

SLIBSEDIMENTATIE IN DE KWELDERS VAN DE WADDENZEE

Bijdrage aan de kwantificering van sinks voor slib in de
Waddenzee i.h.k.v. project KRW Slib

Rijkswaterstaat Noord-Nederland

14 DECEMBER 2019



Contactpersoon

JELMER CLEVERINGA
Senior Advisor Coastal
Morphodynamics

T +31 (0)88 4261 440

M +31 (0)6 5073 6850

E jelmer.cleveringa@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137

8000 AC Zwolle

Nederland

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	5
1 INLEIDING	6
1.1 Aanleiding en doelstelling	6
1.2 Aanpak en leeswijzer	6
2 DE OPPERVLAKTE VAN DE WADDENZEE	8
2.1 Inleiding	8
2.2 Grenzen van de kombergingsgebieden	9
2.3 Welke delen missen?	10
2.3.1 Marsdiep	12
2.3.2 Eierlandse gat	15
2.3.3 Vlie	16
2.3.4 Borndiep	20
2.3.5 Pinkegat-Friesche Zeegat	22
2.3.6 Eilanderbalg-Lauwers-Schild-Eems-Dollard	25
2.3.7 Overzicht	27
2.4 Hoe groot is de Waddenzee?	29
3 SEDIMENTATIESNELHEDEN IN DE NIET-GEKUBEERDE DELEN VAN DE WADDENZEE	31
3.1 Metingen sedimentatiesnelheden	31
3.2 Sedimentatiesnelheden in de deelgebieden	33
3.3 Sedimentatievolumes in de deelgebieden	38
4 BIJDRAGE VAN SLIB AAN DE SEDIMENTATIE	40
4.1 Metingen slibgehalte	40
4.2 Slib in de deelgebieden	43
4.3 Slibvolumes	44
5 DISCUSSIE, CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	47
5.1 De bijdrage van de deelgebieden aan de sedimentatie in de Waddenzee	47

5.2	Het belang van de verschillende deelgebieden voor slibsedimentatie	48
5.3	Variatie in de tijd van de slibsedimentatie in de vastelandskwelder Noorderleech	48
5.3.1	Van bedijkingsgeschiedenis naar landaanwinningswerken naar kwelderwerken	49
5.3.2	Waargenomen sedimentatie	50
5.4	Kennisleemtes & aanbevolen kennisontwikkeling	56
5.5	Conclusies	57
6	REFERENTIES	59
	COLOFON	62

SAMENVATTING

Slib is een belangrijke factor als wordt gekeken naar het ecologische functioneren van de Waddenzee voor waterkwaliteit en habitats. In het kader van KRW-slib wordt onderzoek gedaan naar de variatie in sedimentconcentraties in het water en de bodem van de Waddenzee. In dit rapport wordt de sedimentatie van slib in de wadplaten en kwelders buiten de kuberingsgebieden van de Waddenzee beschouwd. Een deel van deze gebieden is slibrijk, en deze gebieden leveren een grote bijdrage aan de hoeveel slib die is en wordt vastgelegd. Bepaling van de hoeveelheden slib die in de Waddenzee zijn vastgelegd en fluctuaties daarin, zijn belangrijk om inzicht te geven in de bufferende werking van de Waddenzee in de slibhuishouding. Dat is belangrijk om de fluctuaties in de sedimentconcentraties te begrijpen.

De aanpak omvat drie stappen:

1. Bepaling van de oppervlaktes van de deelgebieden die buiten de kuberingsgebieden liggen en sediment uitwisselen met de Waddenzee;
2. De sedimentatiesnelheid in de deelgebieden is bepaald op basis van bestaande data-analyses uit de literatuur en bij het ontbreken daarvan op basis van hoogtegegevens.
3. Vaststellen van de slibpercentages in de deelgebieden, op basis van gerapporteerde waarden.

Door de oppervlaktes te vermenigvuldigen met de sedimentatiesnelheden en de slibpercentages is berekend hoeveel slibsedimentatie heeft plaatsgevonden in elk deelgebied. Om recht te doen aan de nauwkeurigheid van de bepalingen van de sedimentatiesnelheden en de slibpercentages en de variaties daarin in ruimte en tijd, is bij beide een ruime bandbreedte gehanteerd.

De deelgebieden die buiten de kuberingsgebieden liggen, omvatten 6% van het areaal van de kuberingsgebieden. Per kombergingsgebied verschilt de omvang van de deelgebieden van 2% tot 17%. De berekende in de sedimentatie in de deelgebieden die buiten de kuberingsgebieden liggen bedraagt 0,7 tot $1,7 \times 10^6$ m³ per jaar. Als de Eems-Dollard buiten de beschouwing wordt gelaten, dan gaat het om 0,6 tot $1,6 \times 10^6$ m³ per jaar. Dit is 12% tot 31% van de sedimentatie binnen de kuberingsgebieden. Deze omvang is dermate omvangrijk dat de sedimentatie in de deelgebieden betrokken dient te worden in berekeningen van sedimentbudgetten en balansen van het Waddengebied. Omdat de deelgebieden een aantal van de meest slibrijke sedimentatiegebieden van het Waddengebied omvatten, dienen deze gebieden zeker te worden beschouwd als het om de slibsedimentatie in het Waddengebied gaat. De berekende omvang van de slibsedimentatie in de deelgebieden bedraagt 390 - 1.170×10^3 m³ per jaar.

Van de 18 deelgebieden nemen vijf deelgebieden 80 tot 90% van de slibsedimentatie voor hun rekening. Deze deelgebieden zijn de Friese vastelandskwelder, Oost-Terschelling en de Boschplaat, de Dollard en de vastelandskwelder en wadplaat bij 't Skoar, Wierum en Paesens. Van deze vijf deelgebieden is de Friese vastelandskwelder het allerbelangrijkst, omdat deze 50 tot 55% van de slibsedimentatie voor zijn rekening neemt. Metingen van de arealen, sedimentatiesnelheden en slibgehalten in de Friese vastelandskwelders laten zien dat hier zowel trendmatige veranderingen in optreden, als variaties in de tijd. Deze trendmatige veranderingen en de variaties zijn om te rekenen naar variaties in de sedimentatievolume en de slibsedimentatie en kunnen daarmee inzicht geven in de bijdrage die dit gebied levert aan de geobserveerde variaties in sedimentconcentraties.

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding en doelstelling

Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee zijn in 2016 gestart met een programma voor de ontwikkeling van kennis over de morfologie van de Nederlandse Waddenzee en voor het inbedden hiervan in beleid en beheer. In het programma wordt morfologische kennis op een structurele manier verzameld, geanalyseerd, geordend en geborgd. Daarnaast wordt de kennis toegankelijk gemaakt voor beleids- en beheervraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad.

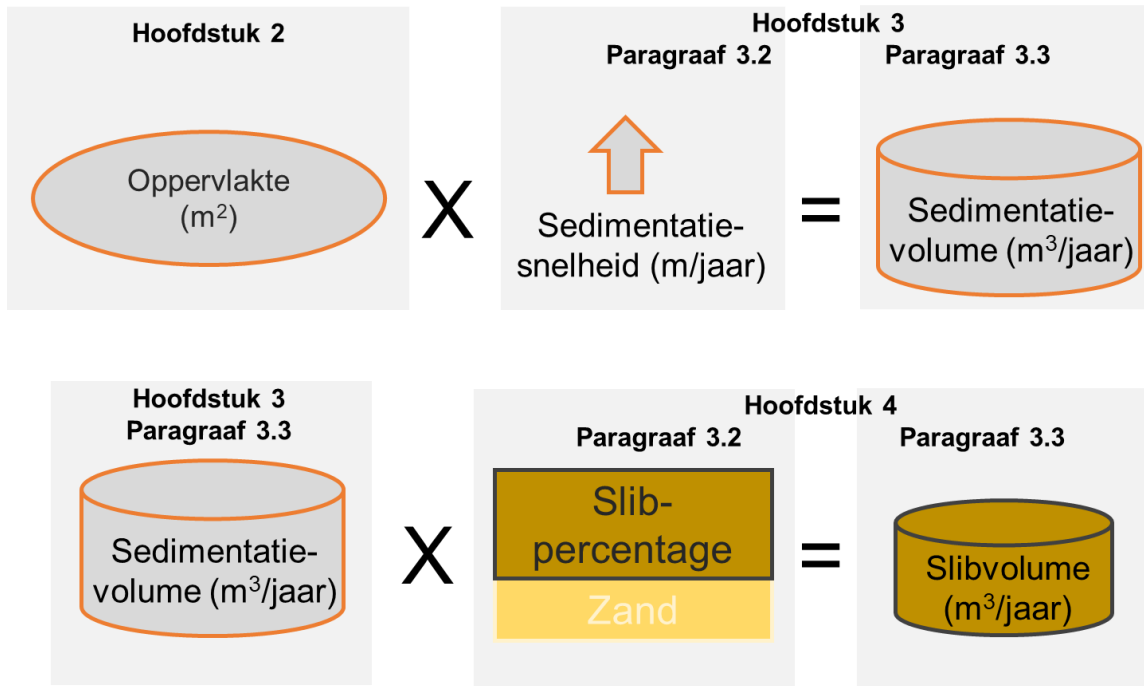
In het kader van het programma worden ter bevordering van de onderlinge uitwisseling en borging van de morfologische kennis ook onderzoeksopdrachten uitgevoerd vanuit een specifiek project. Het voorliggende rapport wordt uitgebracht als onderdeel van het onderzoek naar de slibhuishouding van de Waddenzee voor het project Kaderrichtlijn Water Waddenzee (KRW), in opdracht van Rijkswaterstaat Noord-Nederland.

Voor de planperiode 2016-2021 van de Kaderrichtlijn Water (KRW) voor de Waddenzee wordt onderzoek gedaan naar de slibhuishouding. Slib is een belangrijke factor als wordt gekeken naar het ecologische functioneren van de Waddenzee en de KRW- onderdelen waterkwaliteit en habitats. In het kader van KRW-slib wordt onderzoek gedaan naar de variatie in sedimentconcentraties in de Waddenzee (Vries et al., 2018). Het doel van dit onderzoek is het beter begrijpen van de fluctuaties in slibconcentratie, waarvoor een aanzet is gegeven in Herman et al. (2018). Uiteindelijk zal dit leiden tot een optimalisatie van de beheerstrategie van het slib in de Waddenzee. Mogelijk blijkt dan dat het ecosysteem moet en kan worden beschermd tegen fluctuaties in slibtoevoer als gevolg van menselijke activiteiten en natuurlijke variatie buiten of binnen de Waddenzee. Het KRW-slib onderzoek is opgedeeld in verschillende deelonderwerpen. Het voorliggende rapport bevat resultaten van het eerste deelonderwerp, waarin wordt gekeken naar areaalverandering, hoogteveranderingen, hypsometrische curves en (zand- en) slibvolumes om zo een inschatting te maken van de hoeveelheid slib die in de Waddenzee is vastgelegd sinds 1926 en fluctuaties daarin. Dit verschaft ons belangrijk inzicht in de bufferende werking van de Waddenzee en de verhouding van deze volumes tot de netto sedimenttransporten en dat is weer belangrijk om de fluctuaties in de sedimentconcentraties te begrijpen. In deze rapportage wordt daarbij naar een deelaspect gekeken van de slibsedimentatie, namelijk de wadplaten en kwelders buiten de kuberingsgebieden. Een deel van deze gebieden is slibrijk, en deze gebieden kunnen in potentie een grote bijdrage leveren aan de hoeveel slib die is en wordt vastgelegd. Een bepaling van de slibsedimentatie binnen de kuberingsgebieden in de Westelijke Waddenzee is opgenomen in Smits & Nederhoff (2018) en voor de Waddenzee als geheel kan Oost et al. (2018) worden geraadpleegd.

De uitvoering van dit onderdeel van het project KRW-slib is een samenwerkingsproject tussen Royal HaskoningDHV, Arcadis en Deltares.

1.2 Aanpak en leeswijzer

De gehanteerde aanpak is weergegeven in Figuur 1-1, waarbij ook de hoofdstukindeling is aangegeven. De oppervlaktes van de gebieden die buiten de kuberingsgebieden liggen en wel sediment uitwisselen met de Waddenzee zijn met een GIS-analyse gekarteerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van bestanden met de kuberingsgebieden en hoogtebestanden van het Waddengebied (vaklodingen en AHN). Daar waar onduidelijkheden waren is gekeken naar luchtfoto's en de kwelderartering. De resultaten van deze analyse zijn opgenomen in Hoofdstuk 2. In dit hoofdstuk is ook een overzicht opgenomen van de omvang van de kombergingsgebieden in het Waddengebied, zoals dat in verschillende studies is bepaald.



Figuur 1-1 Schematische weergave van de aanpak die is gehanteerd in deze studie.

De sedimentatiesnelheid in de deelgebieden die buitende kuberingsgebieden vallen, maar wel sediment uitwisselen met de Waddenzee is bepaald op basis van informatie uit de literatuur. Bij voorkeur is gebruik gemaakt van informatie is gebaseerd op hoogtemetingen in raaien (vastelandskwelders en sommige eilandkwelders) en sedimentatiemetingen. Voor de gebieden waarvan informatie uit de literatuur ontbrak is naar de beschikbare gegevens gekeken (over het algemeen hoogtegegevens uit de vaklodingen, AHN en de LIDAR hoogtemetingen uit de Jaarlijkse Kustlodingen). Hiervoor zijn geen kuberings of andere analyse uitgevoerd. De resultaten van de inventarisatie van de sedimentatiesnelheden is opgenomen in paragraaf 3.2. Vervolgens is de informatie over de sedimentatiesnelheden gecombineerd met de oppervlakte van de gebieden, om zo het jaarlijkse sedimentatievolume te berekenen per gebied. De sedimentatievolumes staan in paragraaf 3.3.

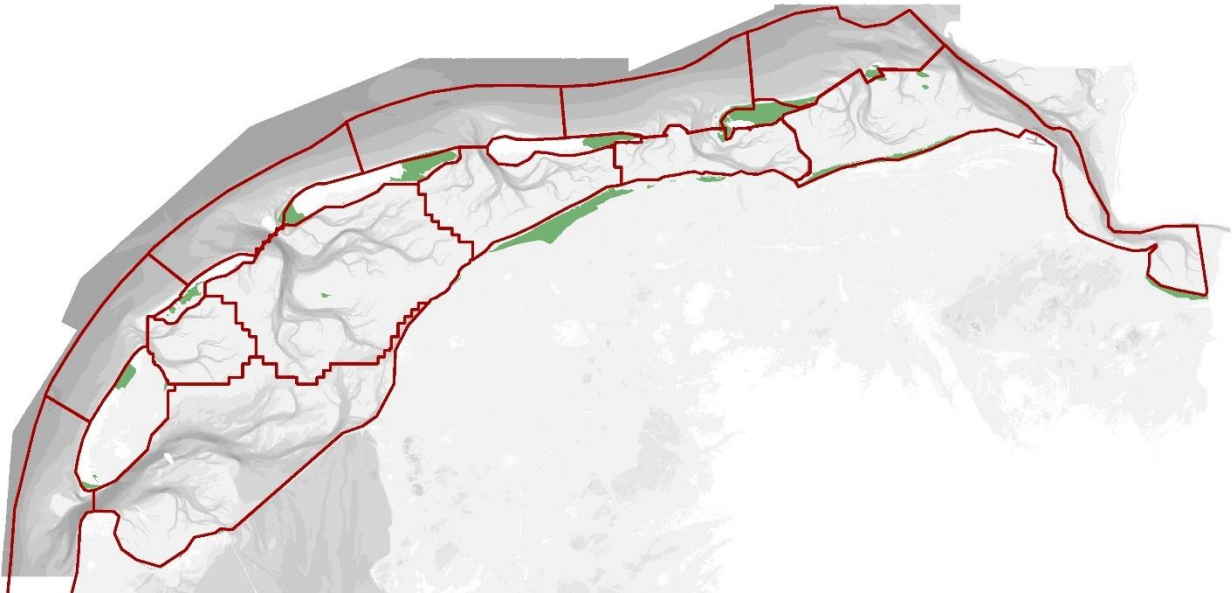
De laatste stap die is gezet is om de slibpercentages in de deelgebieden te achterhalen, op basis van gerapporteerde waarden. Het overzicht van de slibpercentages staat in paragraaf 4.2. Door de slibpercentages te combineren met de sedimentatievolumes is vervolgens berekend hoeveel slibsedimentatie heeft plaatsgevonden in elk gebied en dit staat in paragraaf 4.3.

Ten slotte is hoofdstuk 5 een discussie over de resultaten opgenomen, gevolgd door conclusies en aanbevelingen.

2 DE OPPERVLAKTE VAN DE WADDENZEE

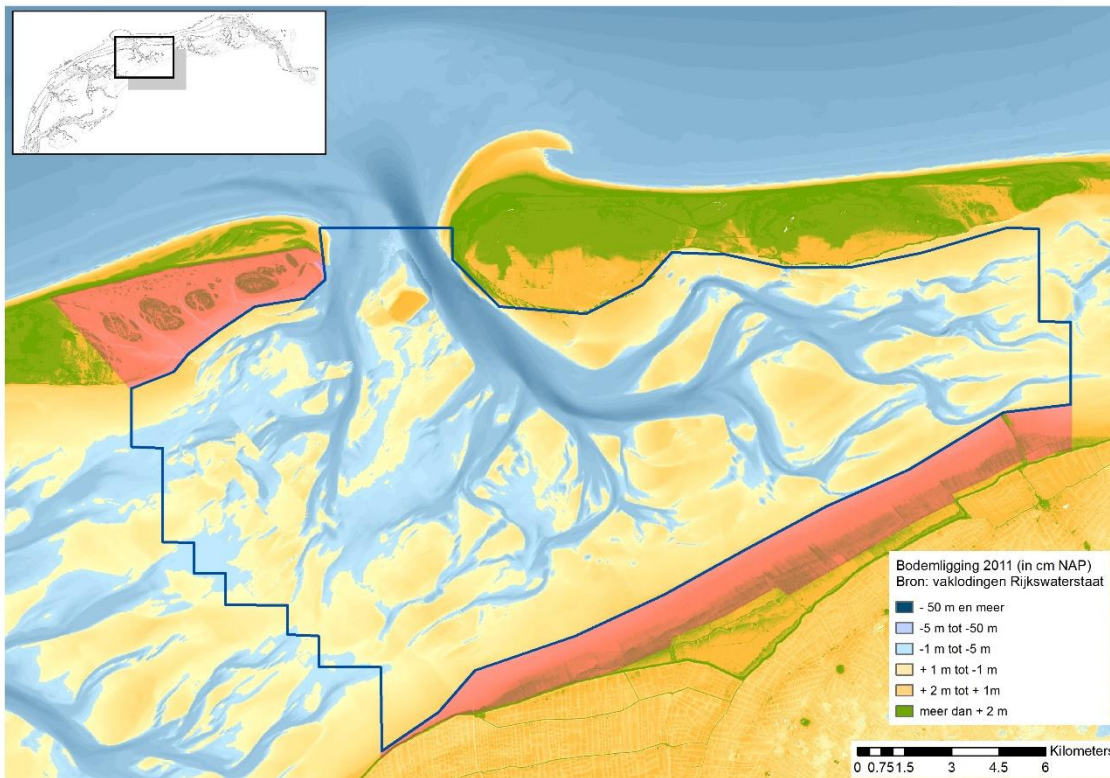
2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt vastgesteld welke delen van de Waddenzee wel en welke niet worden beschouwd in de “standaard” analyses van het sedimentvolume, zoals die van Nederhoff et al., 2017. De indeling met de gehanteerde vaklodingengrenzen is opgenomen in Figuur 2-1. De indeling in de Waddenzee, met de getrapte grenzen van het wantij gaan terug naar de ‘Hoornse rapporten’ (zie voor een overzicht de lijst ISOS-studies in Louters & Gerritsen, 1994), waarin de historisch beschikbare kaarten zijn omgezet in digitale bestanden.



Figuur 2-1 Kaart van het Waddengebied met de ‘klassieke’ vaklodingengrenzen, zoals gehanteerd in de ISOS-studies en de analyses van Nederhoff et al., 2017. In deze kaart zijn de kwelders in het waddengebied groen gemarkeerd.

De grenzen in Figuur 2-1 omvatten niet alle delen van de kombergingsgebieden van de Waddenzee. Uit de figuur is al op te maken dat de kwelders grotendeels geen deel uitmaken van de kuberingsgebieden. Dat wordt nog duidelijker als wordt ingezoomd, zoals is gedaan in Figuur 2-2. In deze figuur zijn de twee roze gebieden gemarkeerd de vastelandskwelder en de eilandkwelder bij Ameland, die geen deel uitmaken van het kuberingsgebied.

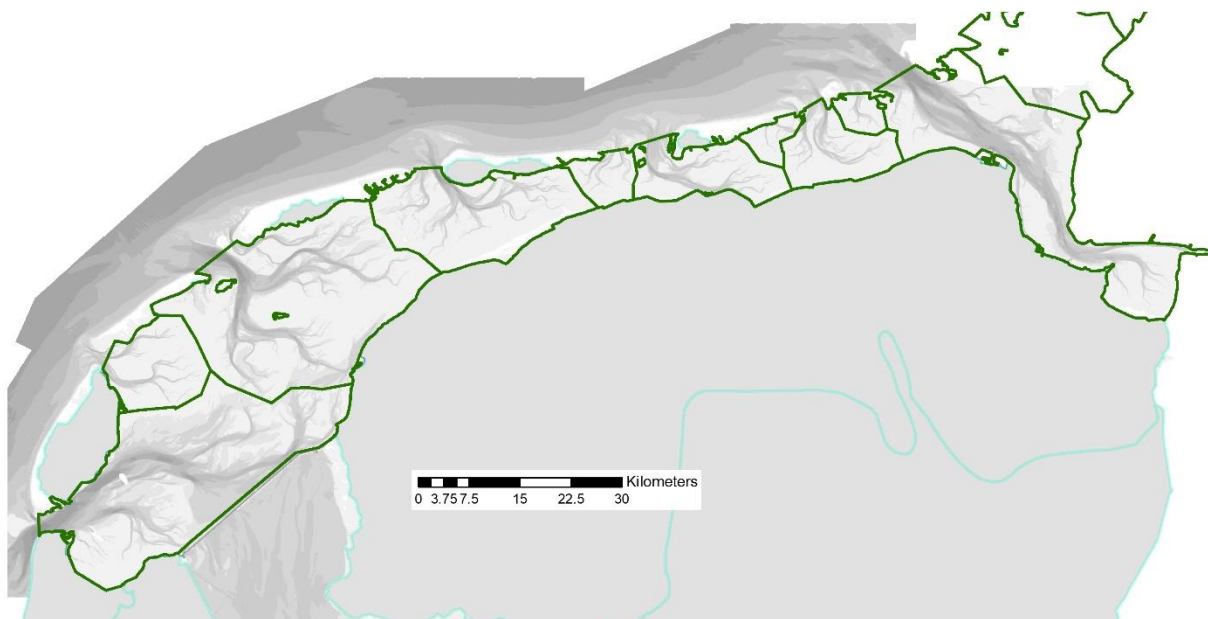


Figuur 2-2 Kombergingsgebied van het Borndiep, waarbij de blauwe lijnen het gebied markeren dat onder andere door Nederhoff et al., (2017) is gebruikt voor de analyse van de volume en areaalontwikkelingen. De roze gebieden zijn de Boschplaat en de vastelandskwelders.

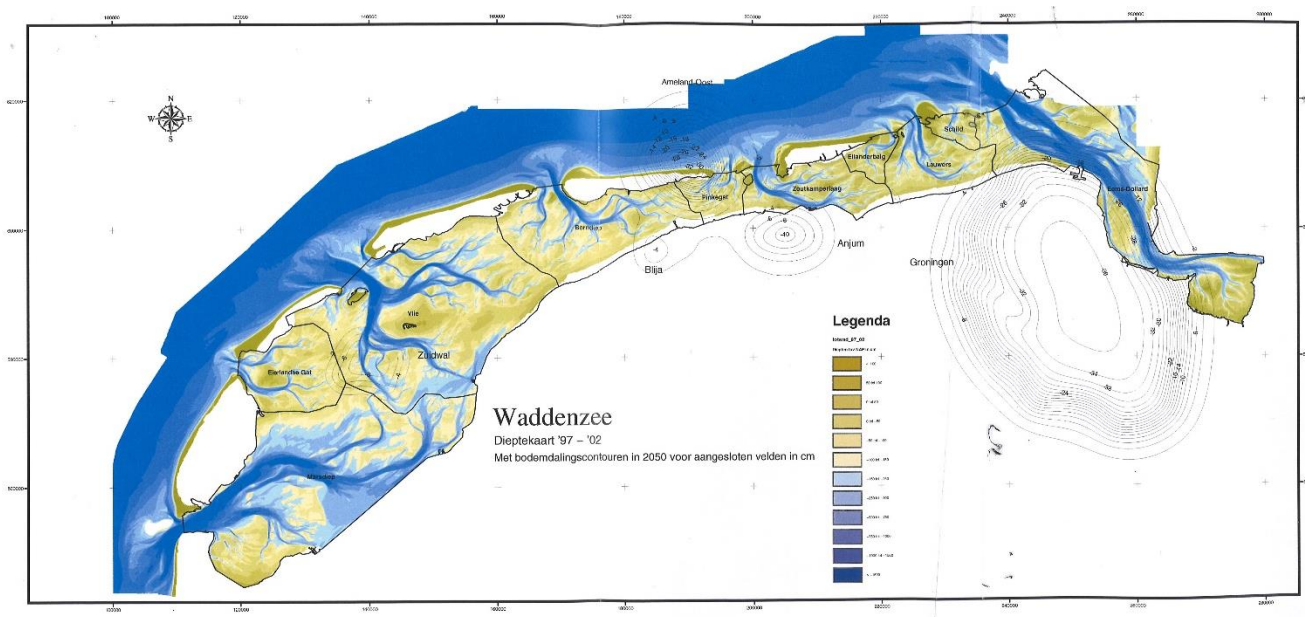
2.2 Grenzen van de kombergingsgebieden

In verschillende studies en rapportages worden verschillende grenzen gehanteerd van de kombergingsgebieden. Naast de kombergingsgrenzen die zijn getoond in Figuur 2-1, zijn dat bijvoorbeeld de grenzen die zijn getoond in Figuur 2-3 en Figuur 2-4. Voor het gebruik van andere grenzen zijn verschillende redenen. De wantijen die de kombergingsgebieden begrenzen zijn in de loop van de jaren verschoven en het maakt dan ook uit welke periode is gebruikt om deze grenzen op te baseren. Sommige grenzen zijn getrokken op basis van de beschikbaarheid van de hoogtegegevens, zodanig dat de dekking in de loop van de tijd maximaal was. En soms is opnieuw gebruik gemaakt van de grenzen die bij eerdere analyses zijn toegepast.

In deze analyse sluiten we aan bij de vaklodingsgrenzen die in Nederhoff et al., (2017) zijn gehanteerd, omdat in Nederhoff et al. (2017) analyse zijn opgenomen van de ontwikkelingen van de sedimentvolumes in de Waddenzee over lange perioden. De vaklodingsgrenzen in de westelijke Waddenzee hebben getrapte grenzen van het wantij. Toen eind jaren '80 van de vorige eeuw de digitalisering van de historisch beschikbare lodingskaarten plaatsvond, was de computercapaciteit nog beperkt, zodat met relatief grove rasters en grenzen gewerkt moest worden. De vloeiender lijnen in de oostelijke Waddenzee zijn toegevoegd tijdens latere digitalisering (van Pinkegat en Friesche Zeegat) en uitbreidingen van het analysegebied. Aan de vastelandszijde werden de vaklodingsgrenzen gelegd tot aan de rand waar nog vaklodingsgegevens beschikbaar waren. Op die plekken waar landaanwinningswerken aanwezig waren, werden tot het begin van de 21^{ste} eeuw geen vaklodingsgegevens ingewonnen.



Figuur 2-3 Grenzen van de kombergingsgebieden, zoals gehanteerd door het CWSS Trilaterale Waddenzee.



Figuur 2-4 Grenzen van de kombergingsgebieden, zoals gebruikt in de kuberingen in Hoeksema et al. (2004).

2.3 Welke delen missen?

In deze paragraaf wordt vastgesteld welke delen van de kombergingsgebieden in de Waddenzee missen bij de klassiek vaklodingsgrenzen, zoals gehanteerd door onder andere Eysink & Biegel (1992) en Schrijvershof et al. (2017) en getoond in Figuur 2-1. Omdat deze studie is gericht op de sedimentatie van slib, beschouwen we alleen die delen waar daadwerkelijk slib kan sedimenteren. Dat betekent dat de duinen niet worden beschouwd. De duinen kunnen wel een *sink* of *source* vormen binnen een sedimentbalans, maar het gaat dan om zand en niet om slib. Verder worden de gebieden achter hoge zomerpolders, die slechts zeer zelden overstroomd ook niet beschouwd. In deze gebieden kan slib sedimenteren als overstrooming plaatsvindt, maar de omvang hiervan zal zeer beperkt zijn als de hoge zomerkade of -dijk de

overstromingsfrequentie sterk reduceert. Daar waar kwelders achter dijken via duikers verbonden zijn met de Waddenzee, zijn deze wel beschouwd.

De analyse van de missende delen omvat daarmee:

- Eilandkwelders, tot de overgang met de duinen op NAP + 3 m;
- Vastelandskwelders en de voorliggende wadplaten, van de zomerdijk tot de grens van het kombergingsgebied;
- Overige stroken en hoekjes tussen de Waddenzeedijk en de grens van het kombergingsgebied.

Aan de zijde van het zeegat is steeds het verlengde van de grens van het zeegat genomen. Op de eilanden is de oorspronkelijke grens tussen het kustvak en het kombergingsgebied gehanteerd.

In de volgende paragrafen wordt per kombergingsgebied een overzicht gepresenteerd van deze delen.

2.3.1 Marsdiep

De Hors en de Mokbaai (Figuur 2-5)

De Hors: Het gedeelte van De Hors dat ook bij het kombergings gebied hoort bestaat uit een strandvlakte en (jonge) duinen. Voor de landwaartse grens is de 3 m+NAP contour gebruikt als grens. De oppervlakte van de polygoon is 592.400 m².

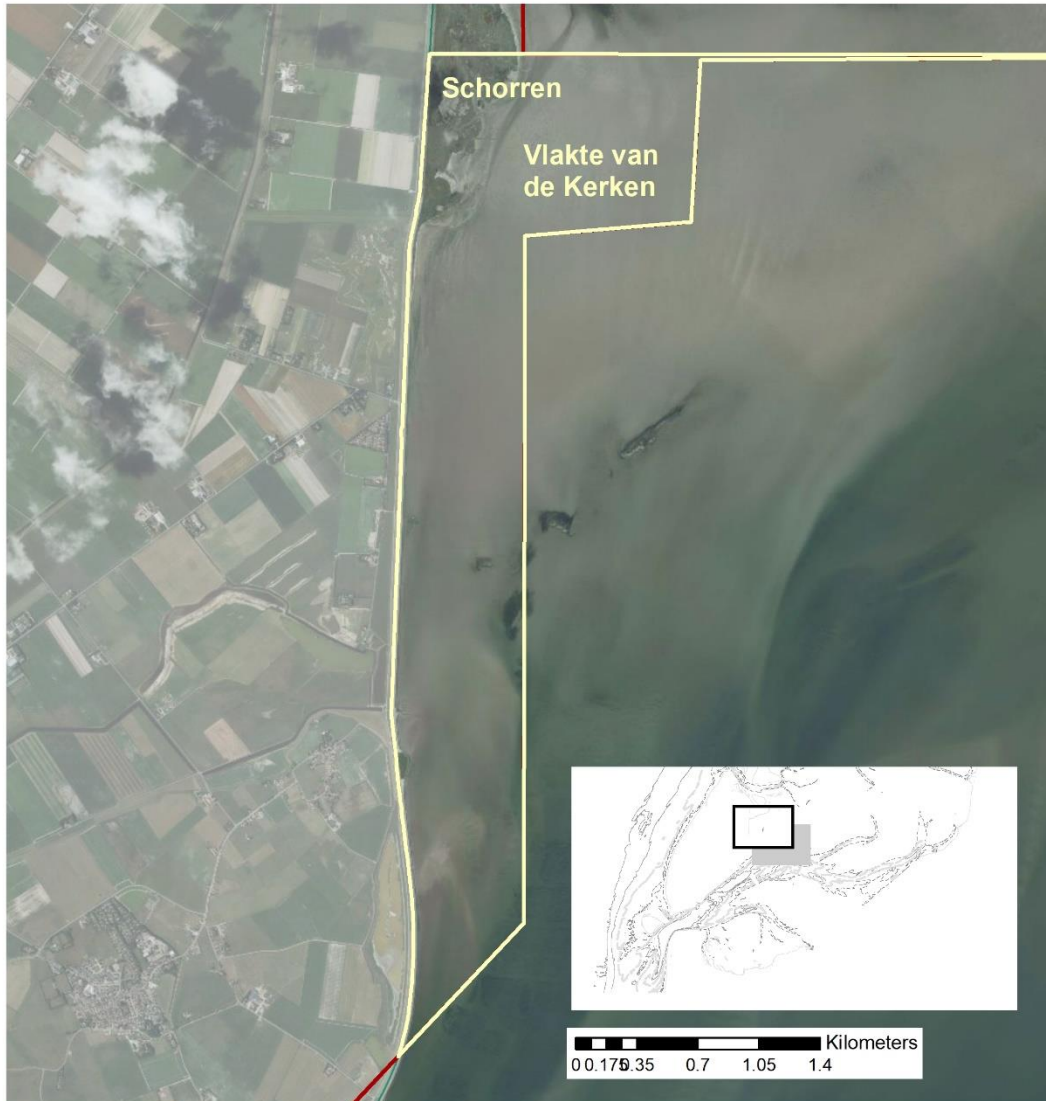
Mokbaai: de Mokbaai bestaat uit een wadplaat, een deel kwelder en er bevinden zich geulen. Voor de afkadering van dit gebied is gebruik gemaakt van de 3 m+NAP contour aan de zuidzijde en het dijkkringbestand aan de noordzijde. De oppervlakte van de polygoon is: 1.617.620 m².



Figuur 2-5 Mokbaai en de Hors bij zuidwest Texel. In geel de grenzen van de deelgebieden, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

De Schorren en Vlake van de Kerken (Figuur 2-6)

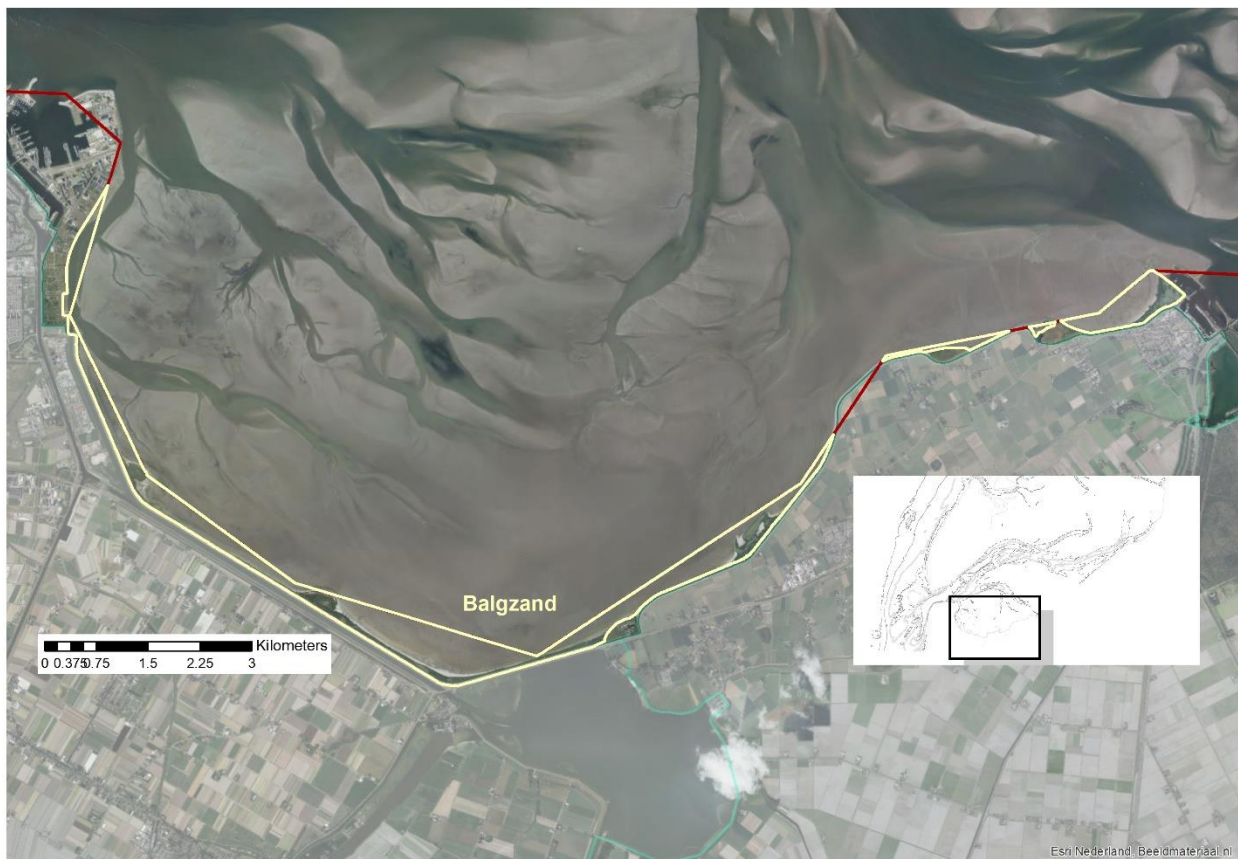
Voor de Schorren, bestaande uit kwelders (deels bij Eierlandse gat), en de wadplaat Vlake van de Kerken is de polygoon bepaald aan de hand van de buitencontouren van het kombergingsgebied en de dijkkring aan de eilandzijde. De oppervlakte van de polygoon is: 4.672.240 m².



Figuur 2-6 De Vlake van de Kerken met inbegrip van het kweldergebied de Schorren aan de oostkust van Texel. In geel de grenzen van het deelgebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

Balgzand (Figuur 2-7)

De onderdelen die missen bij Balgzand zijn voornamelijk kwelders, maar ook deels wadplaten. Een enkel gebied is niet meegenomen in de oppervlakte van de polygoon, omdat dit een bedijkte zomerpolder betreft. De oppervlakte van de polygoon Balgzand is 5.452.627 m². In Figuur 2-7 is in de linker bovenhoek ook zichtbaar dat bij Den Helder een stuk land binnen de vaklodingencontour ligt. De omvang van het kombergingsgebied wordt hier overschat. Dit is een van de weinige plekken waar dit het geval is en deze oppervlaktes zijn buiten de beschouwingen in dit rapport gelaten.



Figuur 2-7 Balgzandgebied, van Den Helder tot Den Oever op Wieringen. In geel de grenzen van het deegebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

2.3.2 Eierlandse gat

Vliehors (Figuur 2-8).

De Vliehors bevindt zich aan de westzijde van Vlieland. Het betreffende gebied bestaat uit een strandvlakte, (jonge) duinen, kwelder en zomerpolders. De gebieden die boven de 3 m+NAP liggen zijn niet meegenomen in de polygoon. De kwelder aan de noordzijde van dit gebied is wel meegenomen in de analyse. De totale oppervlakte is 16.136.984 m².



Figuur 2-8 Vliehors en Kroonspolders aan de zuidwestzijde van Vlieland. In geel de grenzen van het deelgebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied.

2.3.3 Vlie

Vastelandskust (Figuur 2-9)

Dit stuk vastelandskust in het kombergingsgebied van Vlie bestaat uit kwelders en wadplaten. Er zijn geen zomerpolders aanwezig in dit gebied, waardoor het gehele gebied tot aan de dijk meegenomen is in de polygoon. De oppervlakte polygoon Vastelandskust Vlieland: 3.169.273 m².



Figuur 2-9 Friese vastelandskust bij het kombergingsgebied van het Vlie. In geel de grenzen van het deelgebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

Eilandkust Vlieland (Figuur 2-10)

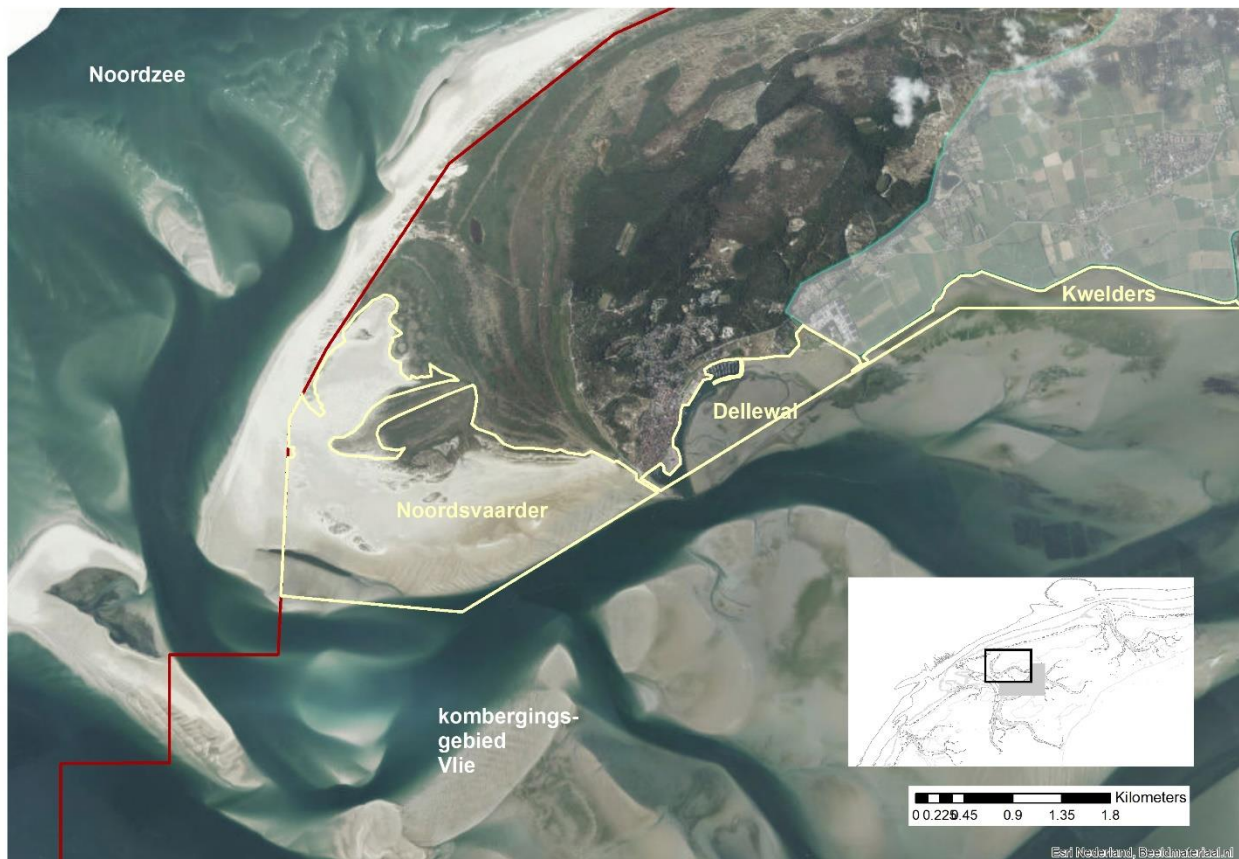
Bij Vlieland oost bevindt zich ook nog een stuk wadplaat en kwelder die niet meegenomen zijn in de huidige kartering. De oppervlakte polygoon Vlieland oost: 1.916.291 m².



Figuur 2-10 Kust ten zuiden van Vlieland -oost. In geel de grenzen van het deelgebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

West Terschelling Noordvaarder, Dellewal (Figuur 2-11)

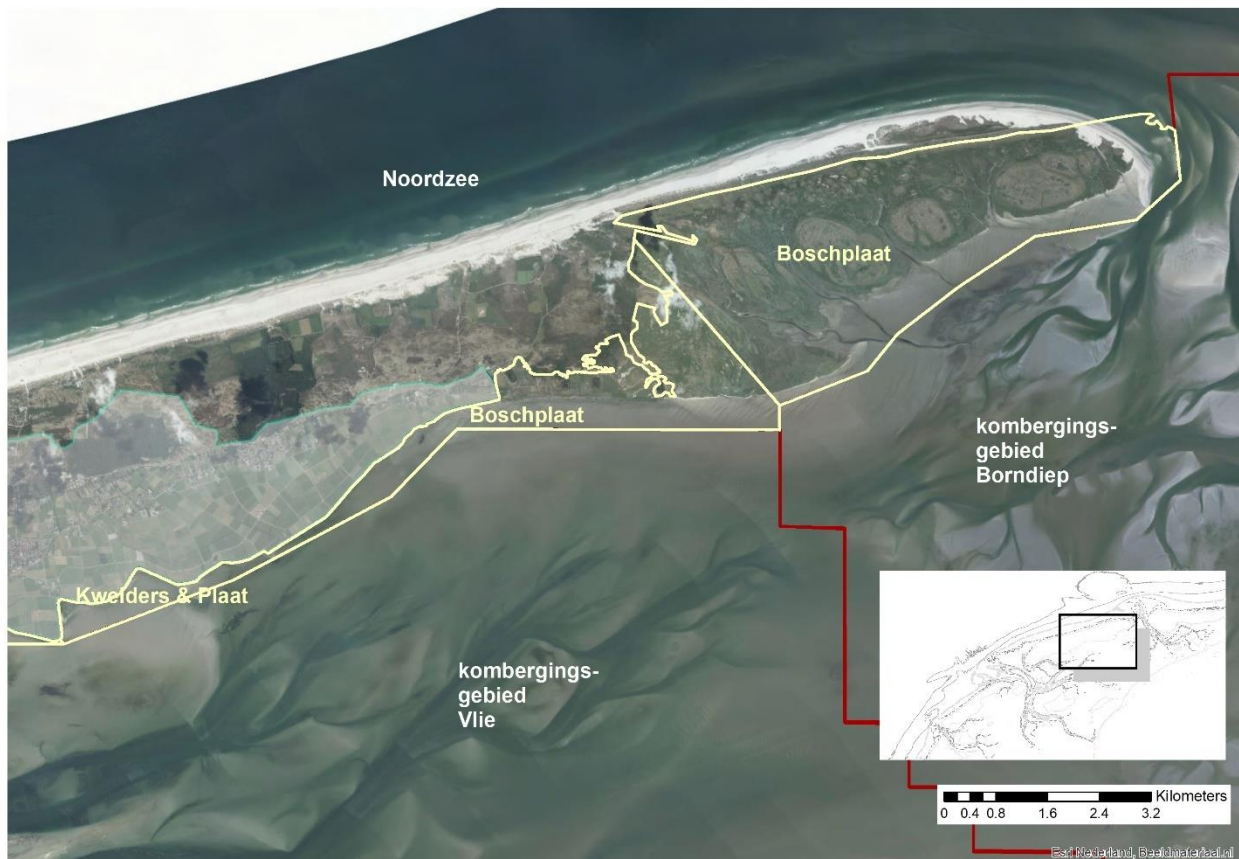
Voor deze polygoon is aan de eilandzijde de 3 m+NAP als grens gehanteerd. Alle laaggelegen strandvlaktes die aanwezig zijn, zijn meegenomen in de polygoon. Verder zijn de kwelders en de haven van Terschelling, met bijbehorende plaatgebied, de Dellewal, ook opgenomen in de polygoon. De oppervlakte polygoon West Terschelling Noordvaarder, Dellewal is: 6.919.510 m².



Figuur 2-11 Zuidwest van Terschelling. In geel de grenzen van het deelgebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

Oost Terschelling Strip, Boschplaat (Figuur 2-12)

Bij Oost-Terschelling zijn de wadplaten voor de Wadenzeedijk, met inbegrip van enkele kwelders en kwelderrestanten geen onderdeel van de vaklodingsgebieden. Ook is ligt een relatief klein deel van de kwelders bij de Boschplaat in het verlengde van de vaklodingsgrens tussen het Vlie en het Borndiep. De oppervlakte van dit gecombineerde gebied Oost Terschelling Strip, Boschplaat is 8.332.395 m².



Figuur 2-12 Oostpunt van Terschelling. In geel de grenzen van de deelgebieden, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

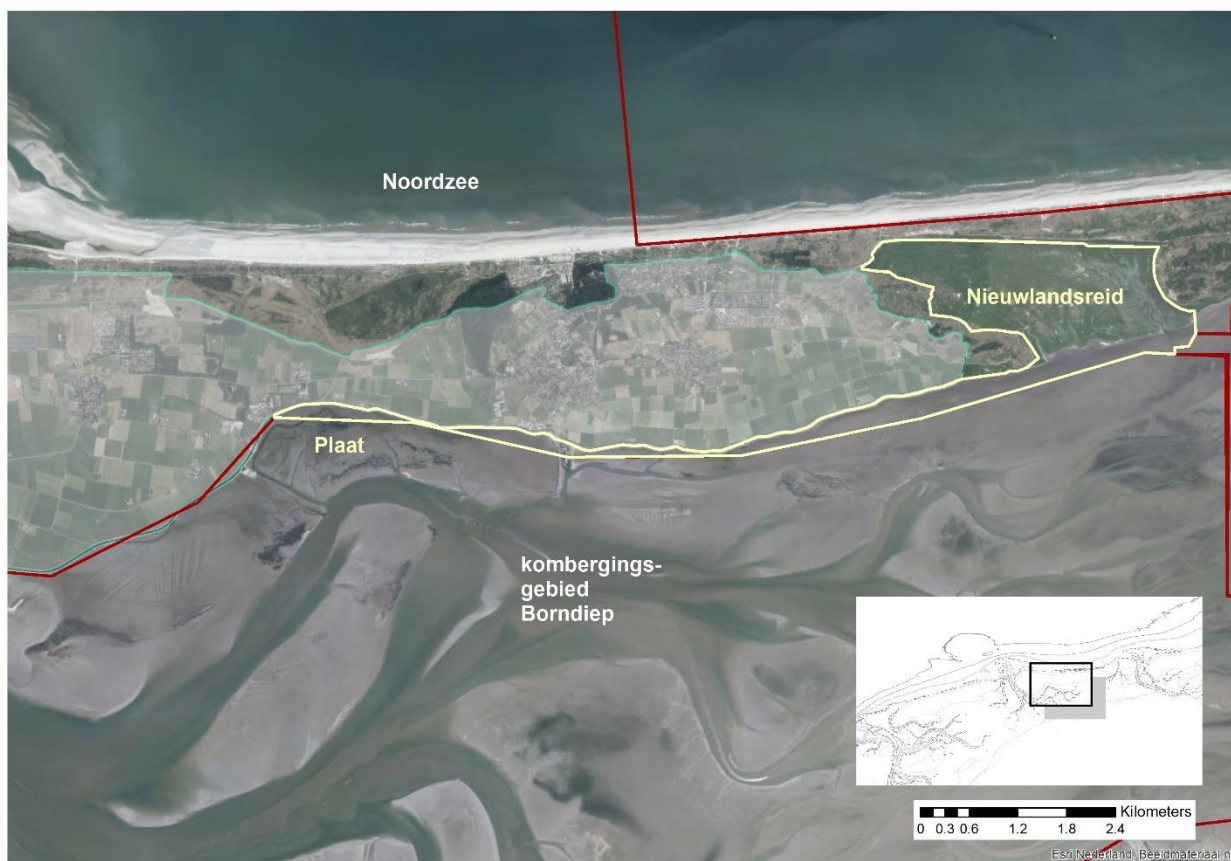
2.3.4 Borndiep

Terschelling Boschplaat (Figuur 2-12)

De Boschplaat bestaat uit duinen, een kwelder en aan de zuidzijde een wadplaat. Omdat bijna het hele gebied kan overstromen met hoge waterstanden, is de grens getrokken bij de duin aan de noordzijde. De rest van het gebied is meegenomen in de analyse. De oppervlakte polygoon van de polygoon Oost Terschelling_Boschplaat omvat 18.382.490 m².

Ameland Feugelpolle-Nieuwlandsreid (Figuur 2-13)

De hele kwelder Nieuwlandsreid is meegenomen in deze polygoon. De grenzen zijn wederom bepaald op 3 m+NAP en het fietspad /bij de stuifdijk aan de noordzijde. Daarnaast liggen een aantal van de wadplaten voor de Waddenzeedijk buiten de grens van de vaklodingen en ook deze gebieden zijn meegeteld bij de oppervlakte. De oppervlakte van het gebied Ameland Feugelpolle-Nieuwlandsreid is 5.898.897 m².



Figuur 2-13 Waddenkust bij Ameland tot en met de grens met het kombergingsgebied Pinkegat/Friesche zeegat. In geel de grenzen van het deelgebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

Vastelandskwelder Noorderleech (Figuur 2-14)

Het gebied dat hier 'vastelandskwelder Noorderleech' is genoemd omvat naast de kwelders ook de voorliggende wadplaat. De zomerpolders van het Noorderleech gebied zijn buiten de begrenzing gehouden, omdat deze vanwege de aanwezige kades vrijwel niet overstromen. Het gebied omvat een groot areaal kwelderwerken, met de kenmerkende structuur van rijshouten dammetjes, greppels en geultjes. Sinds de introductie van de landaanwinningswerken volgende de 'Schleswig-Holstein methode' door het Rijk in de jaren '30, zijn in het gebied verschillende delen van zomerpolders voorzien en zijn de werken uitgebreid. Later zijn in het kader van natuurontwikkeling bij delen van het gebied nieuwe verbindingen aangelegd tussen Waddenzee en de zomerpolder. De getoonde landwaartse begrenzing is daarmee de huidige grens, in het verleden heeft ook sedimentatie landwaarts hiervan plaatsgevonden. De oppervlakte polygoon Vastelands Kwelder Noorderleech is 32.518.456 m².

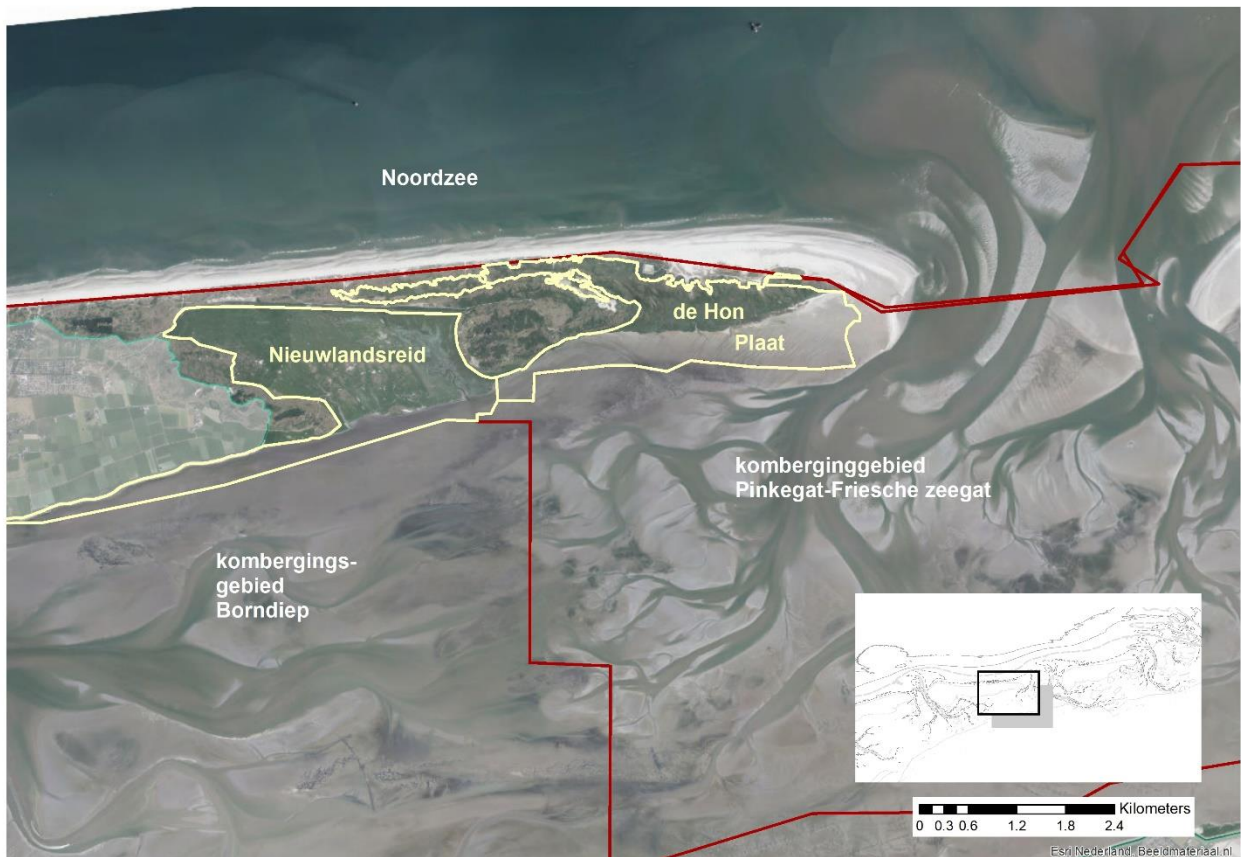


Figuur 2-14 Vastelandskwelders en voorliggende wadplaten bij het kombergingsgebied Borndiep. In geel de grenzen van het deelgebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

2.3.5 Pinkegat-Friesche Zeegat

Ameland De Hon (Figuur 2-15)

Het gebied op Ameland-oost dat is aangeduid met 'De Hon', omvat niet alleen deze kwelder, maar ook de voorliggende wadplaat en de duinvallei ten noordwesten van de Hon. Bij extreem hoog water kan het water deze duinvallei instromen en daarom is dit stuk ook meegenomen in de analyse. De oppervlakte van het gebied Ameland De Hon bedraagt 4.176.980 m².



Figuur 2-15 Waddenkust bij Ameland oost en west van de grens tussen de kombergingsgebieden Borndiep en Pinkegat/Friesche zeegat. In geel de grenzen van de deelgebieden, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

Vastelandskwelder en wad ten oosten van de Veerdam Holwerd, 't Skoar, Wierum, Peasummerlannen (Figuur 2-16)

Het gebied bestaat uit enkele kwelders (de kwelder ten oosten van de veerdam, 't Skoar, Wierum, Paesens), met zomerpolders en restanten van grotere kwelders met een groot oppervlakte aan voorliggende wadplaat. Een belangrijk deel van dit gebied was in het niet zo verre verleden (tot de jaren '60 van de vorige eeuw) nog voorzien van de kwelderwerken. Hiervan resteert nog een beperkt deel dat voor de huidige kwelders ligt. De landwaartse grens van het vaklodingsgebied komt overeen met de zeewaartse grens van de oorspronkelijke kwelderwerken. De oppervlakte van het hele gebied is 17.026.600 m².



Figuur 2-16 Vastelandskwelders en voorliggende wadplaten bij het kombergingsgebied Pinkegat-Friesche zeegat. In geel de grenzen van de deelgebieden (de groene lijn markeert de waterkering).

Schiermonnikoog Het Rif en Oosterkwelder (Figuur 2-17)

Het gebied ten zuiden van Schiermonnikoog omvat veel verschillende deelgebieden, met de strandvlakte Rif, waarop ook enkele (jonge) duinen, een groot oppervlak aan kwelders en een deel wadplaat. De gecombineerde oppervlakte van deze gebieden is 11.106.456,84 m².

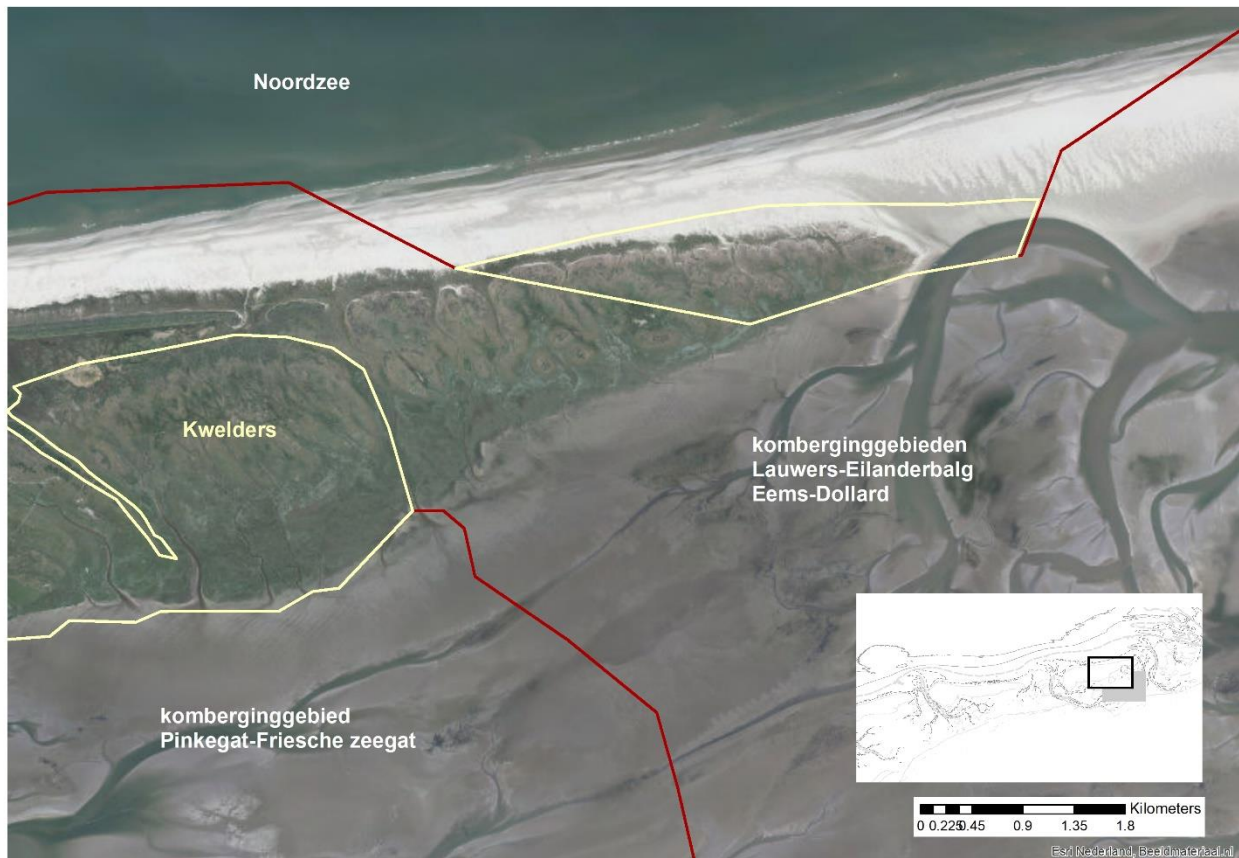


Figuur 2-17 Waddenkust bij Schiermonnikoog west bij het kombergingsgebied Pinkegat - Friesche zeegat. In geel de grenzen van het deelgebied, in rood de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

2.3.6 Eilanderbalg-Lauwers-Schild-Eems-Dollard

Schiermonnikoog-oost (Figuur 2-18)

De kwelder en duinen aan de oostzijde van Schiermonnikoog vormen een gebied met een oppervlakte van 3.098.973 m². Deze punt aan de oostzijde van eiland is de verlening van de eilandstaart, die is gevormd na de afsluiting van de Lauwerszee.



Figuur 2-18 Oostzijde van Schiermonnikoog bij het kombergingsgebied Pinkegat - Friesche zeegat en de oostelijker gelegen kombergingsgebieden. In geel de grenzen van de deelgebieden, in rood de grenzen van het kombergingsgebied.

Groningerwad (Figuur 2-19)

Het gebied buiten het vaklodingengebied bij het Groningerwad bestaat geheel uit de hogere delen van de vastlandskwelder en heeft een oppervlakte van 3.887.180 m²



Figuur 2-19 Vastlandskwelders Groningen bij de gecombineerde kombergingsgebieden Lauwers, Eilanderbalg en de Eems-Dollard. In geel de grenzen van het deelgebied buiten de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

Dollard (Figuur 2-20)

In de Dollard ligt vrijwel het gehele kweldergebied buiten de vaklodingencontour, evenals een klein gebied met wadplaten. De oppervlakte van dit gebied is 8.519.480 m².



Figuur 2-20 Vastelandskwelders Dollard bij de gecombineerde kombergingsgebieden Lauwers, Eilanderbalg en de Eems-Dollard. In geel de grenzen van het deelgebied buiten de grenzen van het kombergingsgebied (de groene lijn markeert de waterkering).

2.3.7 Overzicht

Tabel 2-1 geeft het overzicht van alle in de voorgaande paragrafen genoemde gebieden en hun oppervlakte. De optelsom per kombergingsgebied is opgenomen in Tabel 2-2. Uit deze tabel wordt duidelijk dat bij de kombergingsgebieden Borndiep en Pinkegat-Friesche zeegat de grootste arealen aanwezig zijn van gebieden die buiten de kuberingsvakken liggen, maar die wel mee doen in de uitwisseling van sediment. Het gaat in beide gevallen om de grootste oppervlakte in absolute en in relatieve zijn. In beide gevallen bestaat het gebied buiten de kuberingsvakken uit een groot oppervlakte bij het vasteland en uit eilandkwelder.

Tabel 2-1 Overzichtstabel met de deelgebieden buiten de kuberingsvakken en hun oppervlakte.

Kombergingsgebied	Locatie	Oppervlakte [m ²]	Oppervlakte [ha]
Marsdiep	De Hors	592.400	59,2
	Mokbaai	1.617.620	161,7
	Vlakte van de Kerken	4.672.240	467,2
	Balgzand	5.452.627	545,3

Kombergingsgebied	Locatie	Oppervlakte [m ²]	Oppervlakte [ha]
<i>Totaal</i>			1.233,5
Eijerlandse gat	Vliehors	16.136.984	1.613,7
<i>Totaal</i>			1.613,7
Vlie	Vastelandskust	3.169.273	316,9
	Vlieland Oost	1.916.291	191,6
	West Terschelling, Noordvaarder, Dellewal	6.919.510	691,95
	Oost Terschelling Strip, Boschplaat	8.332.395	833,2
<i>Totaal</i>			2.033,7
Borndiep	Oost Terschelling Boschplaat	18.382.490	1.838,2
	Ameland Feugelpolle- Nieuwlandsreid	5.898.897	589,89
	Vastelands Kwelder Noarderleech	32.518.456	3.251,8
<i>Totaal</i>			5.679,98
Pinkegat-Friesche Zeegat	Ameland De Hon	4.176.980	417,7
	Vasteladskwelder 't Skoar, Wierum, Paesens	17.026.600	1.026,7
	Schiermonnikoog Het Rif en Oosterkwelder	11.106.457	1.110,6
<i>Totaal</i>			3.231,0
Eilanderbalg- Lauwers-Schild Eems-Dollard	Schiermonnikoog-Oost	3.098.973	309,9
	Groningerwad	3.887.180	388,7
<i>Totaal</i>			6.986.152
Eems-Dollard	Dollard	8.519.480	851,9
<i>Totaal</i>			851,9

Tabel 2-2 Overzicht van de oppervlakte per kombergingsgebied in het kuberingsgebied en daarbuiten.

Kombergingsgebied	A. Oppervlakte kuberingsgebied (ha)	B. Oppervlakte buiten het kuberingsgebied (ha)	Oppervlakte buiten het kuberingsgebied (A) als percentage van het totaal oppervlakte (A+B)
Marsdiep	69.019	1.233	2%
Eierlandse gat	15.123	1.614	10%
Vlie	65.637	2.034	3%
Borndiep	27.777	5.680	17%
Friesche Zeegat & Pinkegat	18.143	3.231	15%
Eilanderbalg- Lauwers-Schild Eems-Dollard	54.551	852	2%
Totaal	250.250	14.664	6%

2.4 Hoe groot is de Waddenzee?

Tabel 2-3 geeft een overzicht van de oppervlaktes van de kombergingsgebieden in het Waddengebied, zoals die uit verschillende studies volgt. Voor de waarden bij 'Deze studie' zijn de oppervlakte van de kuberingsgebieden, zoals gebruikt in Nederhoff et al. (2017) gecombineerd met de getallen in Tabel 2-2. De vergelijking met andere studies laat zien dat de oppervlaktes per kombergingsgebied verschilt, wat te verwachten is vanwege de verschillende grenzen (wantijen) die zijn gehanteerd. Ook de optelsom van de kombergingsgebieden verschilt en dat betekent dat ook andere buitengrenzen zijn gehanteerd.

Tabel 2-3 Oppervlaktes van de kombergingsgebieden uit verschillende studies in 0,1 ha

Oppervlakte (km ²)	Deze studie	Louters en Gerritsen, 1994	Hoeksema et.al., 2004 (erratum Mulder)	Wang et al., 2018	
	Kuberingsgebied plus ontbrekend		Gedekt door lodingen	Totale gebied	Alleen wadplaten en geulen, geen kwelders
Marsdiep	703	712	590	686	655
Eierlandse gat	167	153	156	166	158
Vlie	677	668	633	687	715
Borndiep	335	309	270	306	276
Pinkegat		65	53	61	50
Friesche Zeegat / Zoutkamperlaag	214 (inclusief Pinkegat)	130	128	148	105

Oppervlakte (km ²)	Deze studie	Louters en Gerritsen, 1994	Hoeksema et.al., 2004 (erratum Mulder)	Wang et al., 2018	
Subtotaal	2.095	2.037	1.830	2.054	1.959
Eilanderbalg		55	38	37	
Lauwers		145	126	143	
Schild		29	30	31	
Eems-Dollard		520	435	489	
Subtotaal	554	749	629	699	
Totaal	2.649	2.786	2.459	2.753	

3 SEDIMENTATIESNELHEDEN IN DE NIET-GEKUBEERDE DELEN VAN DE WADDENZEE

In de voorgaande hoofdstukken zijn de gebieden vastgesteld die buiten de kuberingsvakken liggen, maar die wel meedoen in de uitwisseling van sediment. Hoeveel sediment netto terechtkomt in deze gebieden is afhankelijk van de sedimentatiesnelheden die daar optreden. Deze sedimentatiesnelheden variëren in veel gevallen in de tijd. In dit rapport wordt vooralsnog gerekend met een bandbreedte, zonder rekening te houden variaties in de tijd, omdat het al lastig blijkt om voor bepaalde deelgebieden sedimentatiesnelheden te achterhalen en ook niet altijd duidelijk is over welke periode de sedimentatiesnelheden zijn bepaald. In dit hoofdstuk wordt in paragraaf 3.1 duidelijk gemaakt welke gegevens beschikbaar zijn om de sedimentatiesnelheden in de missende delen te bepalen. In paragraaf 3.2 wordt vervolgens per gebied vastgesteld met welke sedimentatiesnelheden in dit rapport zal worden gerekend en op welke gegevens, informatie of aannames deze snelheden zijn gebaseerd.

3.1 Metingen sedimentatiesnelheden

In de verschillende soorten gebieden zijn verschillende metingen uitgevoerd, die inzicht geven in de sedimentatiesnelheden. De meettechnieken zijn onder te verdelen in *hoogtemetingen* ten opzichte van een vast referentievlak (zoals het NAP) en *sedimentatiemetingen* ten opzichte van een lokaal referentieniveau (zoals een herkenbare laag in een kwelder).

Bij *hoogtemetingen* wordt bij elke meting de hoogte van het gebied ingemeten ten opzichte van een referentieniveau, zoals het NAP. Door de gemeten hoogtes van verschillende opnames te vergelijken wordt het hoogteverschil tussen de opeenvolgende metingen bepaald. Hoogtemetingen zijn bijvoorbeeld de metingen van de raaien in de vastelandskwelders, de gebiedsdekkende LIDAR hoogteopnamen van de droogvallende platen, kwelders en duinen (voor de vaklodingen, de jaarlijkse kustlodingen en het AHN) en de lodingen van Rijkswaterstaat. Voor de analyses in dit rapport is gebruik gemaakt van de vaklodingencycli vanaf 1985 (oudere vaklodingen omvatten niet de deelgebieden uit dit rapport, want deze zijn begrensd door de vaklodingsgrenzen), de onderliggende Lidar hoogtemetingen van de droogvallende delen indien beschikbaar, de Lidar-hoogtemetingen van de kust die vanaf 1996 beschikbaar zijn (daarvoor werd de hoogte in raaien opgemeten) en incidenteel van de AHN-gegevens.

Bij *sedimentatiemetingen* wordt bij elke meting de afstand van het oppervlak ten opzichte van een lokaal referentieniveau bepaald. Zo'n referentieniveau kan natuurlijk zijn, zoals het basisniveau van de eilandkwelders, of onnatuurlijk, zoals een gekleurd niveau (bijvoorbeeld van het kleimineraal kaoliniet), of een chemische of radioactieve marker (die onopzettelijk zijn aangebracht – denk aan de kernramp van Tsjernobyl). Het is belangrijk dat de ouderdom van de referentielaag (t_{ref}) bekend is, zodat uit de afstand (H_{ref-N}) tussen de referentielaag en het maaiveld van het betreffende jaar (t_{jaarN}) de gemiddelde sedimentatie (S) kan worden berekend ($S = H_{ref-N} / (t_{jaarN} - t_{ref})$). Andere referentieniveaus worden gevormd door het aanbrengen van een verankering in de ondergrond, zoals bij de spijkermetingen en de sedimentatiebalken (SEB's).

Tussen de sedimentatiesnelheid die wordt bepaald uit hoogtemetingen en de sedimentatiemetingen bestaan verschillen. De sedimentatiesnelheid die wordt berekend met metingen van de hoogteligging levert altijd een lager sedimentatievolume per jaar dan de sedimentatiemetingen, vanwege het optreden van bodemdaling (tektonisch en in sommige gebieden door gaswinning) en klink (compactie). In de onderstaande Figuur 3-1 is dit geïllustreerd met een schematische dwarsdoorsnede van een opeenstapeling van sedimentlaagjes (een laag per jaar) waarbij ten opzichte van de uitgangssituatie in het ene geval (T1A) geen bodemdaling en klink optreedt en in het ander geval (T1B) 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.

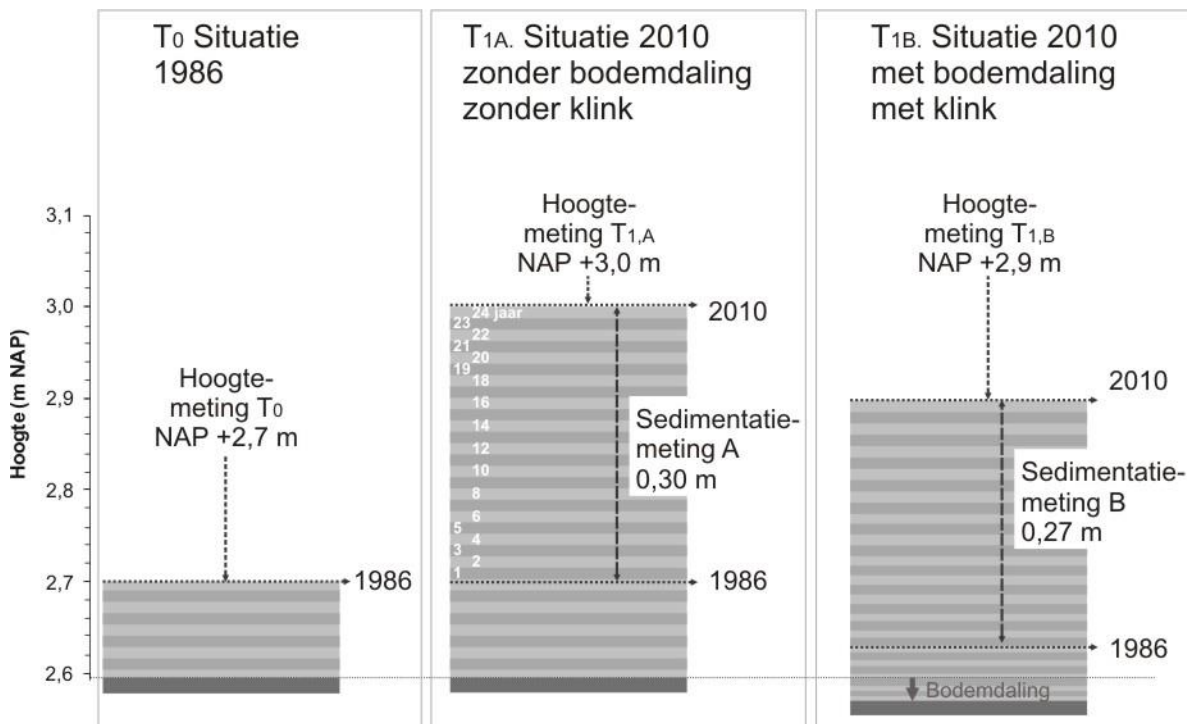
Sedimentatiemetingen: Gemeten hoogteverschil: 30 cm in 24 jaar, oftewel 1,25 cm/jaar.

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 3-1 Voorbeeld van een sedimentkolom op de kwelder, met de uitgangssituatie (links), de doorsnede zonder (midden) en de doorsnede met klink en bodemdaling (rechts), waarbij is uitgegaan van een vaste NAP referentiehoogte, die invloed ondervindt van bodemdaling (uit LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013).

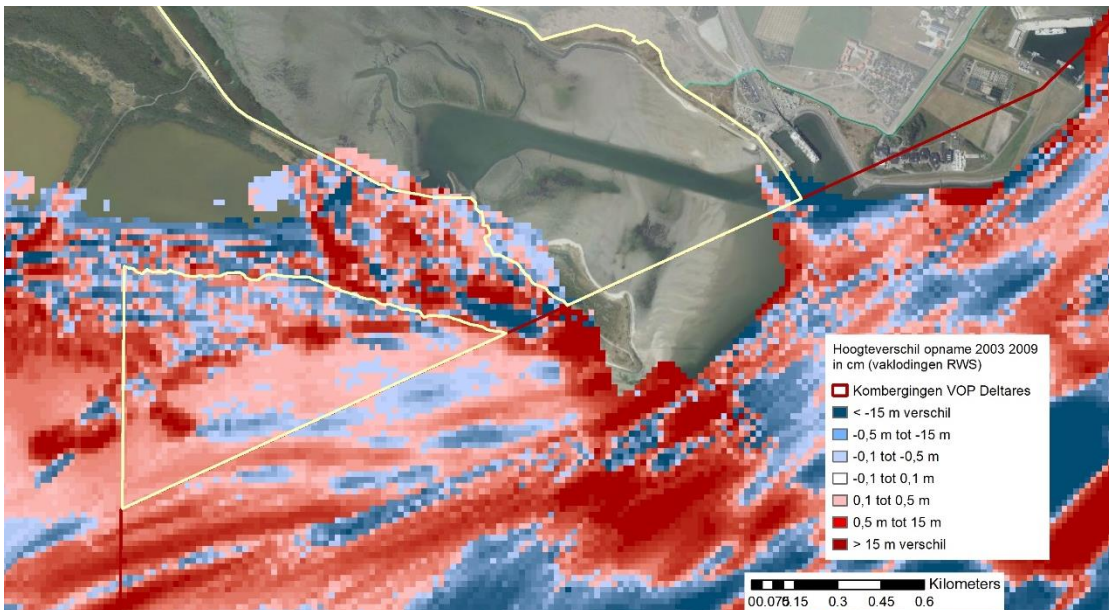
In deze studie is niet gecorrigeerd voor het verschil tussen de sedimentatiesnelheden uit hoogtemetingen en de gemeten sedimentatiesnelheden. Een dergelijke correctie vereist meer inzicht in de omvang van de bodemdaling en- specifiek voor kwelders- in de bijdrage van klink. Zeker wanneer in detail naar variaties in de sedimentatiesnelheden van slib op kwelders wordt gekeken, is het gewenst om hier meer inzicht in te krijgen. In deze rapportage wordt ook niet stilgestaan bij de nauwkeurigheid van de bepalingen aan de sedimentatiesnelheden, omdat hiervoor veel achtergrondinformatie nodig is over de verschillende meetmethoden en hun nauwkeurigheden. Voor deze studie is het wel zinvol om op te merken dat de sedimentatiesnelheden betrouwbaarder (nauwkeuriger) zijn als het aantal waarnemingen in de tijd groter is. De raaimetingen van de hoogte van de vastelandskwelders wordt jaarlijks of tweejaarlijks opgemeten, zodat trends met grote nauwkeurigheid zijn vastgesteld.

3.2 Sedimentatiesnelheden in de deelgebieden

Voor de deelgebieden die zijn onderscheiden in paragraaf 2.3 zijn hieronder de waarnemingen opgenomen, die zijn gebruikt om de ondergrens en de bovengrens van de sedimentatiesnelheden af te leiden. Deze snelheden zijn vervolgens opgenomen in Tabel 3-1.

Marsdiep

De Hors: De sedimentatiesnelheden van de Hors zijn geschat op basis van hoogtemetingen uit de vaklodingen (Figuur 3-2) en de LIDAR van JarKus metingen. De sedimentatiesnelheden in het gebied variëren sterk in de ruimte en de tijd. Een betere bepaling van de sedimentatie vanaf halverwege de jaren '90 kan worden gemaakt op basis van een structurele analyse van de LIDAR van de JarKus metingen. Vanwege de ruimtelijke verschillen in de waargenomen sedimentatiesnelheden wordt een sedimentatiesnelheid van 0,25 cm tot 0,75 cm per jaar aangehouden.



Figuur 3-2 Kaart met de hoogteverschillen tussen twee opeenvolgende vaklodingen (2003 en 2009) van het kombergingsgebied Marsdiep, met in geel de gebieden buiten de kuberingsvakken.

Mokbaai: Baptist et al., 2014 geven sedimentatiesnelheden. Deze zijn bepaald door vergelijking van de lodingskaart van 1983 is gedigitaliseerd, waarna het verschil met de metingen uit 2013 (AHN2) bepaald kon worden. De verschilkaart geeft aan dat er erosie van zo'n 15-25 cm is opgetreden in een gebied ten oosten van de kwelder. In het nog oostelijker gelegen wad is een sedimentatie van 20-40 cm te zien. Vanwege de ruimtelijke verschillen wordt een sedimentatiesnelheid van 0,25 cm tot 0,75 cm per jaar aangehouden.

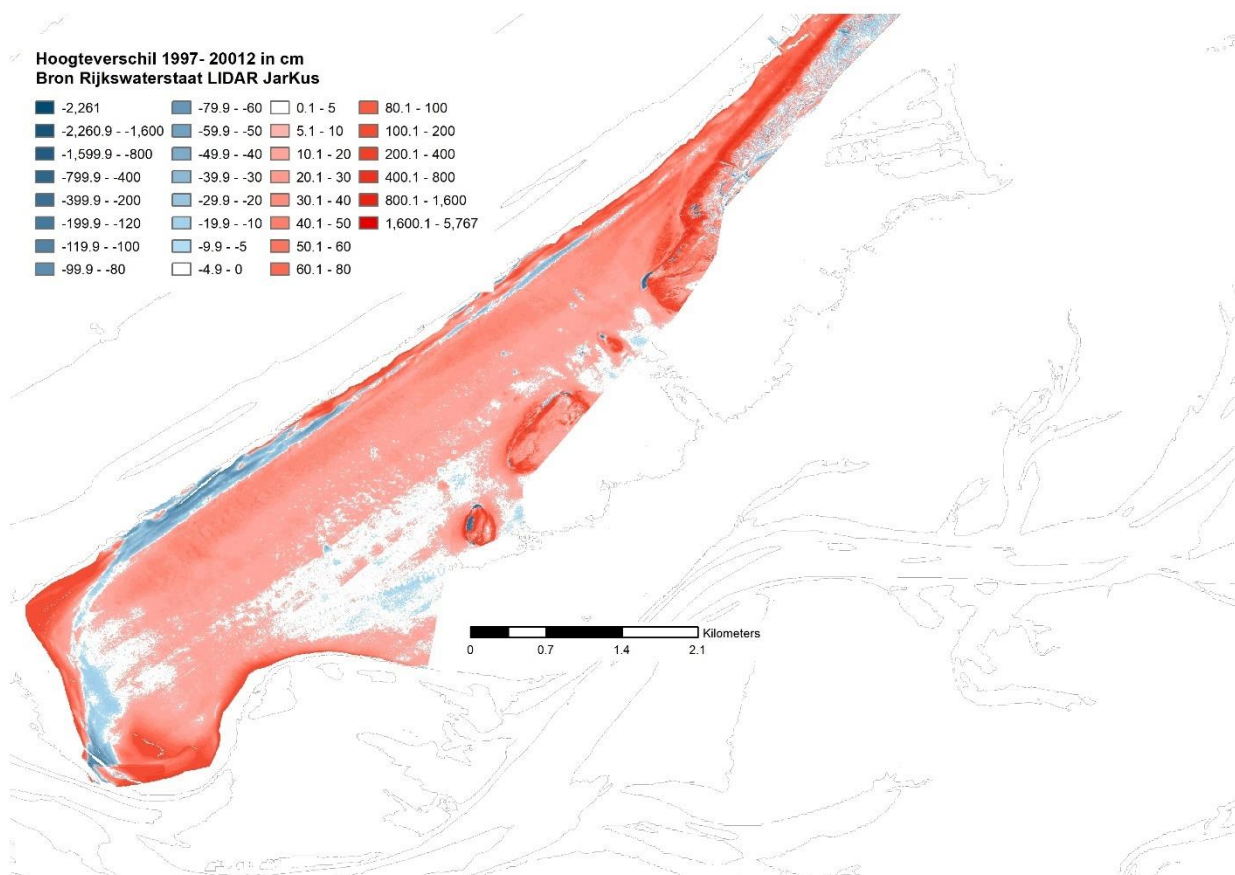
Vlakte van de Kerken (De Schorren): Esselink et al. (2017) merken over de sedimentatiesnelheden op: "Er zijn geen metingen van de opslibingssnelheden van De Schorren. Om toch een indruk te verkrijgen van de kleidikte en bodemopbouw zijn tijdens het veldbezoek op 20 september 2016 een paar monsters genomen van de toplaag van het sediment op het oog beoordeeld. Vergeleken met andere eilandkwelders (Schiermonnikoog, Ameland) met dezelfde vegetatie leek De Schorren een zandiger sediment te hebben met een hoger organisch stofgehalte. Er waren ook veel fijnzandige dunne laagjes in het profiel zichtbaar. Deze waarnemingen vormen een indicatie dat (a) de opslibingssnelheid waarschijnlijk niet zo hoog is (hoogstens een paar millimeter per jaar), (b) dat het sediment vooral bij stormen wordt afgezet (c) het aanbod aan fijn sediment relatief gering is." De sedimentatiesnelheid is naar verwachting laag. Dit geldt ook voor de wadplaten die binnen het deelgebied liggen, op basis van een vergelijking van de vaklodingsgegevens. Een sedimentatiesnelheid van 0,0 cm tot 0,1 cm per jaar wordt aangehouden voor dit deelgebied.

Balgzand: Van de kleine kweldergebieden is beperkte informatie beschikbaar, waaruit blijkt dat deze deels zijn aangelegd als compensatie voor het verlies van kwelderareaal bij dijkversterking. Van deze kwelders zijn

geen sedimentatie- of hoogtemetingen bekend, die zijn uitgevoerd voor het bepalen van de ontwikkelingen van deze kwelders. De vaklodingen geven informatie over de hoogteontwikkelingen van het wad binnen de deelgebieden en deze laten overwegend hoogte toename zien. Op basis van een interpretatie van de vaklodingen is een sedimentatiesnelheid van 0,1 cm tot 0,25 cm per jaar aangehouden.

Eierlandse gat

Vliehors: De sedimentatiesnelheden van de Vliehors zijn geschat op basis van hoogtemetingen van vaklodingen en de LIDAR van JarKus metingen (Figuur 3-3). De hoogtemetingen laten overtuigend zien dat het gebied een sedimentatiegebied is. De Kroon's polders vormen ook onderdeel van dit gebied. Deze voormalige polders staan tegenwoordig in verbinding met de Waddenzee en fungeren als sedimentatiegebied. Metingen van de sedimentatiesnelheid in de Kroon's polder zijn niet aangetroffen. Een sedimentatiesnelheid van 0,25 cm tot 1,5 cm per jaar wordt aangehouden voor het gehele gebied. Een betere bepaling van de sedimentatie vanaf halverwege de jaren '90 kan worden gemaakt op basis van een structurele analyse van de LIDAR van de JarKus metingen.



Figuur 3-3 Kaart met de hoogteverschillen tussen twee Lidar hoogteopnames van de Jaarlijkse kustmetingen (JarKus) 1997 en 2012 van de Vliehors.

Vlie

Vastelandskust: Slechts een klein deel van het deelgebied omvat kwelders, waarvan in het kader van het project Slibmotor Koehoal sedimentatie- en hoogtemetingen zijn uitgevoerd (nog niet gepubliceerd, wel gedeeld in bijeenkomsten). Op het voorliggende wad zijn zeer gedetailleerde sedimentatiemetingen uitgevoerd in het kader van hetzelfde project, die ook nog niet gepubliceerd zijn. De vaklodingsgegevens laten voor het gebied grootschalige en structurele sedimentatie zien. Op basis van de vaklodingen wordt uitgegaan van een sedimentatiesnelheid van 0,5 cm tot 1,0 cm per jaar.

Vlieland Oost: De sedimentatiesnelheden van de Vlieland oost zijn geschat op basis van hoogtemetingen van vaklodingen. De hoogtemetingen laten geen duidelijke ontwikkelingen zien en daarom wordt een sedimentatiesnelheid van -0,25 cm tot +0,25 cm per jaar aangehouden voor het gehele gebied. Een betere

bepaling van de sedimentatie vanaf halverwege de jaren '90 kan worden gemaakt op basis van een structurele analyse van de LIDAR van de Jarkus metingen.

West Terschelling, Noordvaarder, Dellewal: Dit gebied omvat drie deelgebieden, met verschillende karakteristieken en verschillen in de beschikbaarheid van gegevens. De vaklodingen en de LIDAR van de Jarkus dekken grote delen van de Noordsvaarder. De Noordsvaarders is overwegend een gebied waarvan de hoogte toeneemt. Wel speelt de aanlanding van de zandplaten en de erosie door geulen een rol in de ontwikkeling van het sedimentvolume van de Noordsvaarders. Van de Dellewal is alleen bij de laatste twee vaklodingen (2010, 2016) de hoogte beschikbaar en de waargenomen verschillen zijn voldoende groot om de sedimentatie op te baseren. Op basis van de waarnemingen aan de vaklodingen van de Noordsvaarder wordt een gemiddelde sedimentatie van 0,5 tot 1,0 cm per jaar aangenomen voor het totale deelgebied.

Oost Terschelling Striep, Boschplaat: Voor de wadplaat leveren de vaklodingen de benodigde hoogteinformatie en deze laten enige erosie zien. Leendertse et al. (1997) geven een sedimentatiesnelheid van ongeveer van 5 mm/jaar, op basis van drie hoogtemetingen. De sedimentatiemetingen op de Boschplaat uit de Groot (2009) zijn gebaseerd op metingen van de dikte van de kwelderafzettingen op het oorspronkelijke onbegroeide oppervlak. Voor het hele gebied wordt een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 0,5 tot 1,5 cm per jaar aangehouden.

Borndiep

Oost Terschelling Boschplaat: Voor de wadplaat leveren de vaklodingen de benodigde hoogteinformatie en deze laten enige erosie zien. Aan de oostzijde van het gebied is sprake van erosie. Leendertse et al. (1997) geven een sedimentatiesnelheid van ongeveer van 5 mm/jaar, op basis van drie hoogtemetingen. De sedimentatiemetingen op de Boschplaat uit de Groot (2009) zijn gebaseerd op metingen van de dikte van de kwelderafzettingen op het oorspronkelijke onbegroeide oppervlak. Voor het hele gebied wordt een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 0,5 tot 1,5 cm per jaar aangehouden.

Ameland Ballumerbocht-Nieuwlandsreid: De Ballumer bocht is een sedimentatiegebied, zoals blijkt uit de hoogtegegevens in de vaklodingen. Van het Nieuwlandsreid zijn hoogtemetingen en sedimentatiemetingen beschikbaar vanaf de halverwege de jaren '80 vanwege de gaswinning Ameland. De hoeveelheid beschikbare gegevens is groot voor het Nieuwlandsreid en dat maakt het verassend genoeg lastig om een keuze te maken voor de gebiedsgemiddelde sedimentatie. De metingen laten sedimentatie zien, op sommige plekken in combinatie met een afname van de hoogte (Elschot et al., 2017). De combinatie van doorgaande sedimentatie en afname van de hoogte wordt mede bepaald door de bodemdaling door de gaswinning. Op basis van de metingen is een sedimentatiesnelheid van 0,2 tot 1,0 cm per jaar aangehouden.

Vastelands Kwelder Noarderleech: Van alle kwelders in het Waddengebied is van de vastelandskwelder Noarderleech zonder meer de meeste informatie beschikbaar, enerzijds vanwege de metingen die aan alle landaanwinningswerken zijn uitgevoerd (Hoekstra et al. 1998; van Duin, 2016) en anderszijds vanwege het kwelderherstel, waarvoor ook een monitoringprogramma is uitgevoerd. Van de wadplaat die voor de kwelderwerken ligt, zijn hoogtegegevens beschikbaar uit de vaklodingen. Deze wadplaat laat zeer overtuigend een toename van de hoogte zien. De grote hoeveelheid gegevens maakt het lastig om gemiddeld getal te geven voor de sedimentatiesnelheid. In paragraaf 5.3.2 zal nader worden ingegaan op de waargenomen variaties in de tijd in de sedimentatie op deze kwelder. Op basis van de metingen is een sedimentatiesnelheid van 1,0 tot 2,0 cm per jaar aangehouden.

Pinkegat-Friesche Zeegat

Ameland De Hon: Van de Hon zijn net als van het Nieuwlandsreid hoogtemetingen en sedimentatiemetingen beschikbaar vanaf de halverwege de jaren '80 vanwege de gaswinning Ameland. De sedimentatiemetingen laten sedimentatie zien, op sommige plekken in combinatie met een afname van de hoogte (Elschot et al., 2017). De combinatie van doorgaande sedimentatie en afname van de hoogte is een gevolg van de bodemdaling door de gaswinning. Op basis van de metingen is een sedimentatiesnelheid van 1,0 tot 2,0 cm per jaar aangehouden.

Vastelandskwelder 't Skoar, Wierum, Paesens en voorliggende wadplaat: Dit gebied maakte in ieder geval tot in de jaren '60 als geheel deel uit van de landaanwinningswerken en was voorzien van rijshoutendammen, greppels en geulen. De gegevens van de hoogteontwikkeling uit die periode, die beschikbaar zijn in Hoekstra et al. (1989) zijn niet meer bruikbaar in de huidige situatie, waar alleen ten

oosten van de veerdam bij Holwerd en voor de kwelders nog dammen aanwezig zijn. In 2007 is gestart met de gaswinning MLV, die zorgt voor nog beperkte bodemdaling in deze omgeving. De hoogtegegevens uit de vaklodingen geven inzicht in de hoogteveranderingen op de wadplaat. Van de kwelders zijn een beperkt aantal hoogtemetingen beschikbaar (van Duin et al., 2016). Op basis van de verschillende metingen wordt een sedimentatiesnelheid van 0,2 tot 0,5 cm/jaar aangehouden.

Schiermonnikoog Het Rif en Oosterkwelder: Dit gebied omvat Het Rif, waarvan een beperkt aantal hoogtemetingen beschikbaar is. In vrijwel alle vaklodingen ontbreekt dit gebied, het is wel aanwezig in een deel van de LIDAR van de Jarkus-metingen. De waargenomen hoogteveranderingen zijn positief: op het Rif vindt sedimentatie plaats. Van de kwelder zijn sedimentatiemetingen beschikbaar, op basis van de dikte van de kwelderafzettingen ten opzichte van het onderliggende zandpakket (de Groot, 2009; Elschot et al., 2017) en op basis van metingen aan permanente kwadranten (PQ's), die een hoogteveranderingen van 1 – 5 mm/jaar (Elschot et al., 2017). Op basis van de metingen is een sedimentatiesnelheid van 0,1 tot 0,5 cm per jaar aangehouden.

Eilanderbalg- Lauwers-Schild Eems-Dollard

Schiermonnikoog-Oost: Voor de kwelder binnen het gebied worden dezelfde waarden van 0,1 tot 0,5 mm/jaar aangehouden als voor de Oosterkwelder, op basis van de metingen die daar zijn uitgevoerd. De situatie binnen dit deelgebied is eigenlijk iets complexer, met aan de noordzijde sedimentatie door eolische processen en washovers en aan de zuidzijde erosie door een getijdegeul. Op basis van de metingen is een sedimentatiesnelheid van 0,1 tot 0,5 cm per jaar aangehouden.

Groningerwad: Het deelgebied ligt vrijwel geheel op de hogere delen van de kwelder. Van deze kwelder zijn hoogtemetingen beschikbaar die zijn uitgevoerd in het kader van de kweldermonitoring (van Duin, 2016). De waargenomen sedimentatiesnelheden op de hogere delen van de kwelder zijn gemiddeld 6 tot 12 mm per jaar. Op basis hiervan wordt een sedimentatiesnelheid van 0,6 tot 1,1 cm per jaar aangehouden.

Eems-Dollard

Dollard: Het deelgebied in de Dollard ligt grotendeels op de kwelders. Van de kwelders zijn door Esselink et al. (2012) de opslibbingssnelheden bepaald, op basis van de verschillende beschikbare gegevens voor het gebied. Van een structureel meetprogramma, zoals bij de Friese en Groninger vastelandskwelders, is geen sprake geweest en daarom zijn gegevens van verschillende bronnen gecombineerd. De waargenomen sedimentatiesnelheden liggen rond de 8 mm per jaar en op basis hiervan is een sedimentatiesnelheid van 0,6 tot 0,8 cm per jaar aangehouden.

Tabel 3-1 Sedimentatiesnelheden per deelgebied (zie voor de geraadpleegde bronnen de tekst hierboven).

	Afzettings-milieu	Informatie/gegevens sedimentatie	Gemiddelde sedimentatiesnelheid (cm/jaar)	
			Ondergrens	Bovengrens
Marsdiep				
De Hors	Strandvlakte, duin	gegevens Vakloding / LIDAR kustmetingen	0,25	0,75
Mokbaai	Kwelder, wadplaat & geul	rapport op basis van LIDAR hoogtemetingen	0,25	0,75
Vlakte van de Kerken	Wadplaat, kwelder	rapport & gegevens (vaklodingen)	0	0,1
Balgzand	Wadplaat, kwelder	gegevens Vaklodingen	0,1	0,25
Eierlandse gat				
Vliehors	Strandvlakte, duin, kwelder	gegevens LIDAR kustlodingen	0,25	1,5
Vlie				
Vastelandskust	Wadplaat, kwelder	rapporten Slibmotor & gegevens	0,5	1

Afzettings-milieu		Informatie/gegevens sedimentatie	Gemiddelde sedimentatiesnelheid (cm/jaar)	
Vaklodingen				
Vlieland Oost	Wadplaat	gegevens Vaklodingen	-0,25	0,25
West Terschelling, Noordvaarder, Dellewal	Strandvlakte, duin, wadplaat, kwelder	gegevens vaklodingen beperkt deelgebied	0,5	1
Oost Terschelling Strip, Boschplaat	Kwelder, wadplaat	rapporten puntmetingen	0,5	1,5
Borndiep				
Oost Terschelling Boschplaat	Kwelder, wadplaat	rapporten puntmetingen	0,5	1
Ameland Ballumerbocht - Nieuwlandsreid	Kwelder, wadplaat	Ballumerbocht vaklodingen & Nieuwlandsreid rapporten verschillende metingen: hoogte en sedimentatie	0,2	1
Vastelands Kwelder Noarderleech	Kwelder, wadplaat	rapporten hoogtemetingen en sedimentatiemetingen	1	2
Pinkegat-Friesche Zeegat		Informatie/gegevens sedimentatie	Gemiddelde sedimentatiesnelheid (cm/jaar)	
Ameland De Hon	Kwelder, wadplaat	rapporten verschillende metingen: hoogte en sedimentatie	0,2	1
Vastelandskwelder 't Skoar, Wierum, Paesens	Wadplaat, kwelder	Wadplaat: gegevens vaklodingen & rapport puntmetingen	0,2	0,5
Schiermonnikoog Het Rif en Oosterkwelder	Kwelder, wadplaat	Rif: niet; Oosterkwelder: rapporten puntmetingen	0,1	0,5
Eilanderbalg-Lauwers-Schild Eems-Dollard				
Schiermonnikoog-Oost	Kwelder, wadplaat	rapporten puntmetingen	0,1	0,5
Groningerwad	Kwelder	gegevens Vaklodingen	0,6	1,1
Eems-Dollard				
Dollard	Kwelder	gegevens Vaklodingen & rapport	0,6	0,8

Afzettings-milieu	Informatie/gegevens sedimentatie	Gemiddelde sedimentatiesnelheid (cm/jaar)
-------------------	----------------------------------	-------------------------------------------

hoogtemetingen

3.3 Sedimentatievolumes in de deelgebieden

In de onderstaande Tabel 3-2 is het areaal van de deelgebieden vermenigvuldigd met de ondergrens en de bovengrens van de sedimentatiesnelheden, om zo te komen tot een plausibele boven en ondergrens van het sedimentatievolume per jaar.

Tabel 3-2 Bovengrens en ondergrens van de sedimentatievolumes per jaar voor de deelgebieden.

	Oppervlakte (m ²)	Sedimentatiesnelheid (cm/jaar)		Sedimentatie (m ³ /jaar)	
		Ondergrens	Bovengrens	Ondergrens	Bovengrens
Marsdiep					
De Hors	592.400	0,25	0,75	1.481	4.443
Mokbaai	1.617.620	0,25	0,75	4.044	12.132
Vlakte van de Kerken	4.672.240	0	0,1	0	4.672
Balgzand	5.452.627	0,1	0,25	5.453	13.632
Eierlandse gat					
Vliehors	16.136.984	0,25	1,5	40.342	242.055
Vlie					
Vastelandskust	3.169.273	0,5	1	15.846	31.693
Vlieland Oost	1.916.291	-0,25	0,25	-4.791	4.791
West Terschelling, Noordvaarder, Dellewal	6.919.510	0,5	1	34.598	69.195
Oost Terschelling Strip, Boschplaat	8.332.395	0,5	1,5	41.662	124.986
Borndiep					
Oost Terschelling Boschplaat	18.382.490	0,5	1	91.912	183.825
Ameland Ballumerbocht - Nieuwlandsreid	5.898.897	0,2	1	11.798	58.989
Vastelands Kwelder Noorderleech	32.518.456	1	2	325.185	650.369
Pinkegat-Friesche Zeegat					
Ameland De Hon	4.176.980	0,2	1	8.354	41.770
Vastelandskwelder 't Skoar, Wierum, Paesens	17.026.600	0,2	0,5	34.053	85.133
Schiermonnikoog Het Rif en Oosterkwelder	11.106.457	0,1	0,5	11.106	55.532
<i>Subtotaal</i>					
Eilanderbalg- Lauwers-Schild Eems-Dollard					

	Oppervlakte (m ²)	Sedimentatiesnelheid (cm/jaar)		Sedimentatie (m ³ /jaar)	
Schiermonnikoog-Oost	3.098.973	0,1	0,5	3.099	15.495
Groningerwad	3.887.180	0,6	1,1	23.323	42.759
Eems-Dollard					
Dollard	8.519.480	0,6	0,8	51.117	68.156
TOTAAL				698.583	1.709.626

De berekende bandbreedte in de sedimentatie in de deelgebieden die buiten de kuberingsgebieden liggen bedragen dus 0,7 tot 1,7 x 10⁶ m³ per jaar. Als de Eems-Dollard buiten de beschouwing wordt gelaten, dan gaat het om 0,6 tot 1,6 x 10⁶ m³ per jaar. Deze laatste twee getallen vergelijken we met de resultaten van de kuberingsgebieden door Nederhoff et al. (2017) over de periode 1990-2012, waarvan we zeker weten dat grenzen van de kuberingsgebieden heeft gehanteerd waar de deelgebieden buiten liggen. De door Nederhoff et al. (2017) berekende trends in de sedimentatie zijn:

- Marsdiep 1,6 10⁶ m³/jaar
- Eierlandse gat -0,39 10⁶ m³/jaar
- Vlie 1,7 10⁶ m³/jaar
- Borndiep 1,9 10⁶ m³/jaar
- Friesche Zeegat 0,2 10⁶ m³/jaar
- *Subtotaal* 5,01 10⁶ m³/jaar

Het volume dat in de deelgebieden buiten de kuberingsvakken sedimenteert heeft waarschijnlijk een omvang van 12% tot 31% van de sedimentatie binnen de kuberingsvakken. Dit is een omvang die niet verwaarloosd mag worden bij het beschouwen van de sedimentatie in (en sedimentbalansen van) het Waddengebied.

4 BIJDRAGE VAN SLIB AAN DE SEDIMENTATIE

Om te bepalen hoe groot de sedimentatie van slib in de deelgebieden kan zijn, worden in dit hoofdstuk berekeningen gemaakt van de mogelijke bijdrage van slib. Voor het uitvoeren van de berekeningen worden de sedimentatievolumes uit het voorgaande hoofdstuk vermenigvuldigd met de slibgehaltes van de verschillende deelgebieden. Het aantal gegevens dat beschikbaar is van de sedimentsamenstelling en de slibgehaltes is nog beperkter dan de gegevens van de sedimentatiesnelheden. Dat betekent dat de bandbreedte rond de berekeningen van de bijdrage van slib aan de sedimentatie nog groter is dan de bandbreedte rond de sedimentatie.

4.1 Metingen slibgehalte

De slibgehaltes zijn gebaseerd op verschillende soorten metingen die zijn uitgevoerd in het waddegebied, waarvoor verschillende soorten bemonstering, monsterbehandeling en analyses zijn uitgevoerd. Ook de wijze van rapporteren verschilt, soms wordt alleen een slibgehalte of een lutumgehalte opgegeven, soms een hele korrelgrootteverdeling. De verschillen in de bepalingen en de rapportages betekenen dat het niet mogelijk is om een omrekening te maken waarbij een onderlinge vergelijking mogelijk is. Een omrekening van de uitkomsten van verschillende analysetechnieken en voorbewerking is mogelijk.

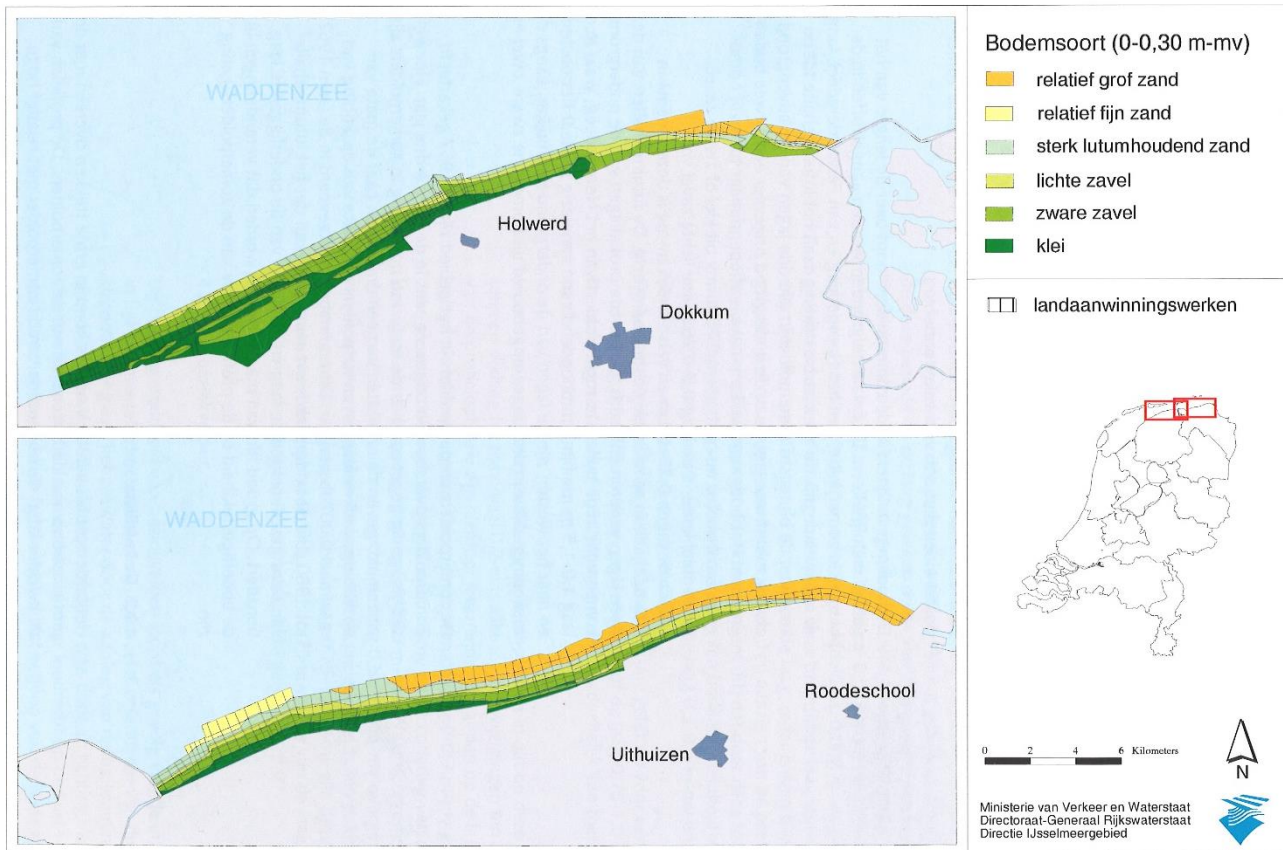
De belangrijke aanname die in de studie wordt gedaan is dat de slibgehalten die uit de rapportages zijn geabstraheerd representatief worden geacht voor alle sedimentatie. Dat dit een belangrijke vereenvoudiging is van de werkelijkheid, blijkt onder andere uit de kwelderbemonsteringen die zijn gerapporteerd in Hoekstra et al. (1998).

Kwelderbemonsteringen

In de jaren '50 en '60 van de vorige eeuw zijn in de landaanwinningwerken uitgebreide bodemkundige onderzoeken verricht, waarover is gerapporteerd in Hoekstra et al. (1998). Bij deze onderzoeken zijn de kwelders en de voorliggende bezinkvelden bemonsterd met een handboor, waarbij verschillende lagen zijn gekarteerd (0-0,3 m; 0,3-0,5 m; 0,5-0,75 m; 0,75-1,0 m; 1,0-1,5 m). Van de verzamelde monsters werd in eerste instantie (tot 1969) het slibgehalte van 0-16 μm bepaald en later het lutumgehalte van 0-2 μm , doormiddel van bezinkingsproeven. De slibgehaltes zijn omgerekend naar lutumgehalte met de formule $\text{lutumgehalte} = 0,66 \times \text{slibgehalte}$. De resultaten van deze bemonstering worden getoond in Figuur 4-1. De gehanteerde naamgeving in Figuur 4-1 correspondeert met de lutumgehalten in Tabel 4-1. In de rapportage van Hoekstra et al. (1998) wordt veel meer detailinformatie gegeven over de bodemopbouw van de landaanwinningwerken, zowel in de diepte, als in de loop van de tijd.

Tabel 4-1 Klasseindeling bodemkartering landaanwinningwerken.

Naam	Lutumgehalte
Relatief grof zand	0% - 1,5%
Relatief grof zand	1,5% - 3%
Sterk lutumhoudend zand	3% - 8%
Lichte zavel	8% - 12%
Zware zavel	12% - 25%
Klei	25%



Figuur 4-1 Bodemkaart van de Fries-Groningse kust uit Hoekstra et al. (1998).

Sedimentatlas, SIBES en andere bronnen

De Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998) bevat gegevens over de korrelgrootteverdeling van een groot aantal meetpunten in de Waddenzee. De bemonstering heeft plaatsgevonden met een Van Veen bodemhapper, waarmee een mengmonster is verzameld. De korrelgrootteverdeling is bepaald met een Malvern particle sizer, waarbij de enige monsterbehandeling bestond uit het afzeven van de allergrootste fractie (> 2 mm). Vanwege de verschillen tussen de methoden die zijn gebruikt voor de inwinning van de gegevens voor de sedimentatlas en de inwinning voor de kwelderkaart, dient er een omrekening plaats te vinden van de slibgehalten om deze onderling te kunnen vergelijken. Hiervoor wordt een factor gehanteerd van 1,71 (Arcadis, 2017). Het slibgehalte uit de sedimentatlas moet worden gedeeld door deze factor, om te komen tot een slibpercentage dat vergelijkbaar is met de kwelderkaart.

Het SIBES-programma omvat de bemonstering en analyse van de droogvallende platen van de Waddenzee voor het benthos en de sedimentsamenstelling. De bemonstering omvat de bovenste 5 cm van de wadbodem, waarvan de korrelgrootte wordt bepaald met een Coulter laser particle sizer.

Sommige studies bevatten gegevens of een beschrijving van de sedimentsamenstelling van de kwelders en van andere deelgebieden in het wad. Het is zelden duidelijk op welke wijze de sedimentsamenstelling is bepaald.

Deskundigenoordeel

Op grond van de afzettingsmodellen voor de verschillende milieus en veldkennis van bepaalde gebieden zijn ook schattingen gemaakt van de slibgehalten van gebieden. Beschrijvingen van de afzettingsmilieus van eilandkwelders staan in de Groot et al., 2017 en van vastelandkwelders in onder andere van Wesenbeeck et al. (2014). Voor strandvlaktes, zoals de Hors, Vliehors, Noordsvaarder en Het Rif wordt verwezen naar geologische beschrijving, zoals in Beets et al. (1981).

Omrekenen van gewichtspercentages naar volumepercentages

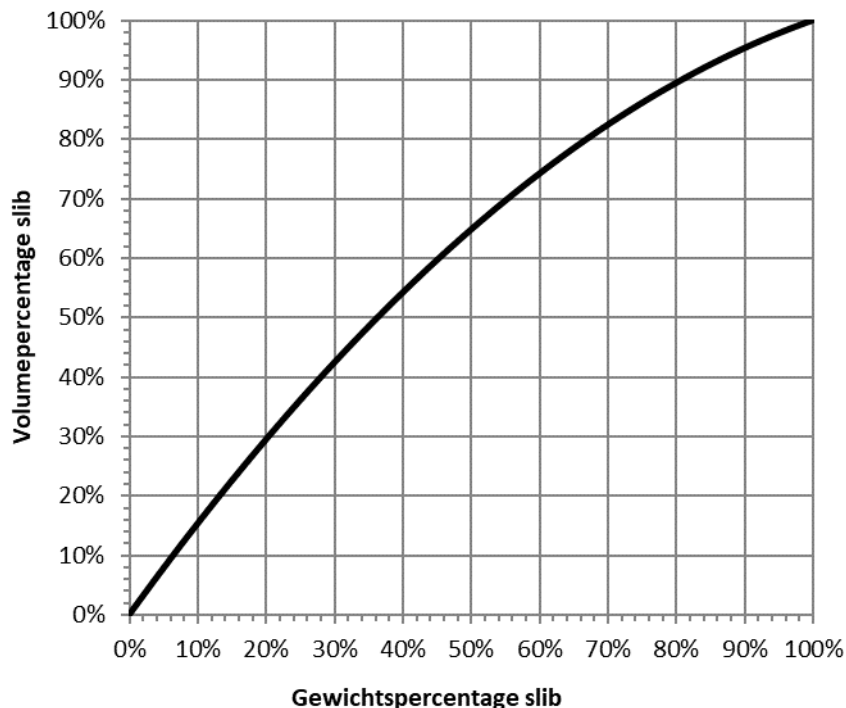
De opgegeven percentages voor slib (of lutum) zijn gewichtspercentages. De kuberingen voor het waddegebied worden uitgevoerd in kubieke meters. Om de resultaten van deze studie over de slibbijdrage aan de sedimentatie aan te laten sluiten op de kuberingen in het waddegebied, worden de gewichtspercentages slib omgerekend naar volumepercentages. Op basis van een formule voor de dichtheid van het zand-slib kan dat worden gedaan. Hierbij is gebruikgemaakt van de formule van Mulder (1995), waarin P_{fijn} het gewichtspercentage slib is (met slib de fracties kleiner dan $63\mu\text{m}$):

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

Deze formule kan worden omgerekend naar een volumepercentage VP_{fijn} :

$$VP_{fijn} = (1550 - \rho_{dry})/1100$$

De relatie tussen het gewichtspercentage slib en het volumepercentage slib dat volgt uit deze vergelijking is weergegeven in Figuur 4-2.

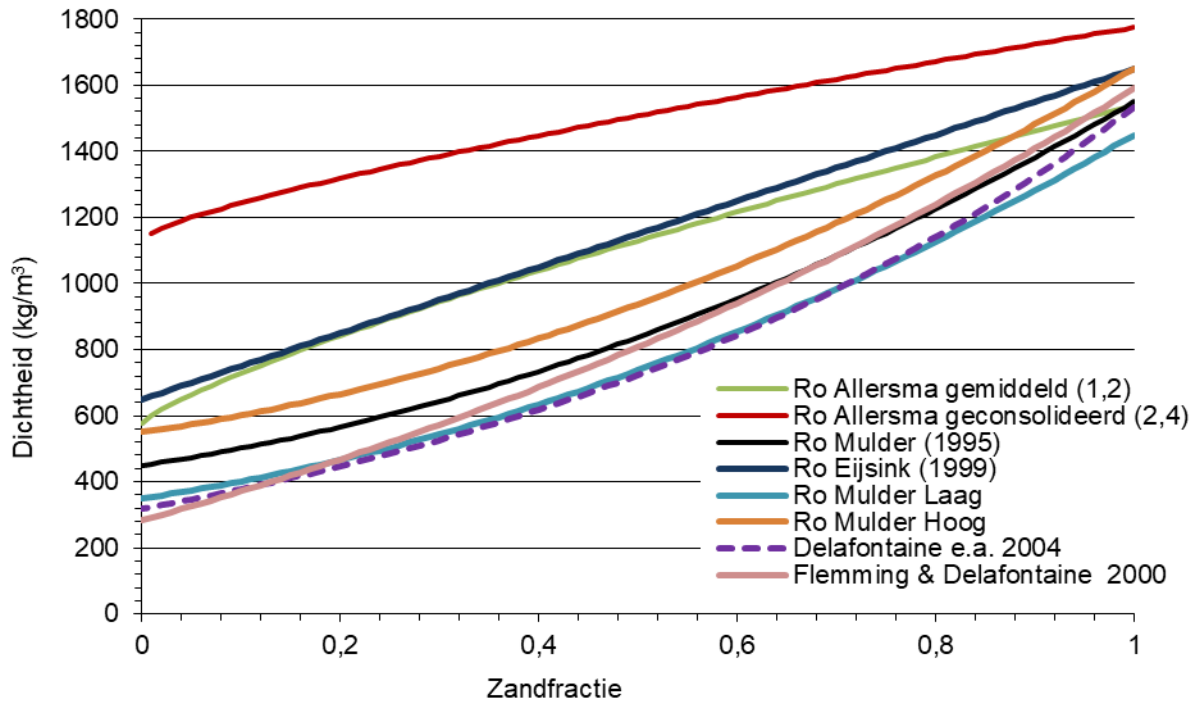


Figuur 4-2 Relatie tussen het gewichtspercentage slib en het volumepercentage slib, volgens de relatie voor droge dichtheid van Mulder (1995).

Voor het omrekenen van gewichtspercentages slib naar volumepercentages slib, wordt gebruikgemaakt van het slibgehalte op basis van alle deeltjes kleiner dan $63\mu\text{m}$. Dat betekent dat ook lutumgehaltenes (deeltjes kleiner dan $2\mu\text{m}$, of de slibgehaltenes kleiner dan $16\mu\text{m}$ omgerekend dienen te worden naar de fracties kleiner dan $63\mu\text{m}$. Hiervoor wordt een factor gehanteerd van 1,673, die is gebaseerd op de waarden in de sedimentatlas (Arcadis, 2013).

Voor het berekenen van de droge dichtheid van een zand-slib mengsel zijn verschillende formules beschikbaar, waarvan een aantal grafisch is weergegeven in Figuur 4-3. Een belangrijke factor die leidt tot verschillende in de droge dichtheid is de consolidatie van het mengsel. De gebruikte formule van Mulder (1995) heeft betrekking op weinig geconsolideerd sediment. Het berekenen van de volumebijdrage is in sterke mate afhankelijk van de gebruikte formule van de droge dichtheid. Het verdient dan ook aanbeveling om voor de verschillende afzettingssmilieus met veel slib (kwelder, slibrijke wadplaten) de droge dichtheden

te bepalen van zowel het recent afgezette sediment, als van het oudere materiaal. Met dergelijke aanvullende gegevens kan met grotere nauwkeurigheid worden vastgesteld op welke volumebijdrage de slibsedimentatie levert.



Figuur 4-3 Verschillende relaties tussen de fractie zand in een zand-slib mengsel en de droge dichtheid (Allersma, 1988, Eijsink 1999 in Oost et al., 1999).

4.2 Slib in de deelgebieden

In Tabel 4-2 is een overzicht opgenomen met de ondergrens en de bovengrens van de slibpercentages in de verschillende deelgebieden en de bronnen die daarvoor zijn gehanteerd.

Tabel 4-2 Ondergrens en bovengrens van de slibpercentages in de deelgebieden.

	Informatie/gegevens	Volumepercentage slib (%)	
		Ondergrens	Bovengrens
Marsdiep			
De Hors	Deskundigenoordeel	0,0%	2,5%
Mokbaai	Baptist et al., 2012; Deskundigenoordeel	20,0%	45,0%
Vlakte van de Kerken	Esselink et al., 2017	5,0%	15,0%
Balgzand	Sedimentatlas, SIBES	20%	40%
Eierlandse gat			
Vliehors	Deskundigenoordeel	2,5%	5%
Vlie			

	Informatie/gegevens	Volumepercentage slib (%)	
Vastelandskust	Sedimentatlas, SIBES	60,0%	75,0%
Vlieland Oost	Sedimentatlas, SIBES	5,0%	15,0%
West Terschelling, Noordvaarder, Dellewal	Deskundigenoordeel	5,0%	20,0%
Oost Terschelling Strip, Boschplaat	Wadplaat: Sedimentatlas, SIBES Kwelder: de Groot, 2009	40,0%	75,0%
Borndiep			
Oost Terschelling Boschplaat	De Groot, 2009	60,0%	75,0%
Ameland Ballumerbocht -Nieuwlandsreid	Elschot et al., 2017	60,0%	75,0%
Vastelands Kwelder Noarderleech	Hoekstra et al., 1998	66,7%	90,0%
Pinkegat-Friesche Zeegat			
Ameland De Hon	Elschot et al., 2017	60,0%	75,0%
Vastelandskwelder 't Skoar, Wierum, Paesens	Hoekstra et al., 1998	60,0%	75,0%
Schiermonnikoog Het Rif en Oosterkwelder	Deskundigenoordeel Kwelder: de Groot, 2009	25,0%	75,0%
Eilanderbalg- Lauwers-Schild Eems-Dollard			
Schiermonnikoog-Oost	de Groot, 2009	60,0%	75,0%
Groningerwad	Hoekstra et al., 1998	66,7%	90,0%
Eems-Dollard			
Dollard	Esselink et al., 2012	66,7%	90,0%

4.3 Slibvolumes

De volumepercentages slib in Tabel 4-2 zijn vermenigvuldigd met de sedimentatievolumes in Tabel 3-2, waarbij de ondergrenzen en de bovengrenzen onderling zijn vermenigvuldigd, om zo een hoge en lage bijdrage te berekenen. De resultaten van deze berekeningen zijn opgenomen in Tabel 4-3. De bandbreedte in de berekende slibsedimentatie in de deelgebieden is 0,39 tot 1,17 Mm³ per jaar.

Tabel 4-3 Berekende sedimentatievolumes van slib in de verschillende deelgebieden.

	Slibsedimentatie (m ³)	
	Laag	Hoog
Marsdiep		
De Hors	0	111
Mokbaai	809	5.459
Vlakte van de Kerken	0	701
Balgzand	1.091	5.453
Eierlandse gat		
Vliehors	1.009	12.103
Vlie		
Vastelandskust	9.508	23.770
Vlieland Oost	-240	719
West Terschelling, Noordvaarder, Dellewal	1.730	13.839
Oost Terschelling Strip, Boschplaat	16.665	93.739
Borndiep		
Oost Terschelling Boschplaat	55.147	137.869
Ameland Ballumerbocht -Nieuwlandsreid	7.079	44.242
Vastelands Kwelder Noorderleech	216.790	585.332
Pinkegat-Friesche Zeegat		
Ameland De Hon	5.012	31.327
Vastelandskwelder 't Skoar, Wierum, Paesens	20.432	63.850
Schiermonnikoog Het Rif en Oosterkwelder	2.777	41.649
Eilanderbalg- Lauwers-Schild Eems-Dollard		
Schiermonnikoog-Oost	1.859	11.621
Groningerwad	15.549	38.483
Eems-Dollard		
Dollard	34.078	61.340

	Slibsedimentatie (m ³)	
Totaal	389.294	1.171.607

5 DISCUSSIE, CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

5.1 De bijdrage van de deelgebieden aan de sedimentatie in de Waddenzee

De bandbreedte in de berekende slibsedimentatie in de delen van de kombergingsgebieden in de Waddenzee missen bij de klassiek vaklodingsgrenzen is 0,39 tot 1,17 Mm³ per jaar. Van de sedimentatie in deze deelgebieden vormt het slib een substantieel deel en dat heeft te maken met de hoge slibpercentages in een belangrijk deel van deze gebieden. Voor de sedimentatie van slib binnen de kuberingsgebieden worden, afhankelijk van de deelgebieden, volumepercentages van 25% (westelijke Waddenzee – Arcadis, 2017) tot 10% (oostelijke Waddenzee – Oost et al., 1998) gehanteerd. Deze percentages in combinatie met de jaarlijkse sedimentatievolumes in de kuberingsgebieden in paragraaf 3.3, laten zien dat de slibsedimentatie in de deelgebieden een belangrijk deel van de slibsedimentatie in de Waddenzee omvat. Bij het bepalen van de mogelijke slibsedimentatie in de Waddenzee en variatie die in de tijd optreedt in de slibsedimentatie kunnen deze gebieden niet buiten beschouwing blijven.

Hoe verhouden deze getallen zich tot de getallen uit eerdere studies? Op voorhand dient daar bij vermeld te worden dat de slibsedimentatie in andere studies vrijwel altijd in tonnen droge stoffen wordt gerapporteerd, zodat een directe vergelijking niet mogelijk is. Verder is niet in alle studies duidelijk vermeld op welke gebieden getallen betrekking hebben en op welke gegevens het is gebaseerd.

In Van Duren & Van der Valk (2010) is de geschatte omvang van de sinks voor slib in het Nederlandse deel van de Waddenzee opgenomen¹: Totaal in buitendijkse delen Waddenzee inclusief kwelders, maar exclusief deel Eems-Dollard 1.800-2.850 * 10⁶ m³, waarvan in buitendijkse zanden 1.000-1.650*10⁶ m³. Deze getallen tonen het belang van de kwelders en slibrijke delen voor de berging van slib, die ruwweg 55% van het slib bevatten. Voor een vergelijking met de jaarlijkse sedimentatie lenen deze getallen van de sinks zich niet.

Salden en Mulder (1996) geven een uitgebreid overzicht van de verschillende bronnen voor de omvang van de slibsedimentatie en komen op basis daarvan tot een meest waarschijnlijke sedimentatie van slib van 2 tot 2,5 Mton/jaar, met een totale bandbreedte van 1 tot 3,5 Mton/jaar. Daarbij laten Salden en Mulder (1996) ook zien op welke gegevens de schattingen zijn gebaseerd. Zo geeft Eysink (1979) getallen van 2,5 à 3 x 10 m³ ton/jaar, met daarbij de opmerking dat het slib '*zich voornamelijk in de kuststrook afzet*' (waarmee de vastelandskust van de Waddenzee wordt bedoeld), op basis van de historische waarnemingen aan de opslibbing en inpolderingen over een periode van 600 jaar. Salden en Mulder (1996) gebruiken de getallen uit Louters en Gerritsen (1994), van de netto sedimentatie in de Waddenzee van 10,6 x 10⁶ m³ en 70-80% slib, om de slibsedimentatie om een jaarlijkse slibsedimentatie van circa 2,5 10⁶ ton te berekenen. In Louters en Gerritsen (1994) wordt voor de sedimentatievraag vanwege opslibbing in de *randzones en kwelders* een jaarlijks sedimentatievolume van 0 tot 9 x 10⁶ m³ genoemd. Dit grote volume betreft slechts in beperkte mate de sedimentatie door opslibbing in de randzones en kwelders zelf, maar wordt vooral bepaald door de verkleining van de kombergingsgebieden door de groei van de kwelders en de resulterende sedimentatie in de kombergingsgebieden.

Al met al passen de berekende getallen voor sedimentatie van slib in de deelgebieden binnen de bandbreedte van de eerder bepaalde getallen voor de jaarlijkse slibsedimentatie. En de waarnemingen het belang van de randgebieden van de Waddenzee voor de slibsedimentatie sluiten aan de bij observaties van andere onderzoekers. Een vergelijkbare analyse, die is gericht op het vaststellen van de omvang van de (slib)sedimentatie in de randzones en kwelders is niet aangetroffen.

¹ Hierbij wordt verwezen naar Oost, 2009, maar deze referentie is niet in het document opgenomen.

5.2 Het belang van de verschillende deelgebieden voor slibsedimentatie

De berekeningen van de bijdrage van slib aan het sedimentatievolume in de deelgebieden buiten de kuberingsgebieden, zijn gebaseerd op een hoop aannames over de sedimentatiesnelheden en de slibpercentages. De getallen voor de slibsedimentatie worden daarom met een grote bandbreedte gepresenteerd. Het verkleinen van die bandbreedte is gewenst, om meer grip te krijgen op de werkelijke omvang van de slibsedimentatie. Daarvoor is het niet nodig om alle deelgebieden in detail te onderzoeken. Drie van de deelgebieden blijken namelijk ongeveer 70% van de totale berekende slibsedimentatie voor hun rekening te nemen, zoals blijkt uit Tabel 5-1. Deze drie gebieden zijn de vastelandskwelder Noarderleech, Oost Terschelling Boschplaat en Vastelandskwelder 't Skoar, Wierum, Paesens, waarbij het eerste gebied domineert.

Tabel 5-1 Relatieve bijdrage per deelgebieden aan de totale sedimentatie van slib in de deelgebieden.

	Haag in tabel 4-3	Hoog in tabel 4-3
De Hors	0,0%	0,0%
Mokbaai	0,2%	0,5%
Vlakte van de Kerken	0,0%	0,1%
Balgzand	0,3%	0,5%
Vliehors	0,3%	1,0%
Vastelandskust	2,4%	2,0%
Vlieland Oost	-0,1%	0,1%
West Terschelling, Noordvaarder, Dellewal	0,4%	1,2%
Oost Terschelling Strip, Boschplaat	4,3%	8,0%
Oost Terschelling Boschplaat	14,2%	11,8%
Ameland Ballumerbocht -Nieuwlandsreid	1,8%	3,8%
Vastelandskwelder Noarderleech	55,7%	50,0%
Ameland De Hon	1,3%	2,7%
Vastelandskwelder 't Skoar, Wierum, Paesens	5,2%	5,4%
Schiermonnikoog Het Rif en Oosterkwelder	0,7%	3,6%
Schiermonnikoog-Oost	0,5%	1,0%
Groningerwad	4,0%	3,3%
Dollard	8,8%	5,2%

Om meer inzicht te krijgen in de daadwerkelijk omvang van de slibsedimentatie is het daarom zinvol om te kijken naar de drie genoemde gebieden, om te beginnen met de Vastelandskwelder Noarderleech.

5.3 Variatie in de tijd van de slibsedimentatie in de vastelandskwelder Noarderleech

De vastelandskwelder Noarderleech is op basis van de analyse in dit rapport het belangrijkste gebied waar vastlegging van slib plaatsvindt, buiten de kuberingsgebieden. De ontwikkelingen in dit gebied zijn intensief gemonitord en gerapporteerd vanaf 1960, zodat meer inzicht kan worden gekregen in de omvang van deze slibsink en de variatie die in de tijd is opgetreden. Naast de metingen, die duidelijke kwantitatieve gegevens omvatten, zijn voor de periode voor 1960 indirecte aanwijzingen beschikbaar over variaties in de omvang van de aanslibbing. Voordat wordt ingegaan op de kwantitatieve informatie wordt kort stilgestaan bij de kwalitatieve aanwijzingen.

5.3.1 Van bedijkingsgeschiedenis naar landaanwinningswerken naar kwelderwerken

De informatie beschikbaar over de aanslibbing op langere tijdschalen is in indirecte zin beschikbaar, in de vorm van de bedijkingsgeschiedenis (Figuur 5-1). Bedijking kon in het verleden (voor de mechanisatie van de dijkenbouw rond het begin van de 20^e eeuw) alleen plaatsvinden als de kwelders voldoende hoog waren opgeslibd. Naast de opslibbing speelde ook andere maatschappelijke factoren (zoals de economie, het recht rond landaanwinning en onrust/oorlog) een rol bij de bedijking, zodat een kaart van de bedijking niet één op één worden gelezen als opslibbinggeschiedenis. Uit de kaart van de bedijking en landaanwinning volgt dat grote oppervlaktes land zijn bedijkt over een lange periode. Ook blijkt dat de grens die tegenwoordig wordt gevormd door de Waddenzeedijk al een relatief oude is. De zomerpolders in Noorderleech dateren van 1897, 1892 en 1921 en hebben waarschijnlijk slechts een beperkte bijdrage gespeeld aan de sedimentatie die in de 20^{ste} eeuw heeft plaatsgevonden in het gebied.



Figuur 5-1 Overzichtskartaal van de bedijkings- en landaanwinningsgeschiedenis van de voormalige Middellzee, in het verlengde van het kombergingsgebied van het Borndiep (Van der Spek, 1995, over Google Earth image).

Het huidige gebied waar de slibsedimentatie plaatsvindt wordt in hoge mate gedomineerd door de aanwezigheid van de kwelderwerken. Het rechthoekige patroon van rijshoutendammen en tussenliggende greppels en geulen was in eerste instantie gericht op de landaanwinning en later ook op de bescherming tegen overstromingen en weer later op het behoud van natuurwaarden. Om inzicht te hebben in de mogelijke variatie in de opslibbing in de kwelderwerken is enig inzicht in de geschiedenis ervan zinvol, zeker omdat voor 1960 geen structurele gegevens beschikbaar zijn van de opslibbing.

Oorspronkelijk werd de kwelderaanwas gestimuleerd door greppels te graven, een vorm van landaanwinning, die bekend is komen te staan als de “boerenmethode” (Hoekstra et al, 1998; van Duin et al., 2016). Deze methode was succesvol tot het begin van de 20^e eeuw (slechter na circa 1900 in Hoekstra et al, 1998 en behoorlijke resultaten tot omstreeks 1925 in van Duin et al., 2016). In plaats van aanwas kwam zelfs afslag van kwelders voor. In 1928 werd gestart met landaanwinning door de Staat, volgens de ‘boerenmethode’, maar dit leverde slechts beperkte opslibbing. In 1935 werd door het Rijk gestart met een aangepaste vorm van een Duits systeem, dat bekend is geworden als de Sleeswijk-Holstein-methode. Bij deze methode worden golfbrekers aangebracht, in de vorm van rijshouten dammen, die bezinkvelden vormen. In de bezinkvelden is minder golfslag en kan nauwelijks stroming evenwijdig aan de kust optreden. Binnen de bezinkvelden worden geulen en greppels aangelegd en onderhouden.

In de loop van de tijd zijn verschillende wijzigingen doorgevoerd in de Sleeswijk-Holsteinmethode, die waarschijnlijk gevolgen hebben gehad voor de omvang van de slibsedimentatie;

Volgens (Hoekstra et al. 1998):

- Vanaf 1935 aanleg twee bezinkvelden, aanleg greppels bij spontane vestiging vegetatie
- 1940-1945 beperkt onderhoud dammen en begreppeling
- Na 1945 aanleg twee of drie bezinkvelden
- Jaren '50 en '60: jaarlijkse of tweejaarlijkse begreppeling;
- Na 1968: geen grondwerk buitenste bezinkvak;
- Na 1981: geen grondwerk in begroeide gedeelten middelste bezinkvak;

Volgens Dijkema et al. (2016):

- Na 1989:
 - Voorkomen achterloopsheid van dammen door herstel verbinding kwelder en dam
 - Aanleg tussendammen in de pionierzone;
 - Stoppen onderhoud buitenste bezinkvelden;
 - Betere kwaliteit dammen.
- Na wijziging doelstelling naar vergroten natuurlijkheid in jaren '80 vorige eeuw vermindering grondwerk;
- Na 2000 grondwerk beperkt tot werk aan aansluiting dammen; geen begreppeling meer;
- Na 2006 einde onderhoud westelijke deel Friesland buitendijks, van Zwarte tot Nieuwe Bildtzijl, vanwege extreem snelle opslibbing;

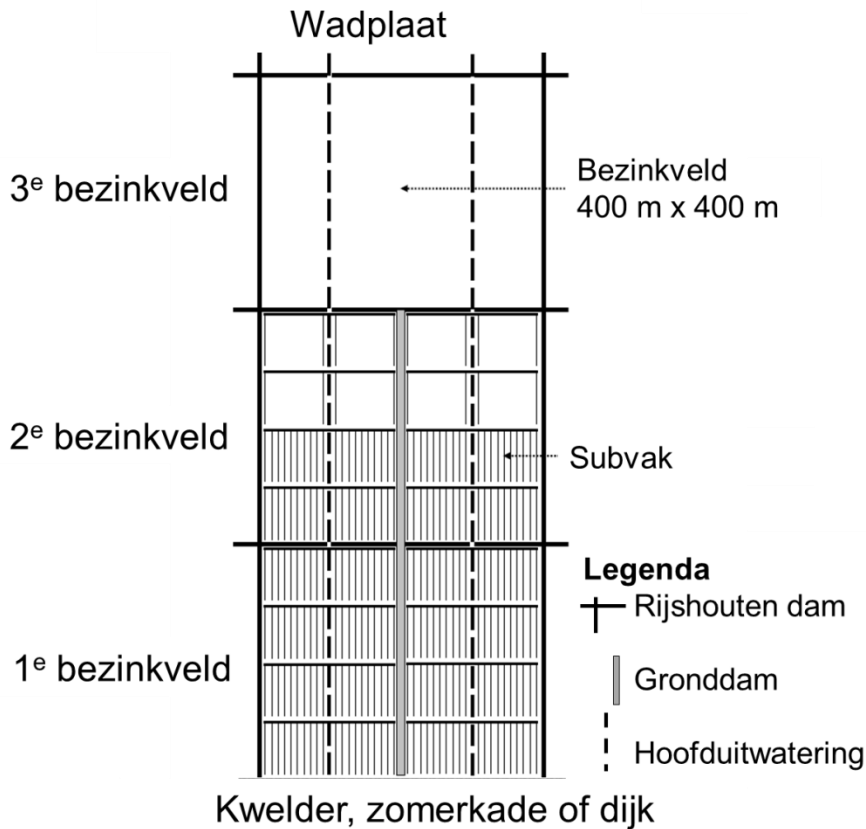
Ook hebben er nog wijzigingen plaatsgevonden in de onderhoudscontracten voor de rijshoutendammen, die mogelijk gevolgen hebben voor de condities in de bezinkvakken.

Samenvattend kan worden gesteld dat in de loop van de tijd veel veranderingen hebben plaatsgevonden in de kwelderwerken, waarvan een aantal zeker gevolgen heeft gehad voor de opgetreden slibsedimentatie.

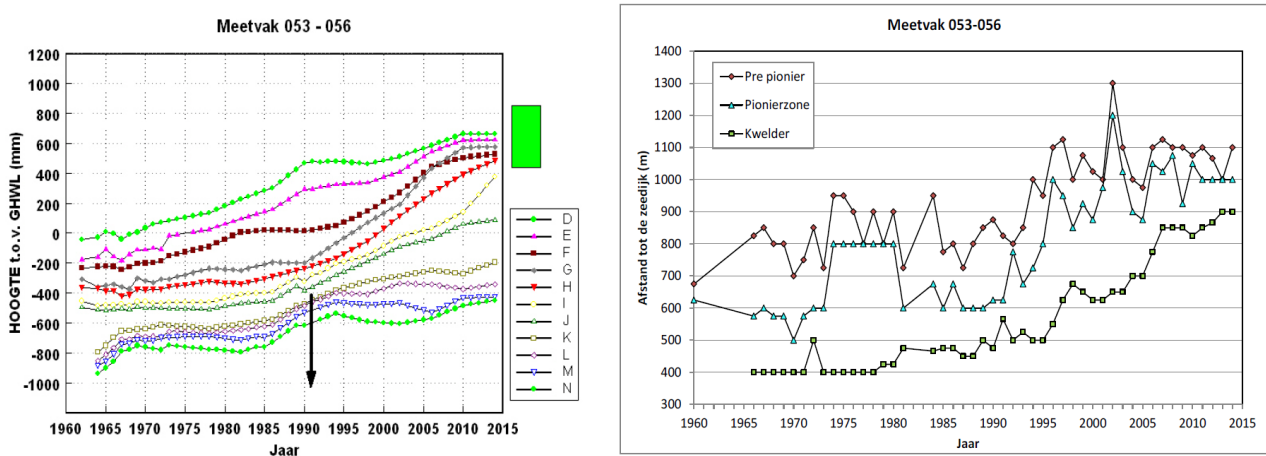
5.3.2 Waargenomen sedimentatie

Verschillende bronnen geven inzicht in de verschillen in de sedimentatiesnelheden die zijn opgetreden in de kwelders, waarvan de belangrijkste zijn van Duin et al.(2016) en Hoekstra et al. (1998). In van Duin et al. (2016) geeft het meest actuele overzicht van de hoogtemetingen, sedimentatiesnelheden en oppervlaktebepalingen in de kwelderwerken van Friesland (en Groningen). De gegevens in Hoekstra et al. (1998) zijn vanzelfsprekend minder actueel, maar bevatten gegevens over de veranderingen in het slibgehalte (of eigenlijk: lutumgehalte). Voordat nader wordt ingegaan op de gegevens is het belangrijk om de terminologie van de kwelderwerken te introduceren, omdat deze wordt gehanteerd bij de opgave van de gegevens. Figuur 5-2 geeft een overzicht van de drie bezinkvakken, waarbij het 3^e bezinkvak aan de zijde van de Waddenzee ligt en het 1^e bezinkvak aan de vastelandzijde. In het verleden is ook nog sprake geweest van een 4^e bezinkvak. Bij de 3^e en 2^e vakken wordt ook nog een onderscheid gemaakt naar de onbegroeide delen (*onbegroeid* of *kaal*) en de begroeide delen (*begroeid*, *pionier*, *kwelder*). Bij succesvolle kwelderaanwas werd in de loop van de tijd een nieuw bezinkvak. Daarnaast worden de termen *kwelder*, *pionierzone* en *pre-pionierzone* gebruikt om de arealen met de verschillende soorten kweldervegetatie en verschillende mate van vegetatiebedekking aan te duiden.

De gegevens van de kwelderhoogte- en de arealen zijn zeer gedetailleerd en uitgebreid, zoals is geïllustreerd in Figuur 5-3. Hierbij moet worden opgemerkt dat de hoogtegegevens voor de linker grafiek al zijn omgezet naar de hoogtes ten opzichte van hoogwater. Deze informatie is te gedetailleerd voor het voorliggende rapport. Het geeft wel inzicht in de mogelijkheden die deze gegevens bieden voor meer gedetailleerde analyse (en het geeft een idee van de niet geringe omvang van de werkzaamheden die daarvoor nodig zijn).

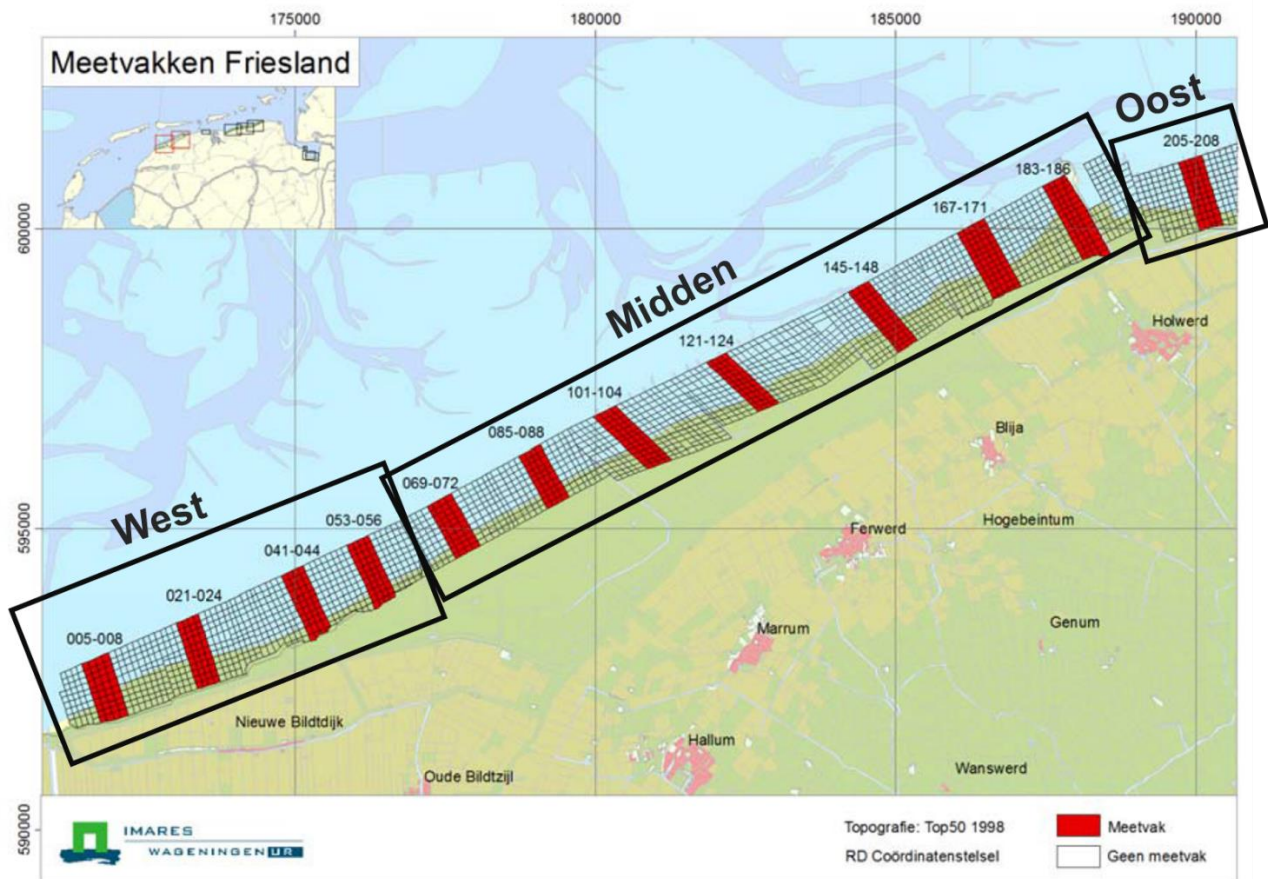


Figuur 5-2 Overzicht van de verschillende bezinkvelden van de kwelderwerken (naar Van Duin et al., 2016).



Figuur 5-3 Grafieken met links de hoogteverandering ten opzichte van het niveau gemiddelde hoogwater en rechts de afstand tot de zeedijk van de betreffende zone, voor meetvak 053-056 aan de westzijde van de Friese kwelderwerken (zie voor de locatie Figuur 5-4, figuur uit Van Duin et al., 2016).

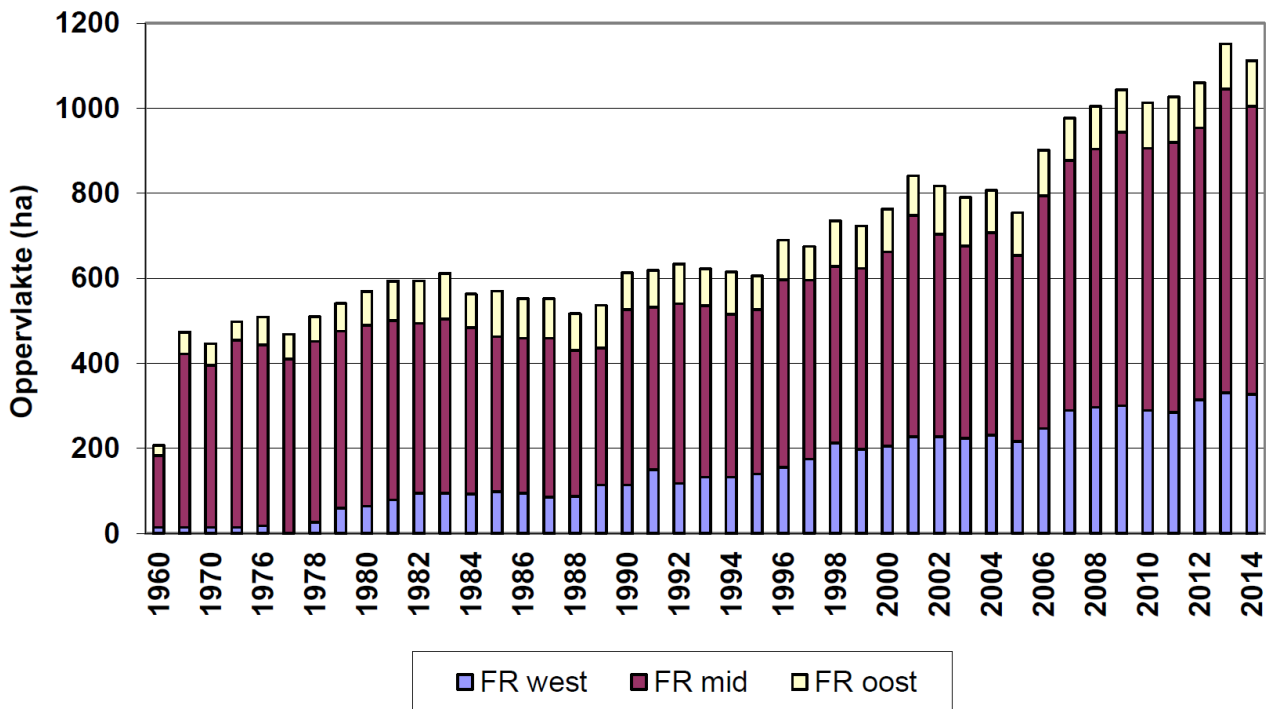
Voor de discussie wordt verder gebruik gemaakt van de geaggregeerde gegevens, waarbij de ontwikkelingen op het niveau van deelgebieden west, midden en oost zijn weergegeven. Zie Figuur 5-4 voor de indeling van deze gebieden.



Figuur 5-4 Gebiedsindeling en meetvakken in de Friese kwelderwerken (naar van Duin et al., 2016).

Areaal van de kwelder

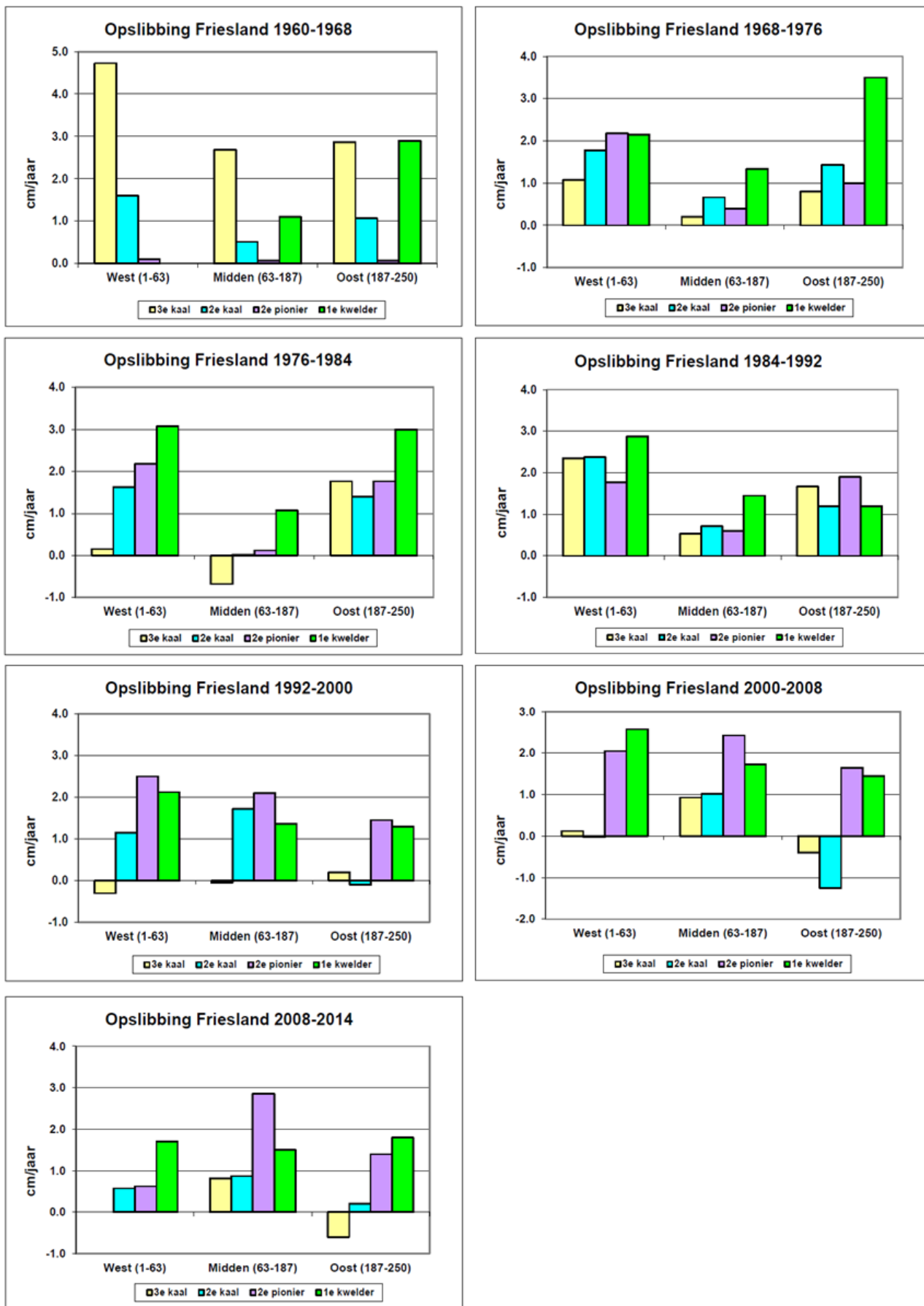
De arealen van de kwelder, de pionier en de pre-pionierzone van de Friese kwelder zijn sinds 1960 gekarteerd. Van deze drie zones is alleen de grafiek met de ontwikkeling van het kwelderareaal uit van Duin et al. (2016) opgenomen, in Figuur 5-5. In deze grafiek is zichtbaar dat de grote lijn in de ontwikkeling van het areaal kwelders een toename is, van iets meer dan 200 ha in 1960 tot meer dan 1000 ha in 2014. Deze toename is niet gelijkmatig verlopen, er is sprake van periodes met een toename van het areaal, gevolgd door periodes met een afname. Omdat het aantal jaren dat sprake is van een toename groter is dan het aantal jaren dat sprake is van een afname en omdat de omvang van de toename gemiddeld groter is dan de omvang van de afname, is sprake van een overall toename van het areaal. De oppervlaktes van de pionierzone en de pre-pionierzone zijn kleiner dan die van de kwelders en de omvang schommelt meer (van Duin et al., 2016).



Figuur 5-5 Areaal van de kwelder bij de Friese kwelderwerken.

Sedimentatiesnelheid

Figuur 5-6 toont de gemeten sedimentatiesnelheden in de Friese kwelderwerken voor zeven periodes binnen het tijdsbestek van 1960 tot en met 2014. Uit de grafieken blijkt zowel dat de opslibbingsnelheden voor de vier zones onderling verschillen, als dat de opslibbingsnelheden in de drie deelgebieden verschillen en dat deze ook nog eens in de tijd verschillen. De waargenomen verschillen in de tijd blijken sterk samen te hangen met de verschillen in het beheer, zo worden de hoge opslibbingsnelheden in de periode 1960-1968 in het 3^e bezinkvak verklaard door het intensieve beheer (onder ander greppelen). Incidenteel treden zelfs afnames van de maaiveldhoogte, die leiden tot de negatieve waarden voor de onbegroeide delen van de kwelders. In Tabel 5-2 zijn de gemiddelde sedimentatiesnelheden voor drie bezinkvakken van de totale Friese kwelders van de laatste drie periode uit Figuur 5-6 opgenomen. Ook hieruit blijken de grote verschillen die optreden in de loop van de tijd en tussen de verschillende zones.



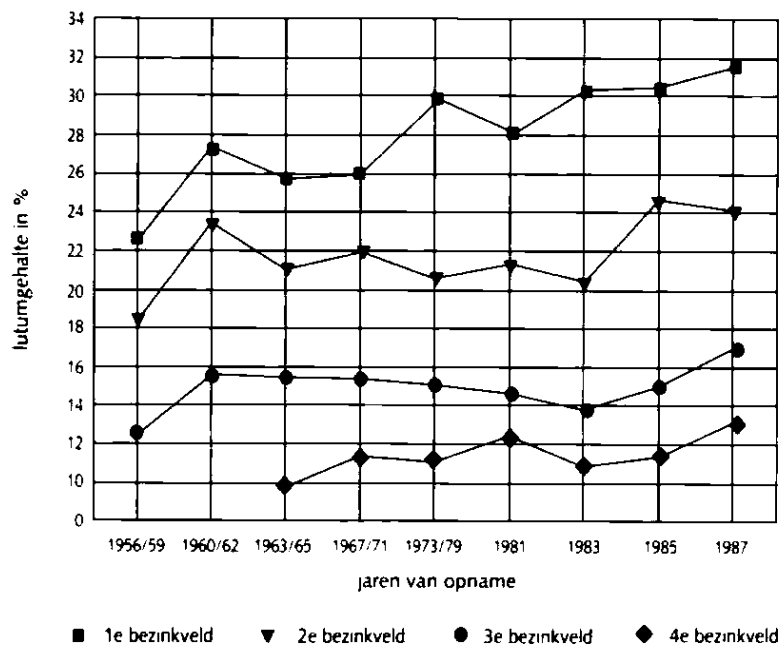
Figuur 5-6 Gemiddelde opslibbing in de Friese kwelderwerken, per bezinkveld in de onbegroeide-, pionier- en kwelderzone. Let op de waarden bij de y-assen, deze verschillen (uit Van Duin et al., 2016).

Tabel 5-2 Gemiddelde sedimentatiesnelheid in cm/jaar voor de Friese en Groningermeetvakken, per zone over drie tijdvakken in de periode 1992-214 (uit van Duin et al., 2016, waarin ook de achtergrondinformatie over de toegepaste meettechnieken en de verwerking van de data).

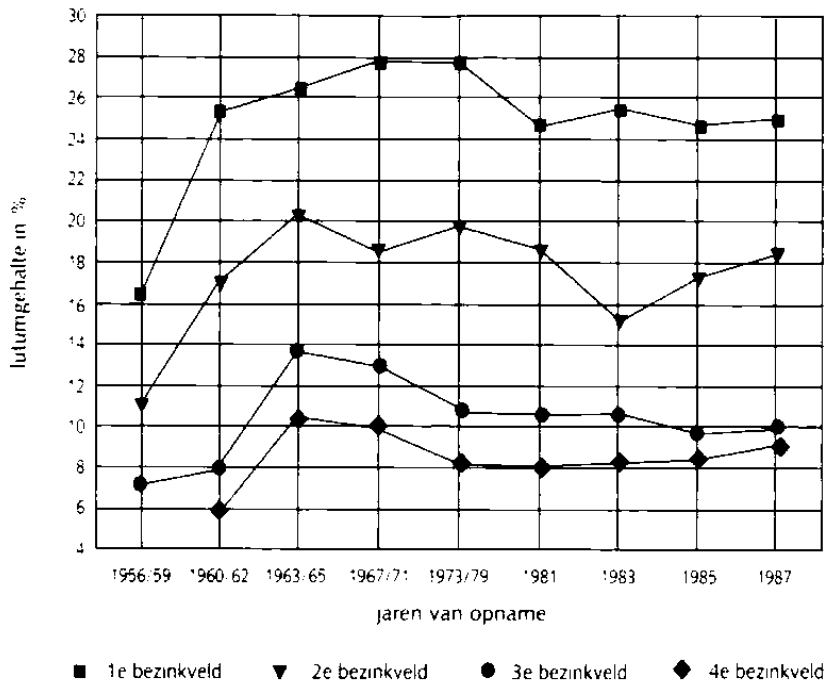
Friese meetvakken	3 ^e bezinkveld onbegroeid	2 ^e bezinkveld onbegroeid	2 ^e bezinkveld pionierzone	1 ^e bezinkveld kwelderzone
1992-2000	-0.1	1.2	2.1	1.6
2000-2008	0.6	0.6	2.2	1.9
2008-2014	0.4	0.7	2.0	1.6

Slibgehalte

In Hoekstra et al. (1998) zijn verschillende grafieken opgenomen met de ontwikkeling van het gemiddelde lutumgehalte in de verschillende meetvakken in de periode 1956/1960 tot en met 1987, waarvan twee voorbeelden zijn opgenomen in Figuur 5-7 en Figuur 5-8. In beide grafieken is zichtbaar dat de lutumgehalten van de vier bezinkvakken verschillen, met de hoogste lutumgehalten in de kwelders richting het vasteland (1^e bezinkveld) en de laagste waarden in het bezinkveld bij de Waddenzee (4^e bezinkveld). De verschillen zijn aanzienlijk, met waarden rond de 10% en 8% voor de 4^e bezinkvelden en waarden oplopend tot boven de 30% voor het 1^e bezinkvak. De eerste grafiek (Figuur 5-7) laat een toename zien van de slibgehalten van de kwelder (1^e bezinkvak), van waarden rond 22% naar waarden tegen de 32%, waarbij van opname op opname wel sprake is van schommelingen. De andere vakken laten geen overtuigende trends zien, hoewel de lutumgehalten van de laatste opname steeds hoger zijn dan de waarden van de eerste opnames. De tweede grafiek (Figuur 5-8) laat eerst een snelle toename zien, gevolgd door een afname. De andere grafieken die zijn opgenomen in Hoekstra e.a. (1998) laten wel allemaal de grote verschillen tussen de bezinkvakken zien, maar tonen steeds verschillende ontwikkelingen in de tijd. Het is niet mogelijk om aan deze waarnemingen een conclusies te verbinden over ontwikkelingen in de tijd. Wel kan worden geconstateerd dat de slibgehalten in de tijd varieerden.



Figuur 5-7 Grafiek met het gemiddelde lutumgehalte van meetvakken 53 t/m 56 (locatie in Figuur 5-4) uit Hoekstra et al. (1998).



Figuur 5-8 Grafiek met het gemiddelde lutumgehalte van meetvakken 85 t/m 88 (locatie in Figuur 5-4) uit Hoekstra et al. (1998).

Synthese

De waarnemingen aan de arealen, de sedimentatiesnelheden en de slijbgehalten laten zowel trendmatige veranderingen zien, als fluctuaties in de tijd. Zowel de trendmatige ontwikkelingen als de variaties in de tijd zijn te relateren aan de afzettingsmilieus op de kwelders, in de pionierzones en op de voorliggende platen, zeker als rekening wordt gehouden met de invloed van menselijke ingrepen (aanleg en onderhoud van rijshouten dammetjes, aanleg en onderhoud van geulen en greppels) op de afzettingsomstandigheden. Het is echter niet mogelijk om de waarnemingen op een eenvoudige wijze om te rekenen naar waarden voor de sedimentatie en meer specifiek de slijb sedimentatie in de loop van de tijd. De informatie over de slijbgehalten is niet gemiddeld voor het gehele gebied beschikbaar en dekt slechts een beperkt deel van de tijd. De ontwikkeling van de arealen van de kwelder, pionierzone en pre-pionierzone is opgegeven in hectares (Figuur 5-5). De sedimentatiesnelheden zijn opgegeven voor het 1^e, 2^e en 3^e bezinkveld (Figuur 5-6). Het is niet duidelijk of de gegevens van de sedimentatiesnelheid voor het 1^e bezinkveld van toepassing zijn op het totale kwelderareaal. Een gesprek met Van Duin kan hier uitsluitend over geven.

Dronkers (2005) heeft geprobeerd de veranderingen in het areaal van de kwelder te koppelen aan waargenomen variaties in de SPM-gehalten in de Waddenzee. Dat leverde geen bevredigend resultaat op. Mogelijk biedt het toevoegen van de sedimentatiesnelheid in de kwelders en variaties in de slijbgehalten wel een mogelijkheid om (een deel van) de variaties te verklaren.

5.4 Kennisleemtes & aanbevolen kennisontwikkeling

De analyses in de voorliggende studie zijn uitgevoerd op hoofdlijnen, om inzicht te geven in het belang van de deelgebieden buiten de kombergingsgebieden voor de slijb sedimentatie in het Waddengebied. Dit levert een veelvoud aan kennisleemtes en aanbevelingen voor kennisontwikkeling. In deze paragraaf volgen we de opbouw van het rapport, van oppervlaktes, via sedimentatiesnelheden naar slijb sedimentatie.

De oppervlaktes van deze gebieden zijn met grote nauwkeurigheid bepaald en hierbij is geen sprake van kennisleemtes of aanbevelingen voor de kennisontwikkeling. Het is wel zinvol om in de gaten te houden of nog gebieden worden verbonden met de Waddenzee, bijvoorbeeld door projecten voor kwelderherstel. In dergelijke gebieden zal bij succesvol herstel (slijb) sedimentatie gaan plaatsvinden.

Sedimentatiesnelheden zijn lastiger te bepalen, ook voor de gebieden waarvan veel gegevens beschikbaar zijn. De gehanteerde bandbreedtes zijn derhalve ruim. Het is zinvol om voor een of meerdere gebieden met de beschikbare gegevens berekeningen uit te voeren naar de gemiddelde sedimentatiesnelheden en/of bij gebieden met zeer verschillende karakteristieken (kwelder en voorliggende wadplaat) en verschillende gegevensbronnen de gemiddelde sedimentatiesnelheden per deel te berekenen. Dergelijke analyses worden bij voorkeur uitgevoerd voor gebieden waarvan op voorhand waarschijnlijk is dat deze een aanzienlijk bijdrage leveren aan de (slib)sedimentatie.

De slibgehalten zijn de minst onderbouwde gegevens die in deze analyse zijn gebruikt. Van een beperkt aantal gebieden zijn gegevens beschikbaar en die zijn over algemeen gedateerd. Van andere gebieden zijn wel beschrijvingen beschikbaar, maar is niet duidelijk waar de beschrijvingen op zijn gebaseerd. Verder is inzicht in de droge dichtheid van de zand-slibmengsels in verschillende afzettingmilieus en van verschillende ouderdommen zinvol voor gedegen berekeningen van de volumebijdrages van het slib. Aanvullende gegevens, op basis van op uniforme wijze verzamelde, bewerkte en geanalyseerde monsters zijn zeer gewenst. Het gaat dan om het vaststellen van de korrelgrootteverdelingen en droge dichtheden, in verschillende afzettingmilieus (hoge kwelder tot pionierszone, voorliggende wadplaten) en van verschillende ouderdommen (aan het oppervlakte en dieper in de ondergrond). Omdat dit type onderzoek zeer bewerkelijk is (veldwerk met handboren, laboratoriumanalyses), is het ook hierbij zinvol om gericht aan gebieden te werken waarvan het belang voor de slibsedimentatie op voorhand duidelijk is, zoals de Friese vastelandskwelder.

Op basis van de analyse in paragraaf 5.2 is het duidelijk dat een beperkt aantal gebieden een grote bijdrage levert aan de (slib)sedimentatie in deelgebieden. Gericht onderzoek, zoals hierboven omschreven, aan de Friese vastelandskwelder en de Boschplaat kan duidelijk maken hoe groot de sedimentatie van zand en slib in deze deelgebieden werkelijk is.

5.5 Conclusies

De deelgebieden die buiten de kuberingsgebieden liggen, omvatten een areaal van het Waddengebied dat niet buiten de berekeningen en beschouwingen kan blijven, vanwege de grote omvang van deze gebieden. Dit is zeker het geval voor de kombergingsgebieden Borndiep en Pinkegat-Friesche Zeegat, waar het areaal buiten de kombergingsgebieden meer dan 10% bedraagt.

De berekende in de sedimentatie in de deelgebieden die buiten de kuberingsgebieden liggen bedraagt 0,7 tot $1,7 \times 10^6$ m³ per jaar. Als de Eems-Dollard buiten de beschouwing wordt gelaten, dan gaat het om 0,6 tot $1,6 \times 10^6$ m³ per jaar. Dit is 12% tot 31% van de sedimentatie binnen de kuberingsgebieden. Deze omvang is significant te noemen en dusdanig groot dat de sedimentatie in de deelgebieden dient te worden betrokken in berekeningen van sedimentbudgetten en balansen van het Waddengebied.

Omdat de deelgebieden een aantal van de meest slibrijke sedimentatiegebieden van het Waddengebied omvatten, dienen deze gebieden zeker te worden beschouwd als het om de slibsedimentatie in het Waddengebied gaat. De berekende omvang van de slibsedimentatie in de deelgebieden bedraagt $390 - 1.170 \times 10^3$ m³ per jaar. Dit is een belangrijke bijdrage aan de totale slibsedimentatie in de Waddenzee, van 7 tot 26% van eerder bepaalde slibsedimentatiewaarden.

Van de 18 deelgebieden nemen vijf deelgebieden 80 tot 90% van de slibsedimentatie voor hun rekening. Deze deelgebieden zijn de Friese vastelandskwelder (Noarderleech), Oost-Terschelling en de Boschplaat, de Dollard en de vastelandskwelder en wadplaat bij't Skoar, Wierum en Paesens. Van deze vijf deelgebieden is de Friese vastelandskwelder het allerbelangrijkst, omdat deze 50 tot 55% van de slibsedimentatie voor zijn rekening neemt. De Friese vastelandskwelder heeft een groot oppervlakte, hoge sedimentatiesnelheden en een hoog slibpercentage en levert daarom een zeer grote bijdrage aan de sedimentatie van slib.

Metingen van de arealen, sedimentatiesnelheden en slibgehalten in de Friese vastelandskwelders laten zien dat hier zowel trendmatige veranderingen in optreden, als variaties in de tijd. Waarschijnlijk zijn de trendmatige veranderingen en de variaties om te rekenen naar variaties in de sedimentatievolume en de

slibsedimentatie. Met deze berekeningen is nog geen begin gemaakt, omdat hiervoor nog aanvullende kennis over de gegevens nodig is.

6 REFERENTIES

- Allersma, E., 1988. Morfologisch onderzoek Noordelijk Deltabekken. Morfologische modellering. Deel IV: samenstelling en dichtheid van sedimenten. Waterloopkundig Laboratorium, Z 71-03, september 1988.
- Arcadis, 2013. *Bijdrage slib aan de sedimentatie Waddenzee*. Arcadis rapport 076892814:A.
- Baptist, M., Smit, C., van Duin, W., & Treffers, S., 2014. *Kwelderontwikkeling van de Karhoek in de Mokbaai op Texel*. IMARES Wageningen UR.
- Beets, D. J., Roep, T. B. & De Jong, J., 1981. *Sedimentary sequences of the subrecent North Sea coast of the Western Netherlands near Alkmaar*. IAS Special Publication , 5, 133-145, International Association of Sedimentologists, Blackwell, Oxford.
- de Groot, Alma V., 2009. *Salt-marsh sediment; Natural γ -radioactivity and spatial patterns*. Proefschrift Universteit Groningen.
- De Groot, A.V., A. P. Oost, R. M. Veeneklaas, E. J. Lammerts, W. E. van Duin & B. K. van Wesenbeeck, 2017. *Tales of island tails: biogeomorphic development and management of barrier islands*. Journal of Coastal Conservation, Volume 21, pp 409-419.
- 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.
- Dijkema, K.S., W.E. van Duin, E.M. Dijkman, A. Nicolai, H. Jongerius, H. Keegstra & J.J. Jongsma, 2013. *Friese en Groninger kwelderwerken: Monitoring en beheer 1960-2010*. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu. WOt-rapport 122.
- Dronkers, J., 2005. *Natural and human impacts on sedimentation in the Wadden sea: an analysis of historical data*. RIKZ report.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., en De Ronde, J., 2012, *Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century*. Netherlands Journal of Geosciences, 91(03), 293-310.
- Elschot, K., A. de Groot, K. Dijkema, C. Sonneveld, J. van der Wal, P. de Vries, B. Brinkman, W. van Duin, W. Molenaar J, J. Krol., L. Kuiters, D. de Vries, R. Wegman, P. Slim, E. Koppenaar, J. de Vlas, J., 2017. *Ontwikkeling kwelder Ameland-Oost; Evaluatie bodemdalingsonderzoek 1986-2016*. Hoofdstuk 4 in rapport Monitoring effecten van bodemdaling op Oost-Ameland.
- Elschot, K., van der Wal, J., & Lagendijk, G., 2017. *Voorlopige analyse kwelderarealen Friese en Groninger kwelderwerken 2002-2014*.
- Esselink, P., Bos, D., Daniels, P., van Duin, W., & Veeneklaas, R., 2015. *Van polder naar kwelder, tien jaar kwelderherstel Noorderleech*.
- Esselink, P., Bos, D., Oost, A., Dijkema, K., Bakker, R., & de Jong, R., 2011. *Verkenning afslag Eems-Dollardkwelders*.
- Esselink, P., de Groot, A., Lofvers, E., Bakker, C., Temmink, R., van der Heide, T., & Terlouw, S., 2017. *Beheeradvies De Schorren, Texel*. Driebergen: VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren.
- Eysink, W.D. & E.J. Biegel, 1992. *Impact of sea-level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function – Investigations on empirical relations*. WL | Delft Hydraulics rapport H1300, ISOS*2 project phase 2.
- Eysink, W.D., 1979. Morfologie van de Waddenzee : gevolgen van zand- en schelpenwinning : verslag literatuuronderzoek. Rapport Waterloopkundig Laboratorium nr. R1336.

- 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.
- Herman, P. M.J., T. van Kessel, J. Vroom, P. Dankers, J. Cleveringa, B. de Vries, N. Villars Mud dynamics in the Wadden Sea, Towards a conceptual model. Deltares rapport 11202177-000-ZKS-0011.
- Hoeksema, H.J., Mulder, H.P.J., Rommel, M.C., De Ronde, J.G. & De Vlas, J., 2004. *Bodemdalingstudie Waddenzee 2004. Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd*. Rapport RIKZ/2004.025. Rijkswaterstaat.
- Hoekstra, H., Winkels, H., & Gerritsen, J., 1998. *De bodemopbouw van de buitendijkse gronden langs de noordkust van Friesland en Groningen*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directie IJsselmeergebied.
- Lagendijk, G., & Elschot, K., 2017. *Voorlopige resultaten SEB-analyse kwelderwerken 1994-2016*.
- Leendertse, P.C., A.J.M. Roozen & J. Rozema. 1997. Long-term changes (1953 – 1990) in the salt marsh vegetation at the Boschplaat on Terschelling in relation to sedimentation and flooding. Plant Ecology 132: 49–58.
- Louters, T. en F. Gerittsen, 1994. *Het mysterie van de Wadden; Hoe een getijdesysteem inspeelt op zeespiegelstijging*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) Rapport RIKZ-94.040.
- LTV V&T Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013. *Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde*. LTV V&T-rapport G-2
- 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.
- Nederhoff, K., B. Smits & Z. B. Wang. 2017. *KPP Wadden Data analyse: getij en morfologie*. Deltares rapport 11200521-000.
- 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, 1999. *Integrale bodemdalingstudie Waddenzee*, Nederlandse Aardolie Maatschappij, rapport.
- Oost, A.P., A.J.F. van der Spek, C. van Oeveren-Theeuwes & P.K. Tonnon (2018). The contribution of mud to the net yearly sediment volume in the Dutch Wadden Sea. A review based on literature. Deltares report 1220339-006.
- Rijkswaterstaat, 1998. *Sedimentatlas Waddenzee*. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, CD-ROM.
- Smits, B. & K. Nederhoff. 2018. Meso Schaal volumebalans Westelijke Waddenzee. Deltares rapport 11202177-000-ZKS-0007
- van Duin, W., Jongerius, H., Nicolai, A., Jongsma, J., Hendriks, A., & Sonneveld, C. (2016). *Fiese en Groninger Kwelderwerken: Monitoring en beheer 1960-2014*.
- Van Duin, W.E., Jongerius, H., Nicolai, A., Jongsma, J. J., Hendriks, A., & Sonneveld, C., 2016. *Friese en Groninger Kwelderwerken: monitoring en beheer 1960-2014*. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.
- van Duren, L. & B van der Valk. 2010. *Basisdocument werkconferentie Helder over Slib*. Deltares rapport 1203042-000.
- Vries, B., Dankers, P. en Vroom, J., 2018: Slib in de Waddenzee; een analyse en verklaring van de langjarige fluctuaties van sedimentconcentraties in water en bodem i.h.k.v. project KRW slib.

- Wesenbeeck, B.K. van, P. Esselink, A.P. Oost, W.E. van Duin, A.V. de Groot, R.M. Veeneklaas, T. Balke, P. van Geer, A.C. Calderon & A. Smale, 2014. *Verjonging van half-natuurlijke kwelders en schorren*. OBN Rapport nr. 2014/OBN196-DK, Driebergen.
- Wang, Z.B., E.P.L. Elias, A.J.F. van der Spek, Q.J. Lodder, 2018. *Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100*. Netherlands Journal of Geosciences Volume 97, pag. 183-214.
- Zwarts, L., Dubbeldam, W., van den Heuvel, H., van de Laar, E., Menke, U., Hazelhoff, L., & Smit, C. J., 2004. *Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee*. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

COLOFON

SLIBSEDIMENTATIE IN DE KWELDERS VAN DE WADDENZEE
BIJDRAGE AAN DE KWANTIFICERING VAN SINKS VOOR SLIB IN DE WADDENZEE I.H.K.V. PROJECT
KRW SLIB

KLANT

Rijkswaterstaat Noord-Nederland

AUTEUR

Jelmer Cleveringa

ONZE REFERENTIE

083755930 0.1

DATUM

14 december 2018

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com