

**BIJDRAGE SLIB AAN DE SEDIMENTATIE
WADDENZEE**

FRISIA ZOUT BV

22 januari 2013
076892814:A - Definitief
C01022.100263.0500



Inhoud

Samenvatting	3
1 Inleiding en doelstelling	5
2 Bodemdalingsvolume en suppletievolume.....	7
3 Historie van de gebruikte getallen	9
3.1 Samenvatting.....	9
3.2 Inleiding.....	9
4 Gegevens	15
4.1 Samenvatting.....	15
4.2 Inleiding.....	15
5 De waarde(n) van de Sedimentatlas	19
5.1 Samenvatting.....	19
5.2 Inleiding.....	19
5.3 Voorstel	21
6 Compactie en de opvulling van de bodemdalingsschotel.....	25
6.1 Samenvatting.....	25
6.2 Inleiding.....	25
7 Berekeningen en resultaten	31
7.1 Samenvatting.....	31
7.2 Berekeningen.....	31
7.3 Resultaten	32
8 Discussie en conclusies.....	35
9 Referenties	37

Samenvatting

Bij het optreden van (Pleistocene) bodemdaling onder de Waddenzee wordt de bodemdalingsschotel opgevuld met sediment, een mengsel van zand en fijn sediment (slib). Het zand dat in de bodemdalingsschotel terechtkomt, is afkomstig van de kust, terwijl het fijne sediment uit de Noordzee wordt aangevoerd, zoals is onderkend in bijvoorbeeld Oost e.a. (1998). Het onttrekken van zand aan de kust is strijdig met het vigerende kustbeleid, dat is gericht op het behoud van de zandvoorraad van het kustfundament en daarom zal het volume zand moeten worden aangevuld door het uitvoeren van zandsuppleties. Het volume fijn sediment hoeft niet te worden aangevuld. Om dit inzichtelijk te maken is door Eijsink (in Oost e.a., 1998) de reductiefactor F_r geïntroduceerd, die het te suppleren volume zand relateert aan het bodemdalingsvolume.

Bij de berekeningen van het benodigde aanvullingsvolume voor de bodemdaling door de Waddenzee gaswinning (de winning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen) wordt uitgegaan van een bijdrage van slib van 10% aan het sedimentatievolume in de Waddenzee. Het gebruik van de 10% volumebijdrage van slib aan de sedimentatie voor de gaswinning kan worden herleid tot een voetnoot (nummer 91 in het hoofdstuk 6 van Eijsink) in de Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee (Oost e.a., 1998). In datzelfde rapport is aangegeven dat wordt uitgegaan van locatiespecifieke verschillen tussen de kombergingsgebieden, voor wat betreft de bijdrage van fijn sediment aan de opvulling van de bodemdalingsschotel. Desalniettemin is in de Integrale Bodemdalingstudie (door Oost in hoofdstuk 5) de 10% volumebijdrage door slib gebruikt voor alle kombergingsgebieden, met uitzondering van het Marsdiep, dat niet in de berekeningen is opgenomen vanwege het ontbreken van gasvelden in dat kombergingsgebied. De onderliggende gegevens over de sedimentsamenstelling zijn die van De Glopper (1967).

De Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998) heeft voor het studiegebied van de zoutwinning een veel betere dekking dan de gegevens van De Glopper (1967) en vormt daarmee een goede basis voor het afleiden van de percentages fijn sediment en de reductiefactor F_r conform Eijsink in Oost e.a. (1998).

Om tegemoet te komen aan de opmerkingen van Zwarts (2004) met betrekking tot de gerapporteerde waarden voor de fijne fracties in de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998), wordt voorzichtigheidshalve uitgegaan van een mogelijke overschatting van $1,71 \pm 0,1$ van het gewichtspercentage fijn sediment ($< 63 \mu\text{m}$) in de Sedimentatlas. In deze factor is het verschil in voorbehandeling verdisconteerd en is rekening gehouden met het verschil in gedrag van de fracties tussen 0 en $16 \mu\text{m}$ en 16 en $63 \mu\text{m}$ en het mate van voorkomen van deze twee fracties.

Compactie van het sediment levert een vertraging op in de opvulling van de bodemdalingsschotel. Het totale volume aan benodigd sediment verandert niet door compactie. In de formule voor de dichtheid van het sediment is rekening gehouden met de compactie van het sediment door met de bovengrens van de relatie van Mulder (1995) te rekenen.

De bijdrage van fijn sediment ($< 63 \mu\text{m}$) in termen van het volume is berekend voor het studiegebied en de bodemdalingsschotel. De volume bijdrage van fijn sediment bedraagt 25,5% voor het studiegebied en 24,8% voor de bodemdalingsschotel. Daarmee komt de reductiefactor F_r op respectievelijk 74,5% en 75,2%.

1

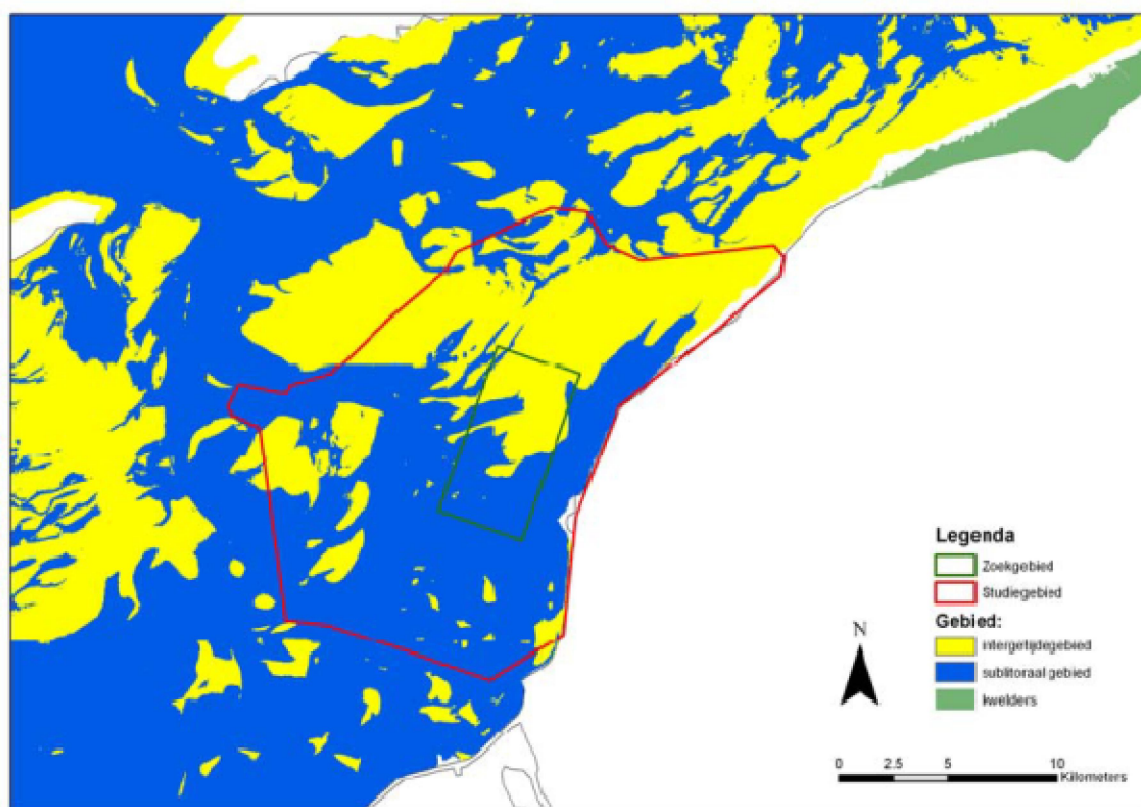
Inleiding en doelstelling

Frisia Zout B.V. heeft vergevorderde plannen om in de toekomst zout te winnen van onder de Waddenzee. Het ministerie van EL&I heeft de Tweede Kamer geïnformeerd dat zij voornemens is om op korte termijn de winningsvergunning hiervoor te verlenen (kamerbrief d.d. 8 juli 2011, met kenmerk ETM/EM / 11081945).

In de Milieueffectrapportage (waar verschillende achtergrondrapportages deel van uitmaken) is vastgesteld dat het bodemdalingsvolume in de Waddenzee wordt aangevuld met sediment. Het zandvolume dat hiervoor nodig is, zal uiteindelijk aan de kust worden onttrokken, terwijl het fijne sediment (slib) wordt aangevoerd uit de Noordzee. Dit is aangegeven in het achtergrondrapport “Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep” (Grasmeijer en Cleveringa, 2010). Het onttrekken van zand aan de kust is strijdig met het vigerende kustbeleid, dat is gericht op het behoud van de zandvoorraad van het kustfundament en daarom zal het volume zand van de kust moeten worden aangevuld door het uitvoeren van zandsuppleties. De intentie is om het benodigde suppletievolume aan verschillende reguliere zandsuppleties toe te voegen, die in opdracht van Rijkswaterstaat voor het kustbeheer zullen worden uitgevoerd.

Bovenstaande komt overeen met de werkwijze rond het aanvullen van de zandvoorraad van de kust bij de bodemdaling door de gaswinning Waddenzee. Bij de berekeningen van het benodigde aanvullingsvolume voor de bodemdaling door de Waddenzee gaswinning (de winning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen) wordt uitgegaan van een bijdrage van slib van 10% aan het sedimentatievolume in de Waddenzee. Door Grasmeijer en Cleveringa (2010) is beargumenteerd dat er voor de kombergingsgebieden van Vlie en Marsdiep sprake is van een grotere bijdrage aan fijn sediment in de bodemdalingschotel zoals die door zoutwinning onder de Waddenzee zal ontstaan (het studiegebied is aangegeven in figuur 1).

In het voorliggende memo wordt de herkomst achterhaald van tot nu toe gehanteerde 10% volumebijdrage fijn sediment, wordt inzicht geboden in de herkomst van gebruikte gegevens, wordt een aantal uitgangspunten voor de berekeningen bediscussieerd en wordt ingegaan op het effect van compactie op de benodigde sedimentaanvulling. Uiteindelijk worden in dit rapport de uitkomsten gepresenteerd van verschillende berekeningen van het zandvolume dat gesuppleerd zal moeten worden.



Figuur 1 Het studiegebied voor de zoutwinning (uit Kater e.a., 2010)

2

Bodemdalingsvolume en suppletievolume

In het MER (en de Passende beoordeling) is uitgegaan van het bodemdalingsvolumes onder de Waddenzee, van 12,2 Mm³. Dit getal¹ komt overeen met de prognoses van de bodemdaling uit het achtergrondrapport “Informatie Bodemdaling door Zoutwinning v.3.0” (via www.frisiazout.nl en de link naar MER procedure). Het gaat hier om alternatief “100% Havenmond”, waarbij de zoutwinning in totaal 32 Mton bedraagt en dit volledig onder de Waddenzee wordt onttrokken.

Het benodigde suppletievolume V_s wordt berekend uit het bodemdalingsvolume V_b , met het **volumepercentage zand P_z door de formule:**

$$V_s = V_b \times P_z \quad [1a]$$

Door Eijssink is in de Integrale Bodemdalingstudie (Oost e.a., 1998) de reductiefactor F_r geïntroduceerd, die ook in formule 1a gebruikt kan worden:

$$V_s = V_b \times F_r / 100 \quad [1b]$$

In het MER (blz. 36) staat dat er een zandsuppletie nodig is van 8,052 Mm³ ter compensatie van de bodemdaling. Er is daarbij gerekend met een waarde van P_z van 66%. Dat wil zeggen dat 66% van het sediment dat in de bodemdalingsschotel terechtkomt uit zand bestaat en 34% uit fijn sediment (“slib”). Voor het bepalen van het te suppleren volume zand is P_z of F_r dus een essentiële factor. Er zijn verschillende mogelijkheden om P_z of F_r te berekenen. Voordat we daar op ingaan eerst een bespreking van de herkomst van de gebruikte gegevens en formules.

¹ Het getal van 12,2 Mm³ is kleiner dan de in het achtergrondrapport “Achtergrondrapport Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep” (Grasmeijer en Cleveringa, 2010) gebruikte 14,8 Mm³, omdat in dat laatste getal geen rekening is gehouden met het restvolume van de cavernes. Dit getal was nog niet beschikbaar toen het gebruiksruimte achtergrondrapport is geschreven en de ASMITA-simulaties zijn uitgevoerd.

3

Historie van de gebruikte getallen

3.1 SAMENVATTING

Het gebruik van de 10% volumebijdrage van slib aan de sedimentatie voor de gaswinning kan worden herleid tot voetnoot 91 in het hoofdstuk 6 van Eijsink in de Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee (Oost e.a., 1998). In hetzelfde hoofdstuk is in tabel 6.4 aangegeven dat Eijsink uitgaat van locatiespecifieke verschillen tussen de kombergingsgebieden, voor wat betreft de bijdrage van fijn sediment aan de opvulling van de bodemdalingsschotel. De onderliggende gegevens over de sedimentsamenstelling zijn die van De Glopper (1967). Waarschijnlijk, maar dit is speculatief, is dit ook de verklaring voor het ontbreken van een getal voor het Marsdiep, omdat er van dat kombergingsgebied slechts zeer beperkt gegevens beschikbaar waren, vanwege het geringe areaal droogvallende platen.

Door Oost is in hoofdstuk 5 van de Integrale Bodemdalingstudie de 10% volumebijdrage door slib gebruikt voor alle kombergingsgebieden, met uitzondering van het Marsdiep, dat niet in de berekeningen is opgenomen (zijn tabel 5.5).

3.2 INLEIDING

Bij de berekeningen van het benodigde aanvullingsvolume voor de bodemdaling door de Waddenzee gaswinning (de winning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen) wordt uitgegaan van een bijdrage van slib van 10% aan het sedimentatievolume in de Waddenzee. Waar is dit percentage op gebaseerd? Om dat te achterhalen worden hieronder, in chronologische volgorde, de bronnen en de gegevens beschreven die de basis vormen voor dit percentage. Bij deze beschrijvingen richten we ons op het wad en niet op de kwelders en landaanwinningswerken. De reden hiervoor is dat kwelders nagenoeg en landaanwinningswerken geheel ontbreken in het aandachtsgebied voor de bodemdaling door zoutwinning. Dat betekent dat de veelvoud aan informatie en gegevens over de kwelders en landaanwinningswerken niet in de onderstaande beschrijving zijn opgenomen.

Eijsink (1979)

Het literatuuronderzoek 'morfologie van de Waddenzee' van Eijsink, uit 1979, doet verslag van de gevolgen van zand- en schelpenwinning. In het rapport is een uitgebreid hoofdstuk gewijd aan de sedimentologie en sedimenttransporten, met daarbij een uitgebreide beschrijving van bodemgesteldheid van de Waddenzee.

In de paragrafen 'Toplaag van de bodem (tot 0,25 à 2 m); grondsoorten' en 'Toplaag van de bodem; sedimentkarakteristieken' wordt nauwgezet ingegaan op de beschikbare gegevens en informatie, waarvan hieronder beknopt een aantal belangrijke elementen wordt weergegeven:

- De bodemgesteldheid wordt beschreven voor de wadbodem boven gemiddeld laagwater (G.L.W.).
- Meting en classificatie van de bodemgesteldheid worden op verschillende wijze uitgevoerd.

- De beschrijving van bodemgesteldheid is vooral gericht op ‘de waardering van de bodem naar agrarische maatstaven’.
- **‘In het algemeen blijkt het gebied boven G.L.W. voor circa 85% uit zand te bestaan met minder dan 3% lutum’- met een verwijzing naar De Glopper, 1967.**
- Het lutumgehalte van de platen voor de kwelders blijkt te variëren met het seizoen.
- In kleiarne gebieden hangt het voorkomen van plekken met kleihoudende bovengrond samen met de aanwezigheid van mosselbanken.

Stuurgroep hydrografisch-sedimentologisch en biologisch ecologisch onderzoek met betrekking tot de winning van zand in de Waddenzee (1981)

De literatuurstudie van Eijnsink (1979) was een van de bijdragen aan het onderzoek naar de effecten van zandwinning, waarvan de bevindingen zijn gerapporteerd in het rapport “zandwinning in de Waddenzee; resultaten van een hydrografisch-sedimentologisch en biologisch-ecologisch onderzoek”. In dit rapport staat over de bodemsamenstelling: “Over grote gebieden blijkt het wadsediment voor wel 90% uit betrekkelijk fijn zand te bestaan”. Een bronvermelding bij deze getallen ontbreekt.

Oost e.a. (1998)

De “Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee; gevolgen van aardgaswinning uit nieuwe velden” is een verslag naar de verschillende effecten van bodemdaling door gaswinning op verschillende aspecten van het Waddengebied, inclusief de kwelders en de eilandkusten. Specifiek van belang zijn de hoofdstukken 5 “Sedimentbalans van het waddensysteem & enkele empirische voorspellingen” (van A.P. Oost) en 6 “(Geo)morfologische effecten” (W.D. Eijnsink).

Hoofdstuk 6 (Geo)morfologische effecten (W.D. Eijnsink)

Om met het laatste hoofdstuk te beginnen, daar wordt in een voetnoot opgemerkt dat “In welke mate fijn sediment bijdraagt aan de opvulling van een bodemdalingsschotel in de Waddenzee hangt af van de locatie van deze schotel in de Waddenzee” en in de voetnoot 88 die daarbij hoort staat “gemiddeld genomen wordt uitgegaan van 10% (zie hoofdstuk 5)”. In het hoofdstuk is op pagina 227 en 228 is een inzet opgenomen, met de duidelijke titel: “Beperking invloed Noordzeekust door afzetting van slib”. Hierin wordt geconcludeerd dat “de afzetting van fijn sediment (kleiner dan $63\ \mu\text{m}$ à $75\ \mu\text{m}$) in de ondiepe bodemdalingsschotels in de Waddenzee niet ten koste gaat van de Noordzeekust en haar vooroever, omdat het daar niet in de bodem zit”. Aan de hand van sedimentmonsters, die Eijnsink representatief acht voor de Waddenzee (afkomstig uit de Wieringermeer in 1927, vóór de drooglegging) is een reductiefactor F_r afgeleid, voor het zandvolume (V_z) dat nodig is voor het vullen van een bodemdalingsschotel (met volume V_B). In deze berekening wordt rekening gehouden met de niet-lineaire bijdrage van slib aan de sedimentatie.

Formule voor droge soortelijke massa D :

$$D = 650 + 1000 (Z/100) \text{ kg/m}^3; \text{ waarbij } Z \text{ het zandgehalte is in gewichtsprocenten.} \quad [2]$$

Formule voor de reductie factor F_r :

$$F_r = Z \times D/D_{\text{zand}} = 0,4 Z + 0,006 Z^2 (\%) \quad [3]$$

En daarmee wordt het zandvolume dat uit de kuststrook nodig is:

$$V_z = V_B \times F_r/100 \text{ (in m}^3\text{)} \quad [4]$$

Daarna wordt door Eijnsink vastgesteld dat vanwege de ligging van de nieuwe gasvelden en de schattingen van de slibgehalten in de bodem reductiefactoren kunnen worden afgeleid van 0,7 tot 0,95. In voetnoot 91 wordt daarna gesteld dat: "In hoofdstuk 5 is mede hierop gebaseerd gekozen voor een (conservatieve) standaard van 10% (volume)reductie, omdat een deel van het fijnkorrelige materiaal lokaal kan zijn geërodeerd en vervangen door zand".²

In tabel 6.4 van Eijnsink is opgesomd wat de reductiefactoren zijn voor de kombergingsgebieden in de Waddenzee (zie figuur 2), overigens zonder het Marsdiep! De onderliggende gegevens over de korrelgrootte zijn gebaseerd op De Gloppe (1967) en de figuren komen exact overeen met de gegevens die in 1979 door Eijnsink zijn gebruikt. Tabel 1 met reductiefactoren is hieronder weergegeven.

Tabel 6.4: Maximale invloeden door gaswinning uit bestaande en nieuwe velden na 2000 en maximale reductiefactoren voor effect op Noordzeekust (maximaal bodemdalingsscenario)

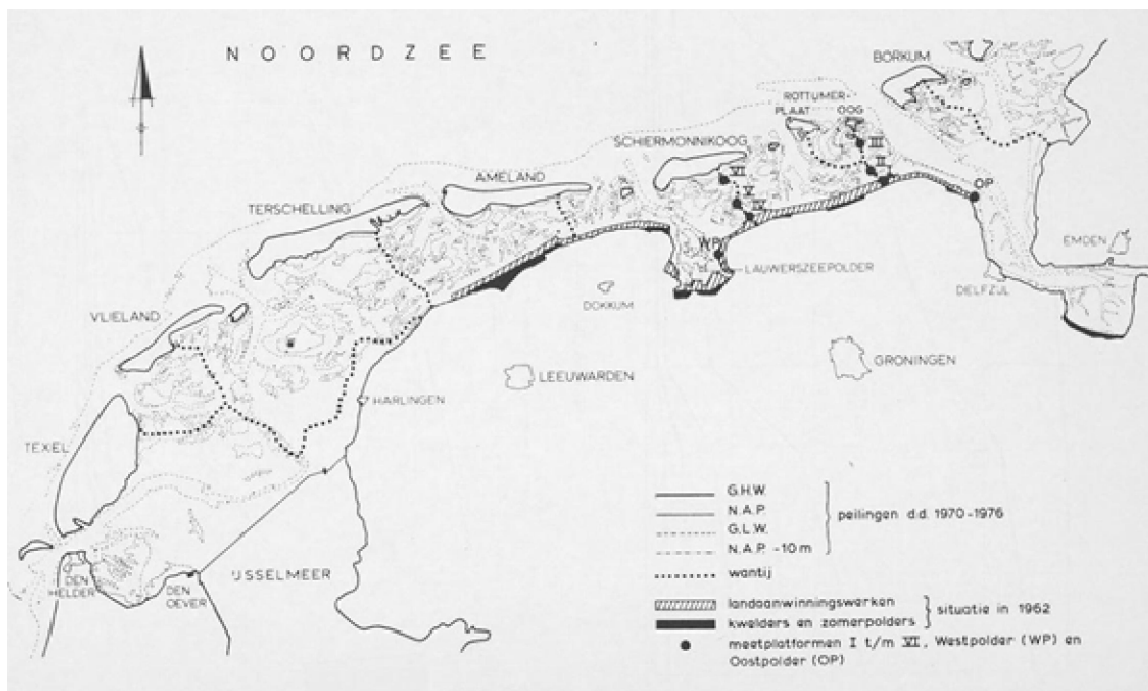
Vloedkom	Bodemdalingschotel (10^6 m^3)	Slib	Zand	F_r	$F_r \times \text{schotel}^{91}$
	Max.	(%)	(%)	(%)	(10^6 m^3)
Vlie	0,4	15-20	80-85	70-77	0,3
Borndiep	5,4	15-20	80-85	70-77	4,0
Pinkegat	7,7	15-20	80-85	70-77	5,8
Zoutkamperlaag	19,2	10	90	85	16,3
Eilanderbalg	3,0	5	95	92	2,75
Lauwers	15,4	5	95	92	14,2
Schild	0,6	5	95	92	0,55
Westereems	19,9	3	97	95	18,9
Totaal ⁹²	71,6	(gem. 10)		(88)	62,8

S : gemiddeld slibgehalte bodem (gewichtsprocenten)
 Z : gemiddeld zandgehalte bodem (gewichtsprocenten)
 F_r : reductiefactor voor effect op Noordzeekust en vooroever

Tabel 1 Tabel 6.4 uit het hoofdstuk van Eijnsink in Oost e.a. (1998)

Voor het Vlie zijn door Eijnsink reductiefactoren van 70-77% berekend. Het ontbreken van een getal voor het Marsdiep is het gevolg van de afwezigheid van gasvelden onder dat kombergingsgebied. Het ontbreken van dat kombergingsgebied is voor de bodemdaling door zoutwinning belangrijker dan het op eerste gezicht lijkt, omdat in de kombergingsdefinitie die door Eijnsink is gehanteerd (figuur 2), een flink deel van het studiegebied voor de bodemdaling door zout in het kombergingsgebied van het Marsdiep ligt. Voor dit stuk van het gebied zijn dus geen reductiefactoren voor het effect op de Noordzeekust beschikbaar.

² Toelichting Albert Oost. Dit kwam voort uit een discussie tussen Eijnsink en mij: de 10% volumeverkleining vond ik toen een veilig (conservatief) percentage.



Figuur 2 De indeling van de Waddenzee, zoals gebruikt door Eijnsink (1979). De gestippelde lijnen geven de gebruikte ligging van de wantijen weer.

Hoofdstuk 5 Sedimentbalans van het waddensysteem & enkele empirische voorspellingen (van A.P. Oost)

In dit hoofdstuk wordt gemeld dat de bouwstenen voor de wadden bestaan uit zand en slib, waarbij wordt vermeld dat “zo’n 85% van het Waddensediment bestaat uit zand, van Straaten, 1964”.

In het bijschrift van tabel 5.5 wordt een berekening van de nog op te vangen zandhonger per kombergingsgebied gepresenteerd, met in het bijschrift de opmerking “(gecorrigeerd voor 10 volume-procent slibsedimentatie)”, waarbij ook in deze tabel het Marsdiep ontbreekt.

De slibbeschouwing rond de slibbalans heeft verder betrekking op de aanvoer van slib naar de Waddenzee en de vraag of de slibaanvoer bij een hogere zeespiegelstijgingssnelheid van de Waddenzee een beperkende factor vormt voor het meegroeivermogen.

Hoeksema e.a. (2004)

In de “Bodemdalingstudie 2004; Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd” (Hoeksema e.a., 2004), wordt met betrekking tot slib alleen ingegaan op het eventuele effect van slib in suppletiezand op de sedimenthuishouding van de Waddenzee. Slib in relatie tot de sedimentatie in de Waddenzee wordt in het rapport niet besproken.

Zwarts (2004)

In het rapport “Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee” worden door Zwarts (2004) de gegevens van de korrelgroottes uit de Waddenzee vergeleken en wordt een vergelijking gemaakt tussen de situatie uit de jaren vijftig en de situatie in de jaren negentig. Deze vergelijking is alleen uitgevoerd voor de droogvallende platen. In Zwarts worden gemiddelde waarden genoemd voor het slibgehalte van de platen van 2,51% tot 3,46%, met hogere waarden voor het Westelijke Waddengebied, van 3,32% tot 5,30%. Dit betreft slib, dat wil zeggen de deeltjes kleiner dan 16 μm en zoals eerder is opgemerkt, alleen de droogvallende platen. Hieronder wordt nader ingegaan op de vergelijkingen door Zwarts van de verschillende bepalingsmethoden en de conclusies die daaruit zijn getrokken met betrekking tot de bijdrage van fijn sediment aan de sedimentatie in de Waddenzee.

Ministerie van Economische Zaken (2006)

In het rapport “Gaswinning binnen randvoorwaarden; Passende beoordeling van het rijksprojectbesluit gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen” wordt opgemerkt dat uit Zwarts (2004) blijkt dat er minder slib is in de bodem van de Waddenzee dan waar er in Oost et al. (1998) mee is gerekend.

Grasmeijer en Cleveringa, 2010 en de discussie daarom heen

In Grasmeijer en Cleveringa (2010) is de bijdrage van fijn sediment (de fractie kleiner dan 63 μm) aan de kombergingsgebieden van Marsdiep en Vlie berekend met de gegevens uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998), in combinatie met de opgetreden sedimentatie. Er zijn berekeningen uitgevoerd waar het effect van de verschillende formuleringen voor de dichtheid zijn onderzocht.

Op basis van een discussie met Herman Mulder is deze methode als minder robuust beschouwd en vervangen door een methode waarin de opgetreden sedimentatie niet wordt gebruikt en alleen gebruik wordt gemaakt van de gegevens over de aanwezigheid van fijn sediment uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998).

In het voorliggende rapport worden de resultaten van de berekeningen op basis van de Sedimentatlas volgens de ‘methode Mulder’ gepresenteerd.

4

Gegevens

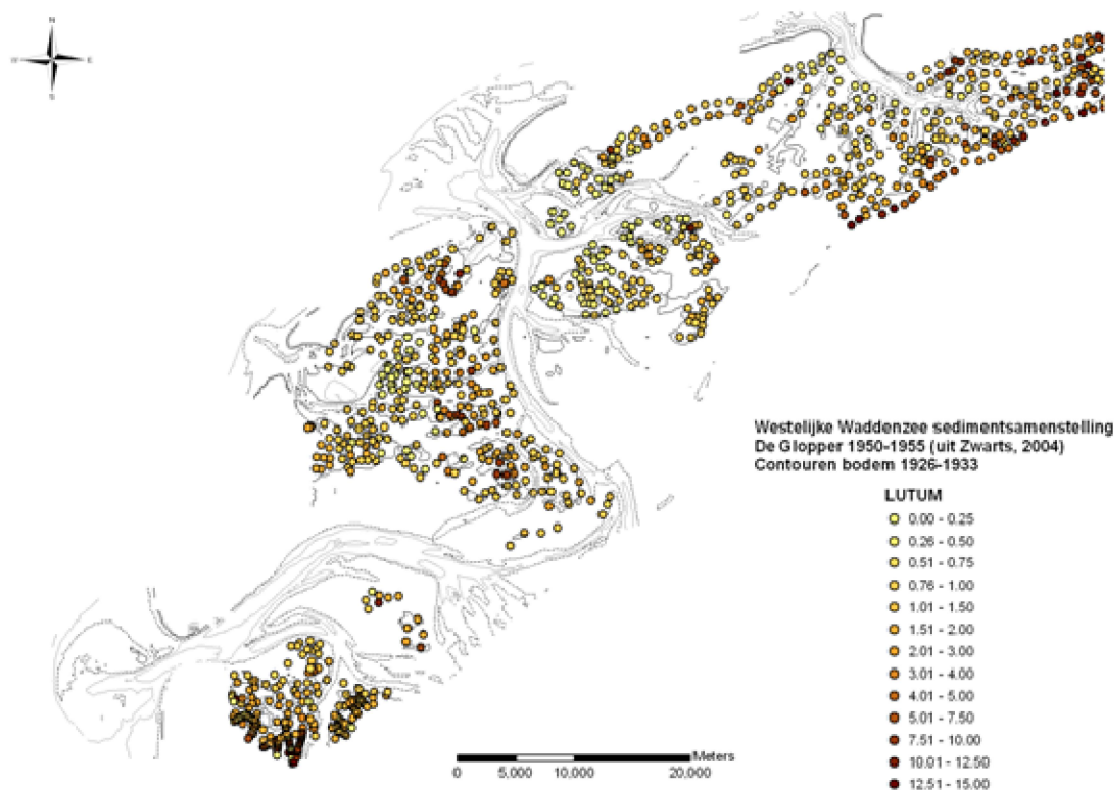
4.1 SAMENVATTING

De gegevens uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998) dekken het studiegebied voor de bodemdaling door zoutwinning veel beter dan de gegevens van De Glopper (1967). Andere gegevens die dezelfde ruimtelijke dekking bieden zijn niet beschikbaar.

4.2 INLEIDING

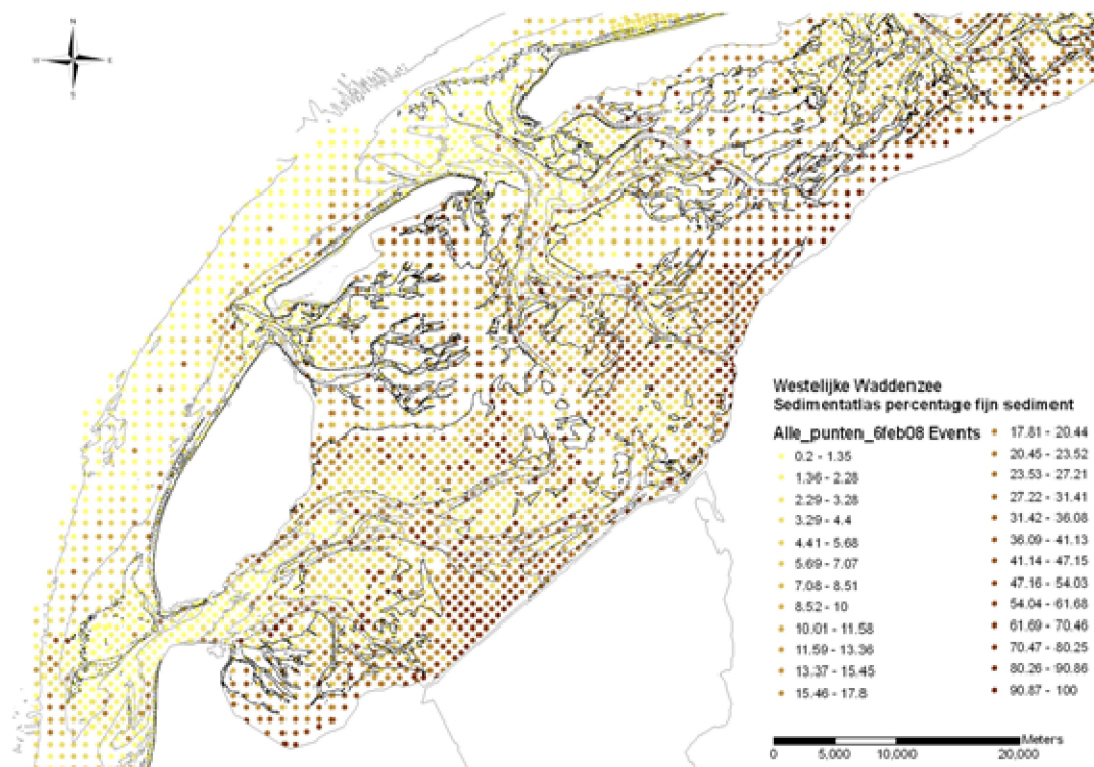
Een overzicht van de gegevens van de korrelgroottes in de Waddenzee is gepresenteerd door Lambeek in 1991. Hierin worden de verschillende studies, zoals die tot dan toe zijn uitgevoerd gerapporteerd en wordt vermeld welke gegevens waar beschikbaar zijn. De gegevens die na 1991 zijn verzameld zijn logischerwijs niet in het overzicht opgenomen, maar bij ons weten betreft dit tot nu toe alleen de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998), waarover verderop meer. De korrelgroottegegevens die worden verzameld als onderdeel van de benthos-bemonsteringscampagne van de droogvallende platen in de gehele Waddenzee, zijn nog niet beschikbaar. Uit het dataoverzicht van Lambeek (1991) blijkt dat er meerdere gegevenssets zijn, waarvan meetpunten in het studiegebied liggen. Nadere bestudering laat zien dat alle gegevenssets beperkingen hebben, bijvoorbeeld omdat ze beperkt zijn tot alleen de droogvallende platen, of alleen de geulen, of slechts zeer weinig punten omvatten.

De gegevens waar door de meeste auteurs gebruik van is gemaakt, komen uit de bodemkundige studie, die is uitgevoerd voor de landaanwinningswerken (Rijkswaterstaat, de toenmalige directie Wieringermeer) en waar meestal aan gerefereerd wordt met De Glopper (1967). De monsters zijn verzameld op de droogvallende platen (boven Gemiddeld LaagWater) en er heeft een bodemkundige analyse plaatsgevonden, waarbij het organische materiaal en de kalk zijn verwijderd. De originele gegevens zijn bewaard bij de Dienst IJsselmeergebied van Rijkswaterstaat en zijn gedigitaliseerd als onderdeel van het onderzoek van Zwarts (2004). De digitale gegevens zijn als bijlage bij het rapport van Zwarts (2004) beschikbaar. Het is belangrijk om in de beschouwing van deze gegevens te bedenken dat ze op de droogvallende platen zijn genomen (figuur 3). In het begin van de jaren '50, toen de monsternamen plaatsvond, was het areaal droogvallende platen in de Westelijke Waddenzee beduidend kleiner dan tegenwoordig. Juist in het studiegebied voor de bodemdaling is er veel verschil tussen het areaal droogvallende platen toen en tegenwoordig. Het aantal monsterpunten uit de set van De Glopper is dan ook relatief klein voor het studiegebied rond de bodemdaling door zoutwinning.



Figuur 3 Locaties en gegevens van de bodemonsters van De G lopper, uit Zwarts, 2004. Alle datapunten liggen op de droogvallende platen uit de periode 1950-1955 en ter illustratie zijn de onderliggende bodemcontouren uit 1926-1933 weergegeven.

Van de andere gegevensbronnen is Ente (1987) in potentie de meest interessante, omdat hierin wordt gerapporteerd over het sublitoraal van de westelijke Waddenzee (dieptes van NAP -5 m tot GLW). De in Lambeek gepresenteerde gegevens lijken overeen te komen met de gegevens uit de Sedimentatlas.



Figuur 4 Locaties en gegevens van de bodemonsters van Sedimentatlas. Ter illustratie zijn de onderliggende bodemcontouren uit 2004 weergegeven.

De monsters die zijn gerapporteerd in de Sedimentatlas zijn verzameld in de gehele Waddenzee. In figuur 4 zijn in een kaart de monsterpunten weergegeven voor de Westelijke Waddenzee. Belangrijk is dat de Sedimentatlas zowel de droogvallende delen (platen) als de natte delen (geulen) dekt.

Een vergelijking van figuur 3 met de monsterpunten van De Glopper en figuur 4 met de monsterpunten uit de Sedimentatlas laat het grote verschil in dekking zien tussen de twee gegevenssets. Daarbij valt op dat de delen die zeer rijk zijn aan fijn sediment in de Sedimentatlas, namelijk de Vlakte van Oosterbierum, de omgeving van Harlingen en het gebied direct ten noordwesten van Afsluitdijk, niet in de gegevens van De Glopper zijn vertegenwoordigd. Deze slibrijke delen waren (en zijn gedeeltelijk nog steeds) geen droogvallende platen.

5

De waarde(n) van de
Sedimentatlas

5.1 SAMENVATTING

De gegevens uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998) worden gebruikt voor het bepalen van het gehalte fijn sediment. Om tegemoet te komen aan de opmerkingen van Zwarts (2004) met betrekking tot de gerapporteerde waarden voor de fijne fracties in de Sedimentatlas, wordt voorzichtigshalve uitgegaan van een mogelijke overschatting van 1,71 +/- 0,1 van het gewichtspercentage fijn sediment ($< 63 \mu\text{m}$) in de Sedimentatlas.

5.2 INLEIDING

In het rapport van Zwarts (2004) staat de zin “Het “slibgehalte” bepaald met de Malvern bleek 2 tot 3 maal zo hoog te liggen als bepaald met de afslibmethode!”. Deze zin staat in de context van de omzetting van meetresultaten van de Malvern-analyse (zoals gerapporteerd in de Sedimentatlas Waddenzee, Rijkswaterstaat, 1998) naar slibgehalte bepaald met de gravimetrische methode (paragraaf 2.8 in het betreffende rapport) en is binnen die context prima op zijn plek. Maar deze “twee- en driemaal” zijn hun eigen leven gaan leiden en worden nu altijd genoemd als het om de uitkomsten van de Sedimentatlas gaat.

Voor het bepalen van de bijdrage van fijn sediment aan de netto sedimentatie in de Westelijke Waddenzee en aan de opvulling van de bodemdalingschotel is de Sedimentatlas de aangewezen bron van gegevens, omdat de gebiedsdekking van de andere potentiële bronnen ontoereikend is (vergelijk figuur 4 met figuur 3). Hoe dan om te gaan met de opmerking van Zwarts over het slibgehalte uit de Sedimentatlas? Daartoe wordt hieronder uitgelegd wat de verschillen zijn in de bepalingen en wat de gevolgen daarvan zijn voor het gebruik van de gegevens. Er is overigens niet en zeker niet met terugwerkende kracht, vast te stellen of er een ‘betere’, dan wel ‘slechtere’ methode is voor het bepalen van het slibgehalte en de korrelgrootteverdeling. Wel biedt het gebruik van verschillende methoden en instrumenten verklaringen voor het optreden van verschillen. Om recht te doen aan het voorzorgsprincipe, dat steeds is gehanteerd als het gaat om de mogelijke effecten van bodemdaling op de Waddenzee, wordt er gerekend met lage, maar wel realistische waarden voor het gehalte fijn sediment in de bodemdalingschotel. Daarom wordt een reductiefactor afgeleid voor het gebruik van de getallen uit de Sedimentatlas, die voldoende recht doet aan de constatering van Zwarts (2004), maar geen veiligheid op veiligheid stapelt.

Voorbehandeling monsters

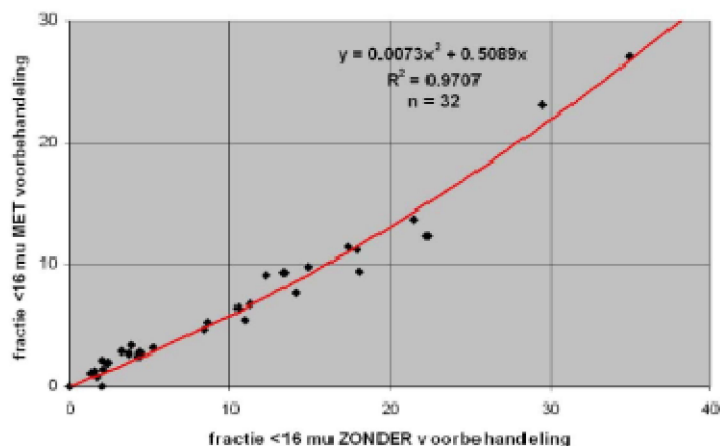
De Glopper/RIJP: De monsters die hiervoor zijn gebruikt, zijn behandeld met zoutzuur en waterstofperoxide, zodat het kalk en het organisch materiaal is opgelost. Op deze wijze wordt alleen de korrelgrootteverdeling van de siliciklastische componenten bepaald.

Sedimentatlas: De korrelgroottebepalingen zijn verricht op monsters die door een 2 mm zeef zijn gehaald. Het gewicht van de korrelgroottefractie groter dan 2 mm is los bepaald en aan de verdeling toegevoegd.

Bij deze bepaling is dus al het sediment gebruikt, inclusief de deeltjes die uit kalk en organisch materiaal bestaan.

Is dit verschil belangrijk? Ja, juist bij de fijne fracties kan de bijdrage van organisch materiaal oplopen, terwijl bij de iets grovere fracties kalk een bijdrage kan leveren. Dit wordt door Zwarts (2004) getoond in een grafiek met korrelgrootte bepalingen, weergegeven als de fractie kleiner dan 16 µm, bepaald met hetzelfde apparaat (Coulter) voor 32 monsters die zowel *niet* als *wel* zijn voorbehandeld met zoutzuur en waterstofperoxide. De grafiek is hieronder weergegeven in figuur 5.

Figuur 2.7
De relatie tussen de fractie < 16 µm (bepaald met de Coulter), nadat de monsters wel en niet zijn voorbehandeld om kalk en organische stof te verwijderen.



Figuur 5 De grafiek 2.7 uit Zwarts (2004), met de relatie tussen niet en wel voorbehandelde monsters.

Uit de grafiek en de daarin vermelde relatie voor de trendlijn blijkt dat het percentage van de fractie kleiner dan 16 µm van 20% in een monster dat *niet* is voorbehandeld, te zijn teruggelopen tot 13%, nadat het monster is behandeld.

Meetmethode

Door Zwarts worden vier verschillende methode beschreven waarmee in de periode van 1950 tot 2004 korrelgroottes zijn bepaald:

Zeef: metingen over zeven met verschillende maaswijdtes, dus op basis van de grootte van deeltjes.

Slibgehalte (graviometrisch): metingen in vloeistof in valkolommen op basis van de valsnelheid van de deeltjes.

Malvern Laser Particle Size analyser: metingen van de lichtbreking die de deeltjes veroorzaken.

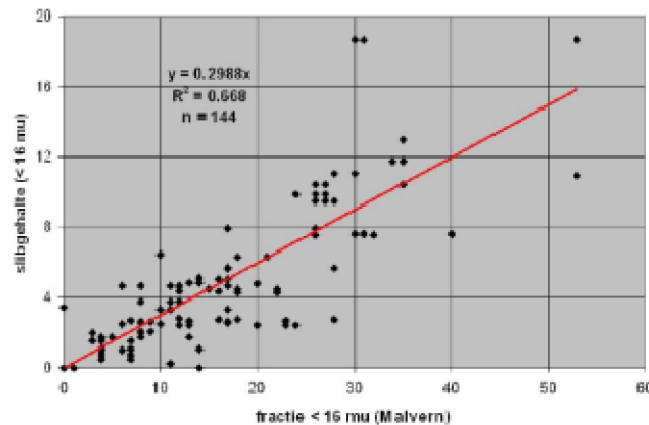
Coulter Laser Particle Size analyser: metingen van de lichtbreking die de deeltjes veroorzaken.

Er is dus sprake van drie verschillende meetmethoden en bij de Malvern en Coulter van twee verschillende apparaten. De gemeten grootheden voor de drie meetmethoden zijn aan elkaar gerelateerd, maar niet hetzelfde (respectievelijk grootte en vorm van de deeltjes; gewicht en hydraulische ruwheid van de deeltjes; grootte, vorm en brekingsindex van de deeltjes). De verschillende eigenschappen verklaren het optreden van de verschillende resultaten van de methoden. De wijze van meten (opstelling van de laser, aantal detectoren, etc.) en het verwerken van de ruwe gegevens tot korrelgrootteverdelingen verklaren de verschillen tussen de Malvern en de Coulter.

Door Zwarts (2004) is een vergelijking gemaakt van monsters waarvan het gehalte kleiner dan 16 µm is, gemeten met de 'slibmethode' (graviometrisch – De Glopper, 1967) en met de Malvern (Sedimentatlas). Maar daarbij is er ook het verschil dat de monsters bij de 'slibmethode' *wel* en bij de Malvernmethode *niet* zijn voorbehandeld. Er lopen dus twee effecten door elkaar. De vergelijking is getoond in de onderstaande grafiek (figuur 6). Het graviometrisch bepaalde slibgehalte is 0,3 x slibgehalte volgens de Malvernmetingen. Als we dat corrigeren voor het behandelen van de monsters, volgens de getoonde

relatie in figuur 5, dan is het verschil dat voortkomt uit de meetmethode alleen naar schatting 0,5 voor de fractie kleiner dan 16 µm. Overigens is de onderstaande grafiek degene die verband houdt met de opmerking van Zwarts over het 2 tot 3 maal zo hoge “slibgehalte”.

Figuur 2.8
De relatie tussen de fractie < 16 µm (bepaald met de Malvern) en het gravimetrisch bepaalde slibgehalte. De Malvern monsters zijn niet voorbehandeld, de slibmonsters wel.



Figuur 6 De grafiek 2.8 uit Zwarts (2004), met de relatie tussen niet voorbehandelde monsters gemeten met de Malvern en wel voorbehandelde monsters waarvan het slibgehalte gravimetrisch is bepaald.

Definitie fijn sediment

De definities voor fijn sediment en slib zijn niet ‘hard’ en dit is een verdere verklaring voor het optreden van verschillen:

1. Slibgehalte volgens Zwarts (2004): fractie siliciklastische deeltjes kleiner dan 16 µm.
2. Fijn sediment volgens Rijkswaterstaat (1998): fractie kleiner dan 63 µm.

Voor het gebruik van de fractie in relatie tot het volume van de sedimenten is het gebruikelijk om de definitie van fijn sediment volgens Rijkswaterstaat (1998) te hanteren, dat wil dus zeggen alle deeltjes kleiner dan 63 µm. Dit is bijvoorbeeld ook gebeurd door Eijsink (1979 en in Oost e.a., (1998), in de slibstudie voor de Eems-Dollard (Hartsuiker en Grasmeijer, 2008) en een balansstudie voor het zeegat van Texel (van Marion, 1999). Immers, alle sedimentdeeltjes, ongeacht of deze bestaan uit kalk, organisch materiaal of silica-mineralen, dragen bij aan het sedimentatievolume. Dit komt overeen met de beschrijvingen van de bijdrage van fijn sediment aan de sedimentatie in de Waddenzee in bijvoorbeeld Oost e.a. (1998).

5.3 VOORSTEL

Hoe nu om te gaan met het verschil in de definitie van slib volgens Zwarts (2004) en fijn sediment volgens Rijkswaterstaat (1998) en de mogelijke overschatting van het slibgehalte?

Het voorstel is meerledig: (i) de data van de Sedimentatlas worden gebruikt, (ii) correctie op data van Sedimentatlas wegens verschil in voorbehandeling, waarbij (a) de correctiefactor voor de fractie < 16 µm anders is dan (b) voor de grovere fractie van 16 µm tot 63 µm en (iii) geen correctie op data Sedimentatlas wegens verschil in meetinstrument.

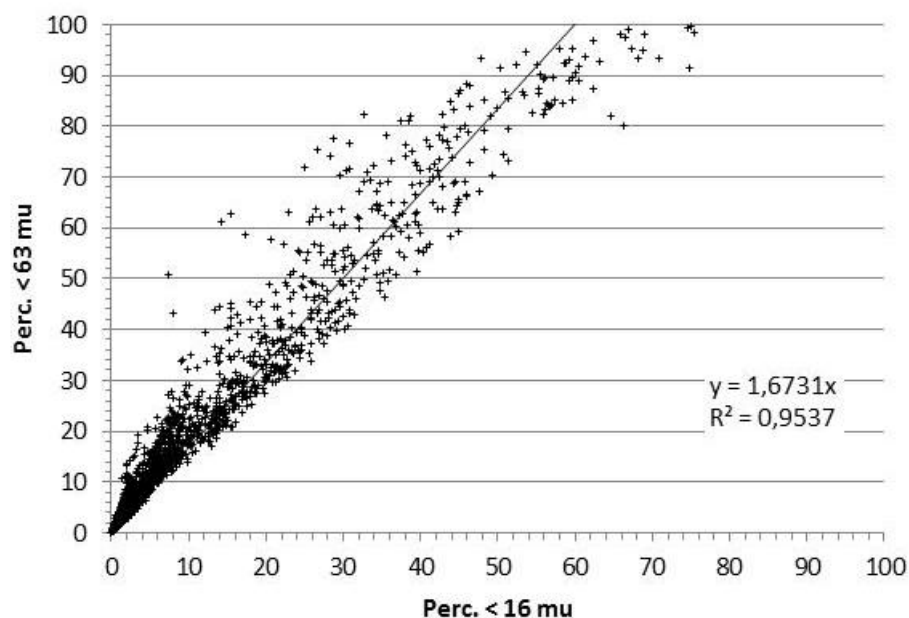
Correctiefactor voor de fractie 16 µm tot 63 µm.

Voor de fractie tot 16 µm kan de mogelijke overschatting worden teruggebracht tot een factor 2, door rekening te houden met het verschil in de voorbehandeling van de monsters. Voor de factor van 16 µm tot 63 µm is echter geen afzonderlijke vergelijking beschikbaar tussen de bepaling met Malvern en de gravimetrische slibbepalingen, omdat voor deze fractie bij de gravimetrische bepalingen niet afzonderlijk is meegenomen. Het is niet voor de hand liggend om bij de fractie van 16 µm tot 63 µm door de Malvern uit te gaan van dezelfde mate van overschatting met een factor 2, als bij de kleinste factor. Bij

korrelgroottes in het zandbereik is bij een Malvern namelijk eerder sprake van een overschatting van de korrelgrootte van de grove fractie, dan van een onderschatting ten opzichte van andere bepalingen. Uitgaan van geen enkele overschatting doet geen recht aan de observaties van Zwarts (2004). We stellen daarom voor om uit te gaan van een overschatting ten opzichte van andere bepalingen van de percentages in de fractie van 16 µm tot 63 µm van een factor 1 tot 1,5.

Weging van de fracties van 0 tot 16 µm en 16 µm tot 63 µm

De correctiefactor voor de fractie 0 tot 16 µm is 2 en voor de fractie 16 µm tot 63 µm is deze 1 tot 1,5. Deze worden gewogen gecombineerd, door rekening te houden met de verhouding waarin deze fracties in het gebied aanwezig zijn. In figuur 7 is in een grafiek de verhouding tussen de slibfracties < 63 µm en < 16 µm volgens data van de Sedimentatlas voor de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep weergegeven. Uit de relatie tussen dezen twee fracties (trendlijn in figuur 7) valt op te maken dat de fractie van 0 tot 16 µm 60% bedraagt van de fractie van 16 µm tot 63 µm, oftewel gelijk 1/ 1,673 maal de fractie van 16 µm tot 63 µm.



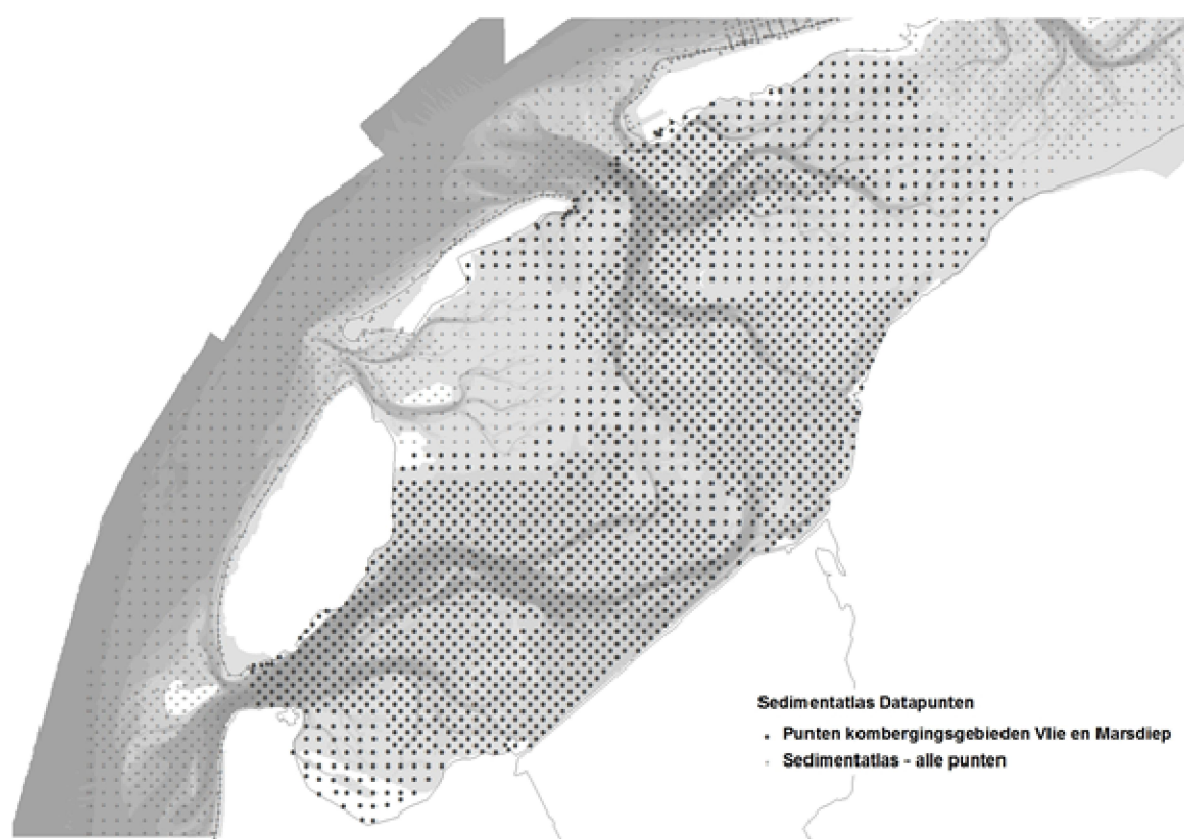
Figuur 7 Grafiek met de verhouding tussen de slibfracties < 63µm en < 16 µm volgens data van de Sedimentatlas voor de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep (n = 2301, zie de kaart in figuur 8).

Berekening van de correctiefactor

In tabel 2 wordt de berekening van de correctiefactor getoond. Bij het gebruik van fijne fracties in de Sedimentatlas, wordt voorzichtigheidshalve uitgegaan van een mogelijke overschatting van 1,71 +/- 0,1 van het gewichtspercentage fijn sediment (< 63 µm).

Bijdrage		Overschatting door Malvern t.o.v. Graviometrische bepaling
Fractie van 0 tot 16 µm	60%	Factor 2
Fractie 16 tot 63 µm	40%	Factor 1 -1,5
Totaal Fractie van 0 tot 63 µm	100%	Factor 1,6-1,8

Tabel 2 Berekening van de correctiefactor voor het percentage fijn sediment (fractie van 0 tot 63 µm) uit de Sedimentatlas, voor het berekenen van de reductiefactor voor de zandaanvoer uit de kustzone.



Figuur 8 Kaart met de ligging van de datapunten.

6

Compactie en de opvulling van de bodemdalingsschotel

6.1 SAMENVATTING

In de berekeningen wordt rekening gehouden met het optreden van compactie door met de bovengrens van de relatie van Mulder (1995) voor de dichtheid van sedimentmengsel te rekenen.

6.2 INLEIDING

Een mengsel van zand en fijn sediment dat vers in de Waddenzee is afgezet, is meestal een relatief zacht en soms zelfs bijna vloeibaar mengsel. Het mengsel bestaat naast het zand en fijn sediment ook uit water, dat tussen de korrels zand en de deeltjes fijn sediment aanwezig is. Bij vers afgezet materiaal is er nog relatief veel water tussen de deeltjes aanwezig en dat maakt het mengsel zacht. Naarmate het mengsel van zand, fijn sediment en water langer 'staat', neemt het aandeel water in het mengsel af. De korrels zand en de deeltjes fijn sediment raken steeds meer op elkaar gestapeld en de poriënruimte tussen deze korrels en deeltjes, waar plaats is voor het water, neemt af. Ook de ruimte die het mengsel inneemt neemt af. Deze verandering van het sediment wordt compactie genoemd.

De volumeafname waar de compactie mee gepaard gaat, is van belang voor het effect van de bodemdaling door zoutwinning. Het volume dat aan bodemdaling in de Waddenzee plaatsvindt, moet namelijk worden aangevuld met eenzelfde volume aan sediment. Hieronder twee voorbeelden, het eerste zonder compactie, het tweede met compactie (waarbij willekeurige percentage is gekozen voor het percentage fijn sediment en de compactie).

Voorbeeld 1

1. Volledige opvulling volume bodemdaling ($V_{\text{bodem}} = 12,2 \text{ Mm}^3$) met volume zand ($V_{\text{zand}} = 12,2 \text{ Mm}^3$).
2. Geen effect van compactie.
3. Eén op één relatie bodemdaling en opvulling.

Voorbeeld 2

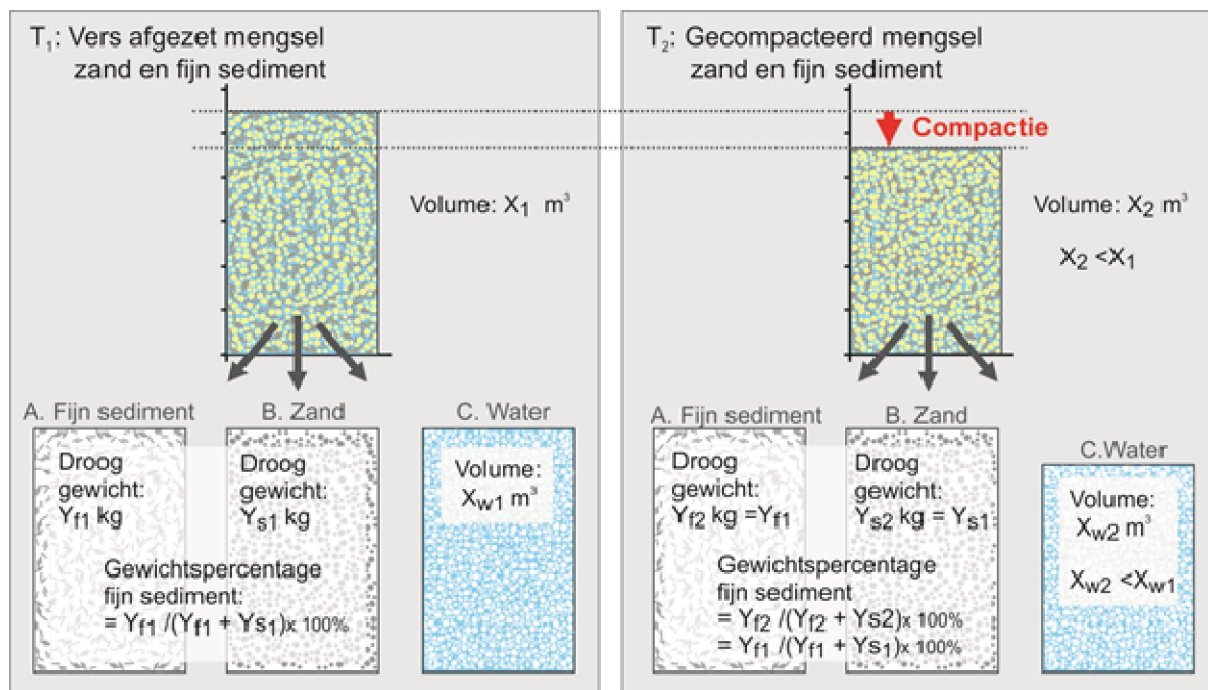
1. Volledige opvulling volume bodemdaling ($V_{\text{bodem}} = 12,2 \text{ Mm}^3$) met volume zand/slib mengsel ($V_{\text{mengsel}} = 12,2 \text{ Mm}^3$, Gewichtspercentage $P_{\text{fijn}} = 28\%$), zonder compactie.
2. Compactie: Volumereductie van 15%.
3. Opvulling resterende volume.

In het bovenstaande voorbeeld 1 heeft compactie geen effect op de manier waarop de opvulling van de bodemdalingsschotel plaatsvindt, bij voorbeeld 2 wel. Het optreden van compactie introduceert een

vertraging in de sedimentvraag door de opvulling van de bodemdalingsschotel. Belangrijk is dat de voorliggende vraag is: "Heeft compactie een effect op het benodigde sedimentvolume?" Om dat te beoordelen is het nodig om nader op de compactie in te gaan en op de wijze waarop de opvulling van de bodemdalingsschotel is berekend. In het onderstaand figuur is daartoe schematisch weergegeven hoe de compactie is zijn werk gaat: Een sedimentkolom heeft op het beginmoment T_0 een volume X_1 . Dit volume is opgebouwd uit een deel water, een deel zand en een deel fijn sediment.

Na verloop van tijd, op moment T_1 , is het volume van de sedimentkolom afgenomen tot X_2 , omdat er compactie heeft plaatsgevonden. De opbouw is nog steeds vergelijkbaar, delen water, zand en fijn sediment, maar het aandeel water in het mengsel is afgenomen. De bijdrage van zand en slib aan het mengsel is op beide momenten (T_0 en T_1) hetzelfde, door de compactie veranderd weliswaar de wijze waarop de deeltjes op elkaar zijn gestapeld, maar niet het materiaal zelf.

De crux van dit voorbeeld is dat de gewichtsbijdrage van zand en fijn sediment zowel op T_0 als op T_1 hetzelfde is. Daarmee is ook het percentage fijn sediment in het mengsel bekend. Dat percentage fijn sediment is op beide momenten gelijk. Het is dit percentage fijn sediment dat wordt gebruikt bij de berekening van de droge dichtheid. Deze droge dichtheid van het mengsel wordt gebruikt bij de berekeningen van de volume bijdrage. Dat betekent dus dat, ongeacht de hoeveelheid water in het mengsel en ongeacht de mate van compactie, hetzelfde sedimentvolume wordt berekend bij hetzelfde percentage fijn sediment. In het getoonde voorbeeld betekent dit dat het *berekende* sedimentvolume voor beide momenten hetzelfde is.



Figuur 9 Schematische weergave van het effect van compactie op de drie delen (fijn sediment, zand en water) van een sedimentvolume.

De hamvraag wordt daarmee: Lijkt het *berekende* sedimentvolume, op basis van de bepaalde dichtheid, die een functie is van het gewichtspercentage fijn sediment, het meest op een niet, of slechts beperkt gecompacteerd mengsel (X_0 uit de bovenstaande figuur), of op een gecompacteerd mengsel (X_1 uit de figuur). Want het antwoord op die vraag is ook het antwoord op de vraag of er in voldoende mate rekening is gehouden met compactie.

Bovenstaande beschouwing komt er in de kern op neer dat de te gebruiken droge dichtheid een maat is voor de compactie. Uitgangspunt is dat de relatie tussen het slibgehalte en de droge dichtheid van het sediment voor de huidige situatie gelijk is aan die voor het sediment dat afgezet wordt in de bodemdalingsschotel.

De droge dichtheid als functie van het percentage fijn sediment wordt berekend met een formule. Hiervoor is in het achtergrondrapport (Grasmeijer & Cleveringa, 2010) gebruikt gemaakt van de formule van Mulder (1995):

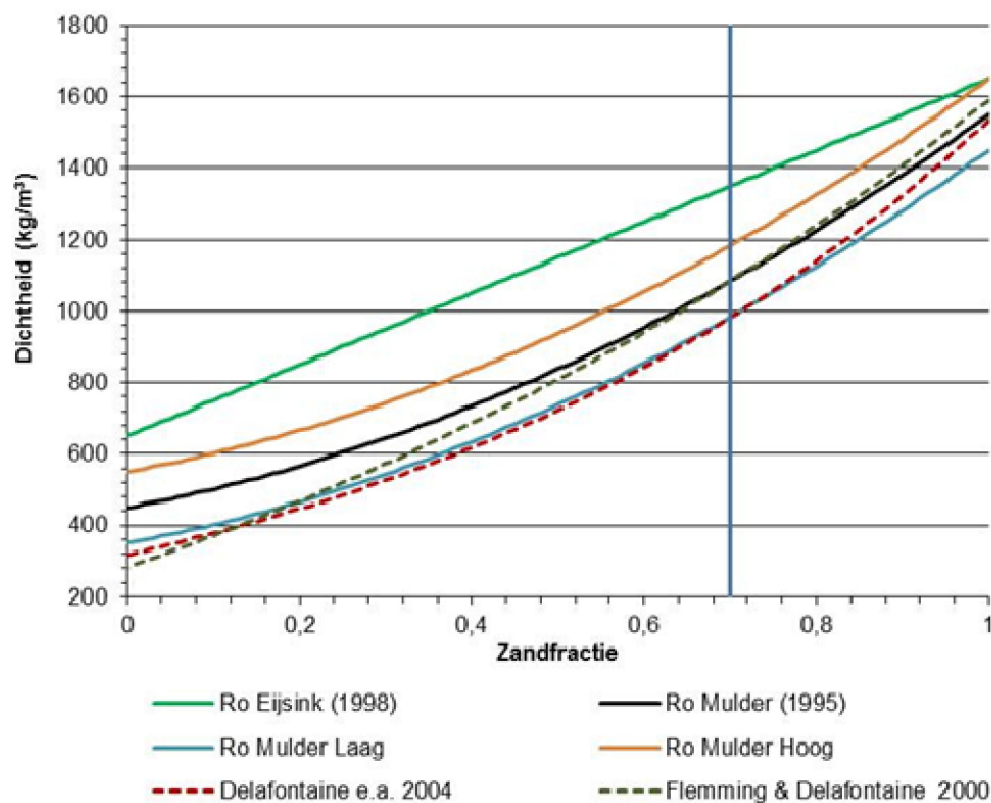
$$\rho_{\text{dry}} = 1550 - 17,5 \times p_{\text{fijn}} + 0.065 \times p_{\text{fijn}}^2 \quad [5a]$$

In het werkdocument waarin de totstandkoming van deze formule is gedocumenteerd, staat: “Als standaardafwijking ligt een waarde van 100 kg m^{-3} voor hand. Deze standaardafwijking heeft een systematisch karakter.” De relatie van Mulder (1995) en de standaardafwijking (Ro Mulder hoog en Ro Mulder Laag) zijn weergegeven in de grafiek (figuur 10).

In de grafiek in figuur 10 zijn ook drie andere relaties weergegeven, namelijk de relatie die door Eijsink is gebruikt in de Integrale bodemdalingstudie Waddenzee (Oost e.a., 1998) en twee relaties die zijn vastgesteld voor respectievelijk de Duitse (Flemming & Delafontaine, 2000) en de Deense Waddenzee (Delafontaine e.a., 2000). De relatie die door Eijsink is gebruikt gaat uit van een lineaire verband tussen de sedimentsamenstelling en de dichtheid. De andere twee relaties zijn, net als de relatie van Mulder, niet lineair en vertonen in hun ‘holle’ vorm een duidelijke overeenkomst.

De relaties die voor de Duitse Waddenzee zijn vastgesteld, zijn gebaseerd op metingen aan oppervlaktesediment uit de Waddenzee. De berekende dichtheden komen, met name voor mengsels met veel fijn sediment, overeen met de ondergrens zoals die volgt uit de formule van Mulder (1995). Waarschijnlijk hebben deze relatief lage waarden betrekking op sediment dat nog weinig compactie heeft ondergaan. De relatie die door Eijsink is gebruikt, geeft waarden voor de dichtheid die stelselmatig boven de waarden liggen die uit de andere waarden volgen.

In de grafiek in figuur 10 is de zandfractie van 0,7, oftewel een mengsel met 70 gewichtsprocenten zand en 30 gewichtsprocenten fijn sediment, gemarkeerd met een blauwe lijn. Dit mengsel is gebruikt als een voorbeeld om de gevolgen van de verschillen in dichtheden te vertalen naar volumebijdragen van zand en fijn sediment. In tabel 3 zijn de berekeningsresultaten weergegeven, op basis van de dichtheden die volgen uit de verschillende formules. Bij een gewichtspercentage zand 70% varieert de volumebijdrage van zand tussen 44,8% en 57,3%. De grootste bijdrage van zand volgt uit de relatie die wordt gebruikt door Eijsink. Het percentage dat wordt berekend komt, zoals verwacht overeen met de reductiefactor F_r .



Figuur 10 Grafiek met de relatie tussen sedimentsamenstelling en de droge dichtheid van het zand-fijn sedimentmengsel, volgens verschillende formules.

Formule droge dichtheid	Gewicht 1 m ³ mengsel 70% zand	Waarvan gewicht zand	Waarvan gewicht slib	Gewicht 1 m ³ zand	F _r (vergelijking 3)
	<i>Kg</i>	<i>Kg</i>	<i>Kg</i>	<i>Kg</i>	%
Mulder (1995)	1084	759	325	1550	49,0%
Mulder Laag	984	688	295	1450	47,5%
Mulder Hoog	1184	828	355	1650	50,2%
Eijsink (1998)	1350	945	405	1650	57,3%
Delafontaine e.a. (2004)	982	687	295	1534	44,8%
Flemming & Delafontaine (2000)	1085	759	325	1591	47,7%

Tabel 3 Berekening van de volume bijdrage zand en slib bij een gewichtsvolume van 30% fijn sediment en 70% zand met verschillende formules voor de droge dichtheid.

De relatie van Mulder (1995) is, hoewel deze is afgeleid voor de toepassing in een sedimentbalans voor de Eems-Dollard, het meest toegespitst op de situatie in de Nederlandse Waddenzee. De vergelijkbare vorm van deze relatie met die voor de Duitse en Deense Waddenzee geeft vertrouwen in deze relatie. De lineaire relatie die door Eijsink is gebruikt, door minder recht aan de verwachte relatie tussen de sedimentsamenstelling en dichtheid, waarin een niet-lineaire verhouding wordt verwacht, vanwege de wijze waarop mengsels van zand, water en fijn sediment zijn opgebouwd.

Door de door Mulder (1995) voorgestelde standaardafwijking op te leggen aan de relatie, zodanig dat er hogere waarden voor de dichtheid worden gebruikt (Mulder Hoog in grafiek en tabel), wordt rekening gehouden met gecompacteerd sediment. De berekende waarden liggen hiermee beduidend hoger dan de waarden die worden afgeleid uit de relaties voor de Duitse en Deense Waddenzee. De vergelijking die wordt gebruikt is volgende:

$$\rho_{\text{dry}} = 1650 - 17,5 \times p_{\text{fijn}} + 0.065 \times p_{\text{fijn}}^2 \quad [5b]$$

7

Berekeningen en resultaten

7.1 SAMENVATTING

De bijdrage van fijn sediment (< 63 µm) in termen van het volume is berekend voor het studiegebied en de bodemdalingsschotel, op basis van de Sedimentatlas, waarbij rekening is gehouden met een reductie van de waarden van met een factor 1,71 en de dichtheid van het sediment met inbegrip van compactie is berekend met de formule van Mulder [5b]. De volume bijdrage van fijn sediment bedraagt 25,5% voor het studiegebied en 24,8% voor de bodemdalingsschotel. Daarmee komt de reductiefactor F_r op respectievelijk 74,5% en 75,2%.

7.2 BEREKENINGEN

De berekeningen omvatten een aantal stappen.

1. Distributie fijn sediment (< 63 µm) Sedimentatlas in het deelgebied.
2. Reductie van de waarden Sedimentatlas Fijn sediment (< 63 µm) met factor 1,71.
3. Berekening dichtheid sediment (D_{sed}) in het deelgebied met formule [5b] naar Mulder (1995).
4. Omrekening van de gemiddelde dichtheid naar de volumebijdrage van fijn sediment en zand.

Stap 4 is in essentie vergelijking 3 (van Eijnsink in Oost e.a., 1998):

Formule voor de reductie factor F_r :

$$F_r = Z \times D_{sed} / D_{zand} \text{ (%) } [3]$$

Met $Z = 1 - P_{fijn}$ en $D_{zand} = 1650 \text{ kg/m}^3$ wordt dit:

$$F_r = (1 - P_{fijn}) \times D_{sed} / 1650$$

5. Middeling van de reductiefactor F_r over het deelgebied.

De reductiefactor F_r komt hierbij overeen met V_{zand} . Met de reductiefactor kan vervolgens berekend worden hoeveel zandvolume nodig is om de zandsedimentatie in de bodemdalingsschotel met volume te compenseren:

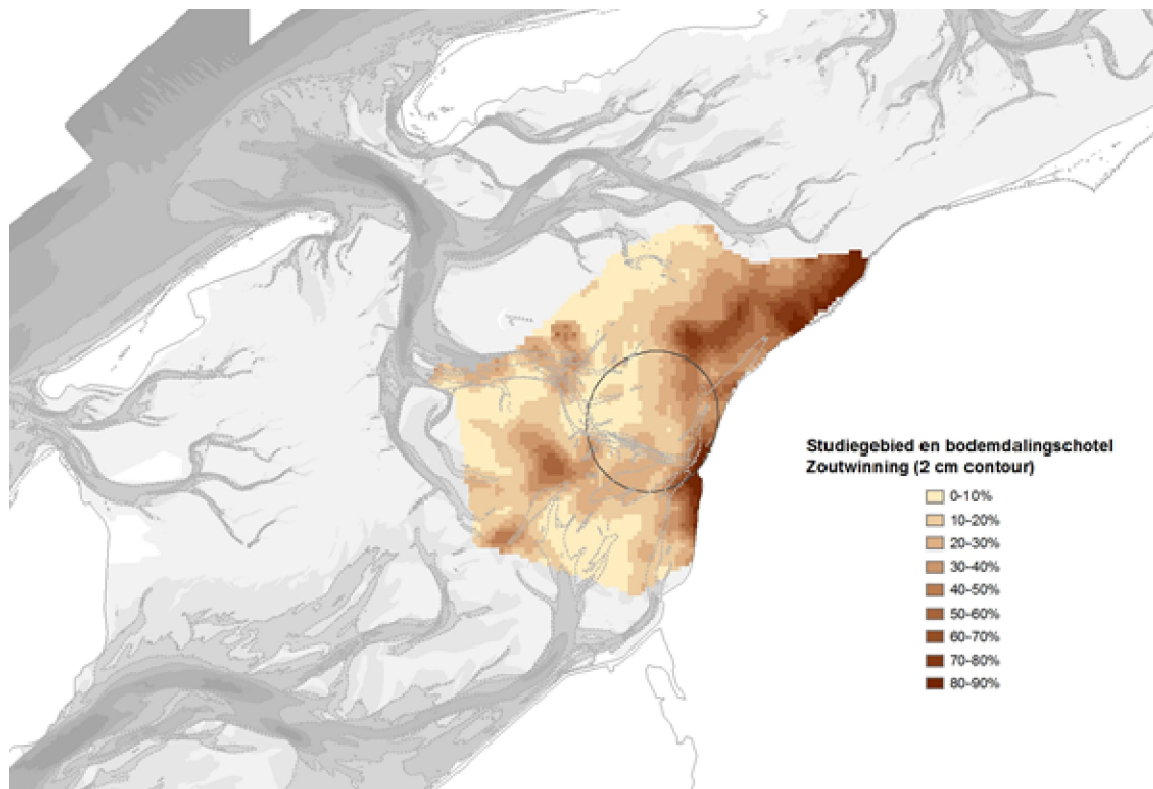
$$V_z = V_B \times F_r / 100 \text{ (in m}^3\text{)} [4]$$

7.3 RESULTATEN

In tabel 4 zijn de resultaten van de berekeningsstappen weergegeven, voor het studiegebied en voor de bodemdalingsschotel. De gebieden waarover de berekeningen zijn uitgevoerd zijn aangegeven in figuur 11. Het studiegebied is dat deel van de kombergingsgebieden Vlie en Marsdiep waarvan de waterbeweging wordt beïnvloedt door de aanwezigheid van een niet-opgevulde bodemdalingsschotel. In het achtergrondrapport “Effecten van de zoutwinning op de ecologische waarden in de Waddenzee” (Kater e.a., 2010) is aangegeven hoe het studiegebied tot stand is gekomen, en de achterliggende berekeningen zijn gerapporteerd in het achtergrondrapport “Hydrodynamische effecten en abiotische parameters” (Hartsuiker, 2010). De berekening van de bodemdalingsschotel is getoond in het achtergrondrapport “FRISIA Zout B.V.; Informatie Bodemdaling door Zoutwinning v.3.0” (Bakker & Duquesnoy, 2010).

	Stap 1	Stap 2	Stap 3	Stap 4 & 5
	Fijn sediment (gemiddelde gewichtsperscentage - oorspronkelijk)	Fijn sediment (gemiddelde gewichtsperscentage/1,71)	Gemiddelde dichtheid (kg/m ³)	F _r (%)
Studiegebied	25,1%	14,7%	1407	74,5%
Schotel	23,7%	13,9%	1420	75,2%

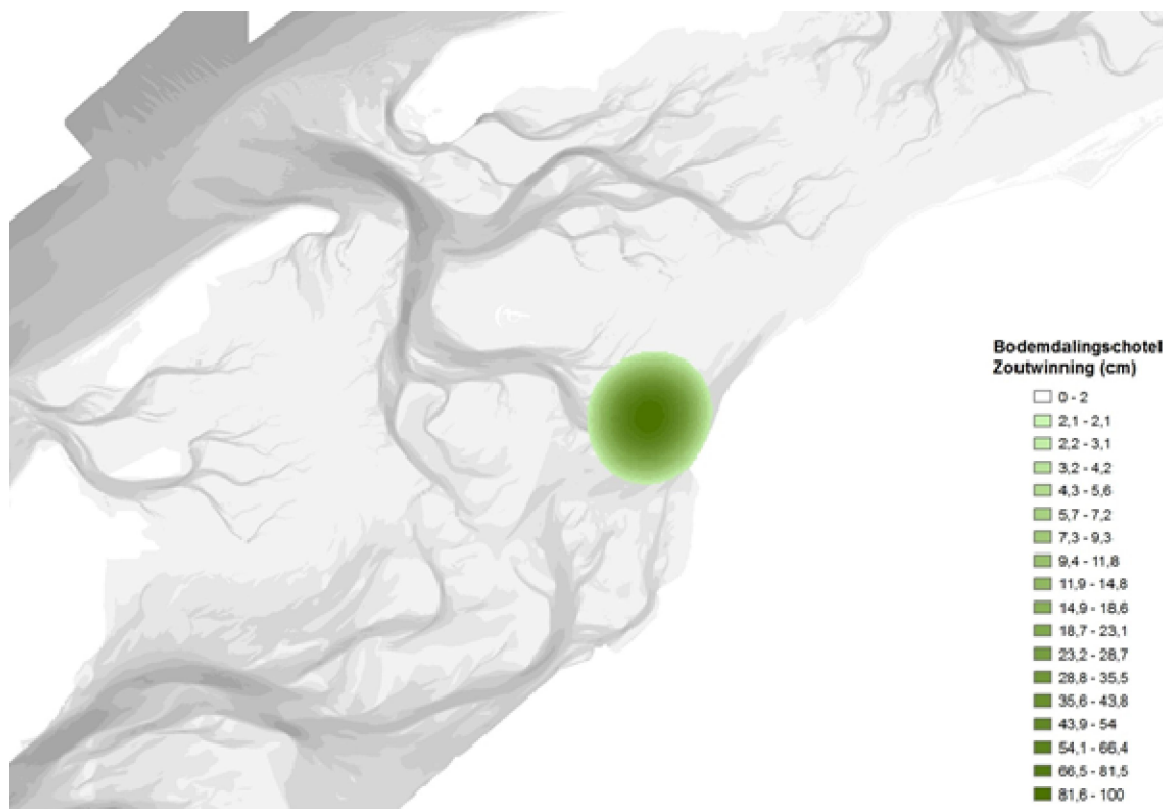
Tabel 4 Uitkomsten van de berekeningstappen van het reductiepercentage voor studiegebied en bodemdalingsschotel.



Figuur 11 Kaart van de korrelgrootte verdeling volgens de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998), zonder correctie, voor het studiegebied. Ook de contour van de bodemdalingsschotel door zoutwinning is aangegeven.

Er is ook een gewogen gemiddelde van de reductiefactor F_r bepaald voor de bodemdalingsschotel, waarbij de mate van bodemdaling die is weergegeven in figuur 12, is verdisconteerd. De bovengenoemde stappen

1 tot en met 3 zijn doorlopen, zodat voor iedere rastercel van de bodemdalingsschotel de dichtheid op basis van het gereduceerde percentage fijn sediment berekend is. Daarna is per rastercel de bodemdaling vermenigvuldigd met de dichtheid. De waarde hiervan is gesommeerd over het hele bodemdalingsgebied en gedeeld door het totale volume van de bodemdalingsschotel. De waarde van F_r , gewogen met de bodemdaling bedraagt 79,1%.



Figuur 12 Bodemdalingsschotel diepe ondergrond bij zoutwinning onder Waddenzee.

8

Discussie en conclusies

Bij het optreden van bodemdaling onder de Waddenzee wordt de bodemdalingsschotel opgevuld met sediment. Het zand dat in de bodemdalingsschotel terecht komt, is afkomstig van de kust, terwijl het fijne sediment uit de Noordzee wordt aangevoerd, zoals is onderkend in bijvoorbeeld Oost e.a. (1998). Het onttrekken van zand aan de kust is strijdig met het vigerende kustbeleid, dat is gericht op het behoud van de zandvoorraad van het kustfundament en daarom zal het volume zand moeten worden aangevuld door het uitvoeren van zandsuppleties. Het volume fijn sediment hoeft niet te worden aangevuld. Om dit inzichtelijk te maken is door Eijsink (in Oost e.a., 1998) de reductiefactor F_r geïntroduceerd, die het te suppleren volume zand relateert aan het volume bodemdaling (formule [1b]).

Bij de berekeningen van het benodigde aanvullingsvolume voor de bodemdaling door de Waddenzee gaswinning (de winning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen) wordt uitgegaan van een bijdrage van slib van 10% aan het sedimentatievolume in de Waddenzee. Door Grasmeijer en Cleveringa (2010) is beargumenteerd dat er voor de kombergingsgebieden van Vlie en Marsdiep sprake is van een grotere bijdrage aan fijn sediment in de bodemdalingsschotel zoals die door zoutwinning onder de Waddenzee zal ontstaan.

De bron voor de 10% bijdrage aan sedimentatievolume die bij de gaswinning wordt gehanteerd is Eijsink en Oost, in Oost (1998). Er worden waarden gepresenteerd die verschillen per kombergingsgebied. De getallen zijn gebaseerd op De Glopper (1967) en ontbreken voor het Marsdiep. Op basis van de herkomst van de 10%, is er geen reden om deze te hanteren voor alle getijdebekkens in de Waddenzee. De door Eijsink genoemde gedifferentieerde getallen voor de verschillende kombergingsgebieden geven een duidelijke aanwijzing voor differentiatie.

De Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998) heeft voor het studiegebied van de zoutwinning een veel betere dekking dan de gegevens van De Glopper (1967) en vormt daarmee een goede basis voor het afleiden van de percentages fijn sediment en de reductiefactor F_r conform Eijsink in Oost e.a. (1998).

Voorzichtigheidshalve, conform het voorzorgsprincipe, worden niet de oorspronkelijke gehalten fijn sediment (de fracties kleiner dan $63 \mu\text{m}$) uit de Sedimentatlas gebruikt, maar worden deze gehalten verlaagd. Op basis van de vergelijking tussen de verschillende behandelings- en monstermethodes wordt een verlaging voorgesteld van $\text{PSed.atlas} < 63 \mu\text{m} / 1,71$.

Compactie van het sediment levert een vertraging op in de snelheid waarmee de opvulling van de bodemdalingsschotel plaatsvindt. Het totale volume aan benodigd sediment verandert niet door compactie. In de formule voor de dichtheid van het sediment is rekening gehouden met de compactie van het sediment door met de bovengrens van de relatie van Mulder (1995) te rekenen.

De bijdrage van fijn sediment ($< 63 \mu\text{m}$) in termen van het volume is berekend voor het studiegebied en de bodemdalingsschotel. In de berekeningen is de reductie met de factor 1,71 toegepast op de waarden voor

fijn sediment uit de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998) en is gerekend met de bovengrens van de relatie tussen het percentage fijn sediment en de droge dichtheid volgens Mulder (1995). De bijdrage van fijn sediment wordt uitgedrukt in de reductiefactor F_r en deze bedraagt 74,5% voor het studiegebied en 75,2% voor de bodemdalingsschotel.

9

Referenties

- Bakker T.W. & A.J.H.M. Duquesnoy (2010) FRISIA Zout B.V.; Informatie Bodemdaling door Zoutwinning v.3.0. Rapport WEP.
- Delafontaine, M.T., B. W. Flemming & M. Thimm (2004) Large-scale trends in some mass physical properties of Danish Wadden Sea sediments, and implications for organism-sediment interactions. *Geografisk Tidsskrift, Danish Journal of Geography* 104 (1), 57-69.
- Eijsink, W.D. (1979) Morfologie van de Waddenzee; gevolgen van zand- en schelpenwinning, WL|Delft Hydraulics, rapport R1336.
- Eijsink, W.D. (1993) Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function; General considerations on hydraulic conditions, sediment transports, sand balance, bed composition and impact of sea-level rise on tidal flats ISOS*2 project, Phase 4, WL|Delft Hydraulics, rapport H1300.
- Ente, P.J. (1987) Bodemkundig onderzoek westelijke Waddenzee tussen glw en NAP-5 m, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, rapport 1987-1 cbw.
- Flemming, B.W. & M.T. Delafontaine (2000) Mass physical properties of muddy intertidal sediments: some applications, misapplications and non-applications, *Continental Shelf Research*, Volume 20, 1179-1197
- de Glopper, R.J. ((1967) Over de bodemgesteldheid van het waddengebied, Volume 43 van Zee tot land, Uitgever Tjeenk Willink.
- Grasmeijer B. & J. Cleveringa. (2010) Meegroeivermogen en gebruiksruimte in de getijdebekkens Vlie en Marsdiep; Achtergrondrapport bij MER continuering van de zoutwinning in Noord-West Fryslan, Alkyonrapport A2062R3r6.
- Hartsuiker, G. & B. Grasmeijer. (2008) Effects of dumping silt in the Ems estuary, 3D model study; Hydromorphological study for EIA of Eemshaven and EIA of fairway to Eemshaven. Alkyon Hydraulic Consultancy & Research rapport A1836R2r3.
- Hoeksema H.J., H.P.J. Mulder, M.C. Rommel, J.G. de Ronde, J. de Vlas, J.P.A. Roest, L. Van der Valk, W.D. Eysink, Z.B. Wang, H.J. de Vriend & K.S. Dijkema. (2004) Bodemdalingstudie Waddenzee 2004: vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd Rapport Rijkswaterstaat RIKZ/2004.025.
- Ministerie van Economische Zaken (2006) Gaswinning binnen randvoorwaarden; Passende beoordeling van het rijksprojectbesluit gaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Rapport.
- 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.
- Kater, B.J., J. Cleveringa, R. Snoek & B. Grasmeijer (2010) Effecten van de zoutwinning op de ecologische waarden in de Waddenzee; Achtergrondrapport bij MER continuering van de zoutwinning in Noord-West Fryslan, Alkyonrapport A2062R2r3.
- Lambeek, J.J.P., Available sediment data of the Dutch Wadden Sea (Part I). Universiteit Utrecht, Geografisch instituut, Vakgroep Fysische Geografie, Rapport GEOPRO 1991.016A; Notitie GWA0-91.10090 (Rijkswaterstaat DGW).

- Oost, A.P., B.J. Ens, A.G. Brinkman, K.S. Dijkema, W.D. Eysink, J.J. Beukema, H.J. Gussinklo, B.M.J. Verboom & J.J. Verburgh (1998) Integrale bodemdalingstudie Waddenzee, Nederlandse Aardolie Maatschappij, rapport.
- Rijkswaterstaat (1998) Sedimentatlas Waddenzee, Ministerie van Verkeer en Waterstaat Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor kust en zee; cd-rom.
- Stuurgroep hydrografisch-sedimentologisch en biologisch ecologisch onderzoek met betrekking tot de winning van zand in de Waddenzee c.a. (1981) Zandwinning inde waddenzee; Resultaten van een hydrografisch-sedimentologisch en biologisch ecologisch onderzoek. Rapport. Zwarts, L. (2004). Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIZA rapport RIZA/2004.028. incl. cd-rom.
- Van Marion, B.B. (1999) Zandbalansen van het Zeegat van Texel met Invers Sediment Transport Model (1931 tot 1997), Deel 1 en Deel 2. Rijkswaterstaat RIKZ werkdocument RIKZ/OS – 99.116x.