoschaal. LTV V&T-rapport K-20

Analyse havenstortvak W13. LTV V&T-rapport B-21

Analyse alle havenstortvakken Westerschelde. LTV V&T-rapport B-22

Analyse stortvakken Beneden-Zeeschelde. LTV V&T-rapport B-23

Gebruik van nevengeulen voor binnenvaart. LTV V&T-rapport B-24

Mitigatie dwarsstroming Zuidergat. LTV V&T-rapport B-25

Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium. LTV V&T-rapport A-26

Actualisatierapport Delft3D Schelde-estuarium. LTV V&T-rapport A-27

Harde lagen Westerschelde. LTV V&T-rapport A-28

Harde lagen Beneden-ZeescheldeLTV V&T-rapport A-29

Overzicht data, beschikbaarheid Open Earth, ftp. LTV V&T-rapport A-30

Baggeren en storten. LTV V&T-rapport A-31

Plancke, Y; Maximova, T; Ides, S; Peeters, P; Taverniers, E.; Mostaert, F. (2012). Werkgroep O&M - Projectgroep Veiligheid: Sub project 1: Dtata Analysis and hypothesis - Lower Sea Scheldt. Version 4.0. WL rapporten, 756/05. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, Waterbouwkundig Laboratorium, 2013. LTV V&T-rapport G-9: Toepassing van de Vlaamse en de Nederlandse methodes om het overstromingsrisico te bepalen van dijkring 31, Zuid-Beveland.

Vandenbruwaene, W.; Vos, G.; Plancke, E.; Mostaert, F. (2012). Werkgroep O&M - Projectgroep Veiligheid en Toegankelijkheid: Onderzoek naar de morfologie op meso-schaal ter hoogte van de stortlocaties. Versie 3.0. WL rapporten, 791/10a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België