

Monitoring effecten bodemdaling door gaswinning Ameland-oost



Monitoring effecten bodemdaling door gaswinning Ameland-oost

Auteur(s)

Zheng Wang

Johan Krol

Partners

Natuurcentrum Ameland

Monitoring effecten bodemdaling door gaswinning Ameland-oost

Opdrachtgever	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
Contactpersoon	Erwin Bruinewoud
Referenties	
Trefwoorden	Waddenzee, Gaswinning, Ameland, Bodemdaling, Morfologie, Monitoring




Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	19-03-2024
Projectnummer	11205488-002
Document ID	11205488-002-ZKS-0002
Pagina's	127
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Zheng Wang	
Johan Krol	

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Zheng Wang 	Edwin Elias 	b/a Jan Aart van Twillert 
	Johan Krol		

Samenvatting

De gaswinning op Ameland-oost is gestart in 1986. Sinds eind 1988 is er begonnen met de monitoring van de effecten van bodemdaling door deze gaswinning. De voorgaande vijf rapportages van de monitoring zijn gebaseerd op gegevens tot 1994, 1999, 2004, 2010, 2015 en beschrijven de effecten over een periode van respectievelijk 8 jaar, 13 jaar, 18 jaar, 24 jaar en 29 jaar na het begin van de gaswinning. Dit rapport is een onderdeel van de zesde rapportage sinds het begin van de monitoring van de effecten van de bodemdaling door de gaswinning op Ameland-oost. In dit rapport worden de resultaten van de studie naar morfologische ontwikkelingen en andere abiotische factoren gerapporteerd. De studie is uitgevoerd door Deltares in samenwerking Natuurcentrum Ameland (NCA) en bevat de volgende onderdelen:

- Grootschalig morfologische ontwikkeling rondom Ameland (Hoofdstuk 2, Deltares)
- Ontwikkeling van de Noordzeekust van Ameland en de kustsuppleties (Hoofdstuk 3, Deltares)
- Ontwikkeling van het Friesche Zeegat en de Hon (Hoofdstuk 4, Deltares)
- Ontwikkeling van het Waddenzeebekken Pinkegat (Hoofdstuk 5, Deltares)
- Wadplaatsedimentatie bij Ameland (Hoofdstuk 6, NCA)
- Ontwikkeling van de Engelsmanplaat (Hoofdstuk 7, Deltares)
- Morfologische ontwikkeling van de zeereep op Oost-Ameland (Hoofdstuk 8, NCA)
- Panoramafoto's Oost Ameland (Hoofdstuk 9, NCA)
- Overige relevante abiotische factoren (Hoofdstuk 10 Deltares)

Samenvattend zijn de volgende conclusies met betrekking tot effecten van de bodemdaling door gaswinning getrokken uit de huidige studie:

- Conform de voorgaande rapportages is er geen merkbare effect geconstateerd op de ontwikkelingen van de kustlijn, de oostpunt van Ameland, de geulen en platen in het Waddenzeebekken.
- Zoals in de vorige rapportage reeds geconstateerd is, is het werkelijke zandsuppletievolume voor het onderhoud van de Noordzeekust van Ameland hoger geweest dan in 1987 in het kustlijnmodel was uitgegaan, namelijk ongeveer 0,6 miljoen m³/jaar i.p.v. 0,2625 miljoen m³/jaar, mede als gevolg van bodemdaling door gaswinning. Dat is dus ongeveer twee keer zoveel. De kustsuppleties hebben ervoor gezorgd dat de bodemdaling geen effect op de ontwikkeling van de kustlijn heeft gehad.
- De bodemdaling is verwaarloosbaar t.o.v. de lokale morfodynamische veranderingen, maar het totale volume van de bodemdaling is niet verwaarloosbaar t.o.v. de ontwikkeling van het sedimentvolume van het gebied.

Andere noemenswaardige bevindingen hebben betrekking op de ontwikkelingen van de getijslag en het gemiddelde zeeniveau gemeten op het station Nes:

- Er is een plotseling afname van de getijslag rondom 2000 geconstateerd. De getijslag heeft verder een toenemende trend in tijd in de perioden zowel vóór als na deze plotseling verandering.
- De in andere recente studies gevonden versnelling van zeespiegelstijging kan niet worden bevestigd door analyse van de gegevens van het station Nes.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Grootschalig morfologische veranderingen	8
3	Noordzeekust	16
4	Friesche Zeegat en De Hon	21
5	Waddenzee	27
6	Wadplaat sedimentatie bij Ameland	34
6.1	Inleiding	34
6.2	Materiaal en methode	34
6.3	Onderzoeksgebieden en meetstations	38
6.3.1	Bodemdalingsgebied Oost-Ameland	38
6.3.2	Referentiegebied West-Ameland.	40
6.3.3	Referentiegebied Piet Scheveplaat	40
6.4	Resultaten bodemdalingsgebied Oost-Ameland	41
6.4.1	Uitwerking per meetstation	41
6.4.2	Bodemdeling wadplaten Oost-Ameland	42
6.4.3	Sedimentatie op wadplaat Oost-Ameland	44
6.4.4	Plaatsedimentatie in relatie tot de tijd	46
6.4.5	Wadplaatsedimentatie in relatie tot hoogteligging	48
6.4.6	Wadplaatsedimentatie in relatie tot bodemdaling	49
6.5	Resultaten referentiegebied West-Ameland	51
6.5.1	Uitwerking per meetstation	51
6.5.2	Sedimentatie alle meetstations West-Ameland	52
6.5.3	Plaatsedimentatie in relatie tot tijd	52
6.5.4	Plaatsedimentatie in relatie tot hoogteligging	54
6.6	Resultaten referentiegebied Piet Scheveplaat	55
6.6.1	Sedimentatie alle meetstations Piet Scheveplaat	55
6.6.2	Plaatsedimentatie in relatie tot tijd	55
6.6.3	Plaatsedimentatie in relatie tot hoogteligging	56
6.7	Discussie	57
6.8	Samenvatting en Conclusies	59
7	Engelsmanplaat	61
7.1	Inleiding	61
7.2	Samenvatting van de 2007 studie	62
7.3	Recente ontwikkelingen	64
8	Ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op oost Amerland	66

9	Panoramafoto's	72
9.1	Inleiding	72
9.2	Methodiek	72
9.3	Resultaten	74
10	Overige relevante abiotische factoren	76
10.1	Algemeen	76
10.2	Waterstanden	76
10.2.1	Representatieve waterstanden en stormvloedgegevens	76
10.2.2	Zeespiegelstijging	80
10.3	Neerslag en verdamping	81
10.3.1	Neerslag	81
10.3.2	Verdamping	81
10.4	Wind en golven	82
11	Samenvatting en Conclusies	89
11.1	Samenvatting	89
11.2	Conclusies m.b.t. effecten bodemdaling	91
12	Referenties	92
A	Bijlagen Spijkermetingen	96
A.1	Meetdata Oost-Ameland	96
A.2	Meetdata West-Ameland.	97
A.3	Meetdata Piet Scheveplaat.	98
A.4	Grafieken meetstations Oost-Ameland	99
A.5	Grafieken meetstations West-Ameland.	102
A.6	Grafieken meetstations Piet Scheveplaat.	103
B	Panoramafoto's	105
B.1	Panoramafoto's Baken	105
B.2	Panoramafoto's Hon paal 25,8	108
B.3	Panoramafoto's Hon paal 27,2	111
B.4	Panoramafoto's Meidoornvallei buiten	114
B.5	Panoramafoto's Vallei NC02	117
B.6	Stormvloedgeul bij Baken 2004-2022	121
B.7	Detail in stormvloedgeul bij Baken	122
B.8	Luchtfoto Hon 1993 en 2022	123

1 Inleiding

De gaswinning op Ameland-oost is gestart in 1986. In opdracht van de NAM is in dat jaar door WL | Delft Hydraulics in samenwerking met Alterra (toen RIN) een voorspelling gemaakt van de mogelijke effecten van de bodemdaling (Eysink, 1987), waarna eind 1988 is begonnen met de monitoring. De voorgaande vijf rapportages van de monitoring zijn gebaseerd op gegevens tot 1994, 1999, 2004, 2010, 2015 en beschrijven de effecten over een periode van respectievelijk 8 jaar, 13 jaar, 18 jaar, 24 jaar en 29 jaar na het begin van de gaswinning. De bevindingen zijn uitgebreid beschreven in de rapporten van het door WL | Delft Hydraulics en Alterra (toen IBN) gezamenlijk uitgevoerde onderzoek (Eysink e.a., 1995 en 2000, en de Vlas, 2005, 2011, 2017). De huidige rapportage is de zesde sinds het begin van de monitoring van de effecten van de bodemdaling door de gaswinning op Ameland-oost en is een aanvulling op de voorgaande rapportages. Voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar die evaluatierapporten.

In dit rapport worden de resultaten van de studie naar morfologische ontwikkelingen en andere abiotische factoren gerapporteerd. De studie is uitgevoerd door Deltares in samenwerking Natuurcentrum Ameland (NCA) en bevat de volgende onderdelen:

- Grootschalig morfologische ontwikkeling rondom Ameland (Hoofdstuk 2, Deltares)
- Ontwikkeling van de Noordzeekust van Ameland en de kustsuppleties (Hoofdstuk 3, Deltares)
- Ontwikkeling van het Friesche Zeegat en de Hon (Hoofdstuk 4, Deltares)
- Ontwikkeling van het Waddenzeebekken Pinkegat (Hoofdstuk 5, Deltares)
- Wadplaats sedimentatie bij Ameland (Hoofdstuk 6, NCA)
- Ontwikkeling van de Engelsmanplaat (Hoofdstuk 7, Deltares)
- Morfologische ontwikkeling van de zeereep op Oost-Ameland (Hoofdstuk 8, NCA)
- Panoramafoto's Oost Ameland (Hoofdstuk 9, NCA)
- Overige relevante abiotische factoren (Hoofdstuk 10 Deltares)

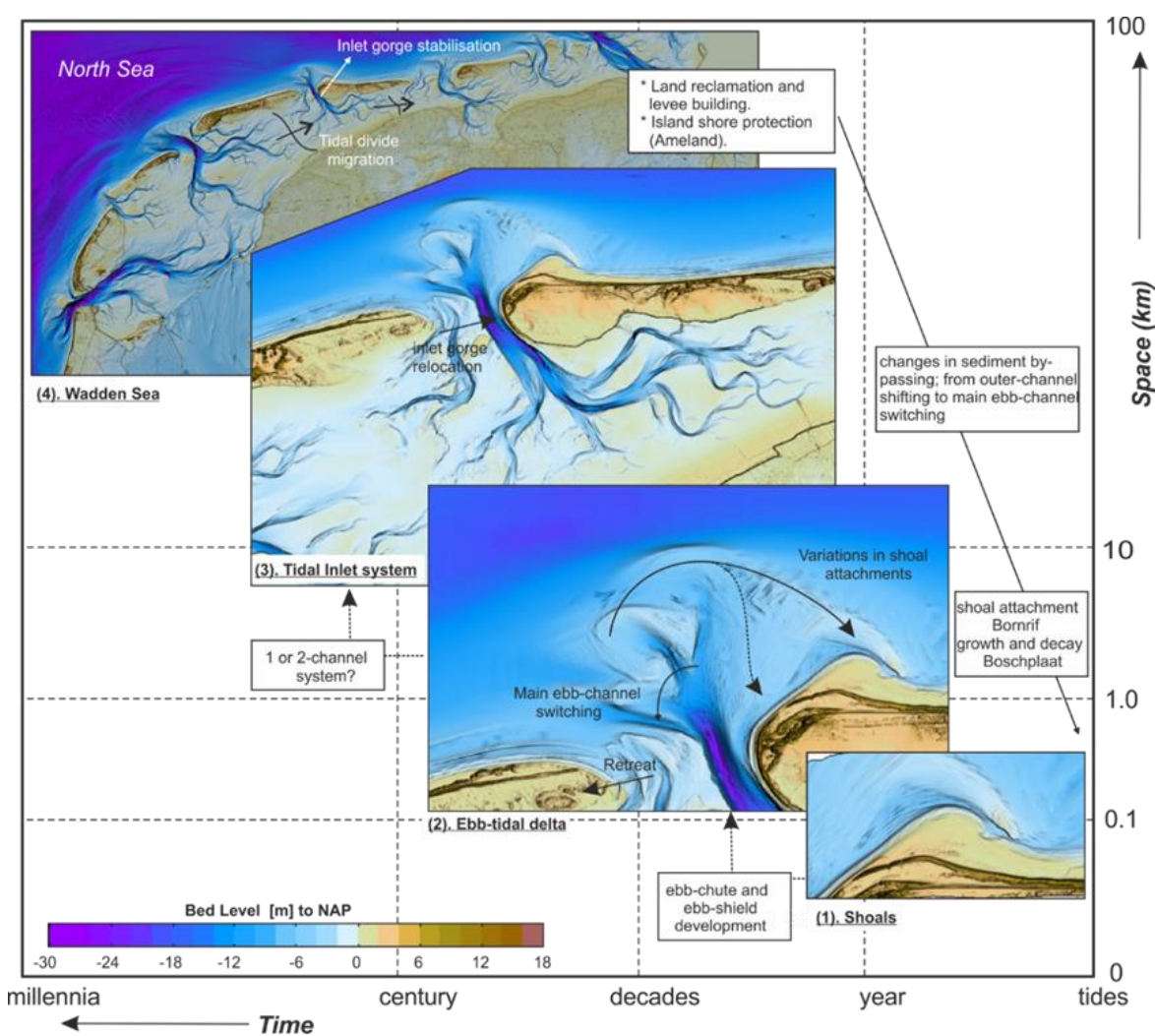
De belangrijkste bevindingen van de studie worden samengevat in Hoofdstuk 11.

Tijdens de afronding van dit rapport is er een paper gepubliceerd over de effecten van bodemdaling op de ontwikkelingen van bodemsamenstelling en macrobenthos (de la Barra e.a., 2024), met veel media-aandacht eromheen. In Appendix C is een notitie opgenomen die de bevindingen uit de studie van de la Barra e.a. (2024) samengevat, gevolgd door discussies waaruit is geconcludeerd dat de conclusie m.b.t. invloed van bodemdaling op bodemsamenstelling uit eerdere studies voorlopig niet hoeft te worden aangepast.

2 Grootschalig morfologische veranderingen

2.1 Inleiding

De morfologische ontwikkelingen treden op, op verschillende tijd- en ruimteschalen en worden beïnvloed door aandrijvers van verschillende tijdschalen, variërend van golven met tijdschaal van seconden tot zeespiegelstijging met tijdschaal van eeuwen. De processen op verschillende schaalniveaus beïnvloeden elkaar. Dit concept is gevangen in de schaalcascade van de Vriend (1991). De ontwikkelingen op de grote schaal worden gezien als de externe dynamiek, de aandrijvers, van de kleine schaal. Deze extern gegenereerde dynamiek kan resulteren in intern gegenereerde dynamiek op de kleine schaal, maar interne dynamiek kan ook plaatsvinden als variabiliteit binnen de afbakening van het grootschalige systeem. Een voorbeeld van het cascademodel is gegeven in Figuur 2.1.

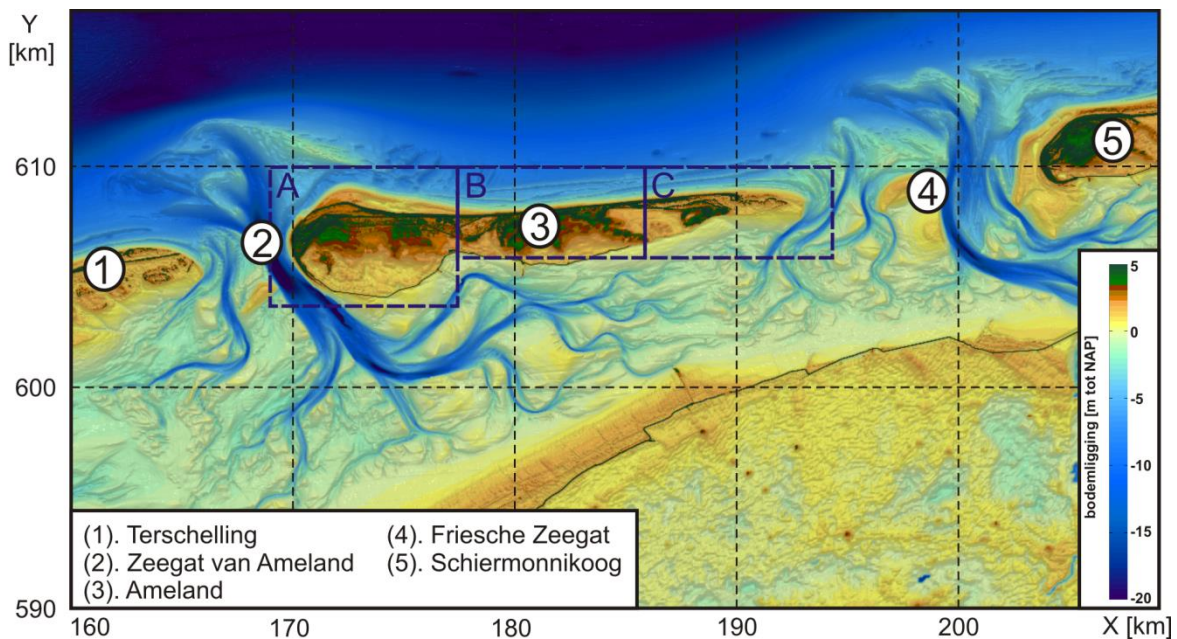


Figuur 2.1 Een voorbeeld van het cascademodel van de Vriend (1991) (naar Elias e.a. 2019).

Bodemdaling door gaswinning heeft de vorm van een schotel met een diameter in de orde van 10 km en treedt op in een periode van een aantal decennia. Op deze ruimte- en tijdschalen heeft de bodemdaling dus directe invloed op de morfologie. Maar het kan daarmee ook invloed hebben op morfologische ontwikkelingen op grotere en kleinere tijdschalen, zoals het cascademodel (Figuur 2.1) aangeeft. Het daarom belangrijk de effecten van bodemdaling op verschillende ruimte- en tijdschalen te evalueren. In dit hoofdstuk wordt de grootschalig morfologische ontwikkelingen rondom Ameland-Oost en de effecten van bodemdaling erop beschouwd.

2.2 Morfologisch systeem rondom het eiland Ameland

Ameland is centraal gelegen in de rij van Nederlandse Waddeneilanden. Het voornamelijk uit zandduinen bestaande eiland is ongeveer 25 km lang met een maximale breedte van 4,5 km. Het totale oppervlak beslaat zo'n 60 km². Het oostelijke gedeelte van het eiland (de laatste 10 km) is onbewoond en herbergt het natuurgebied "Het Oerd" dat bestaat uit een landschap van hoge duinen, duinvalleien en kwelders. De meest oostelijke punt wordt "de Hon" genoemd.

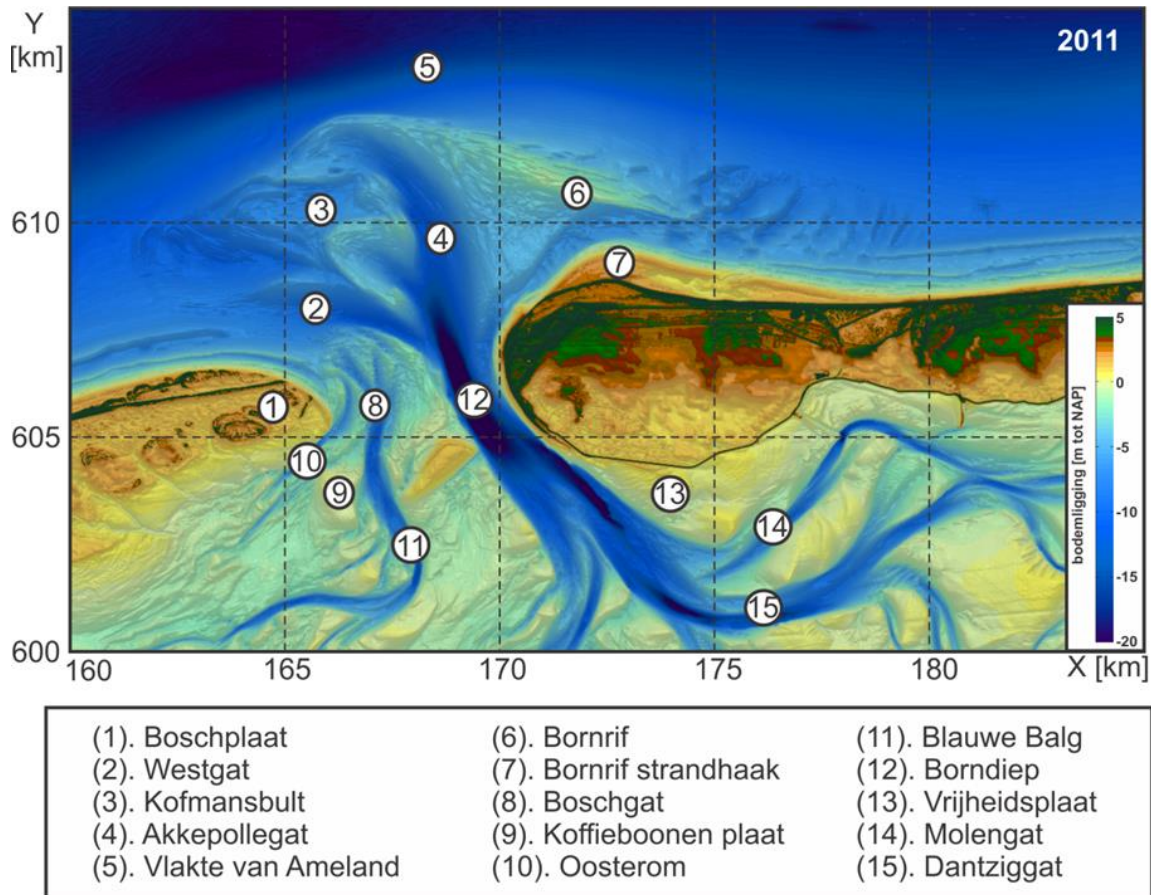


Figuur 2.2 Locatie Ameland en indeling in 3 morfologische eenheden: (A) westelijke eilandkop, (B) de eilandkust en (C) oostelijke eilandstaart. De bodem is representatief voor 2011/2012

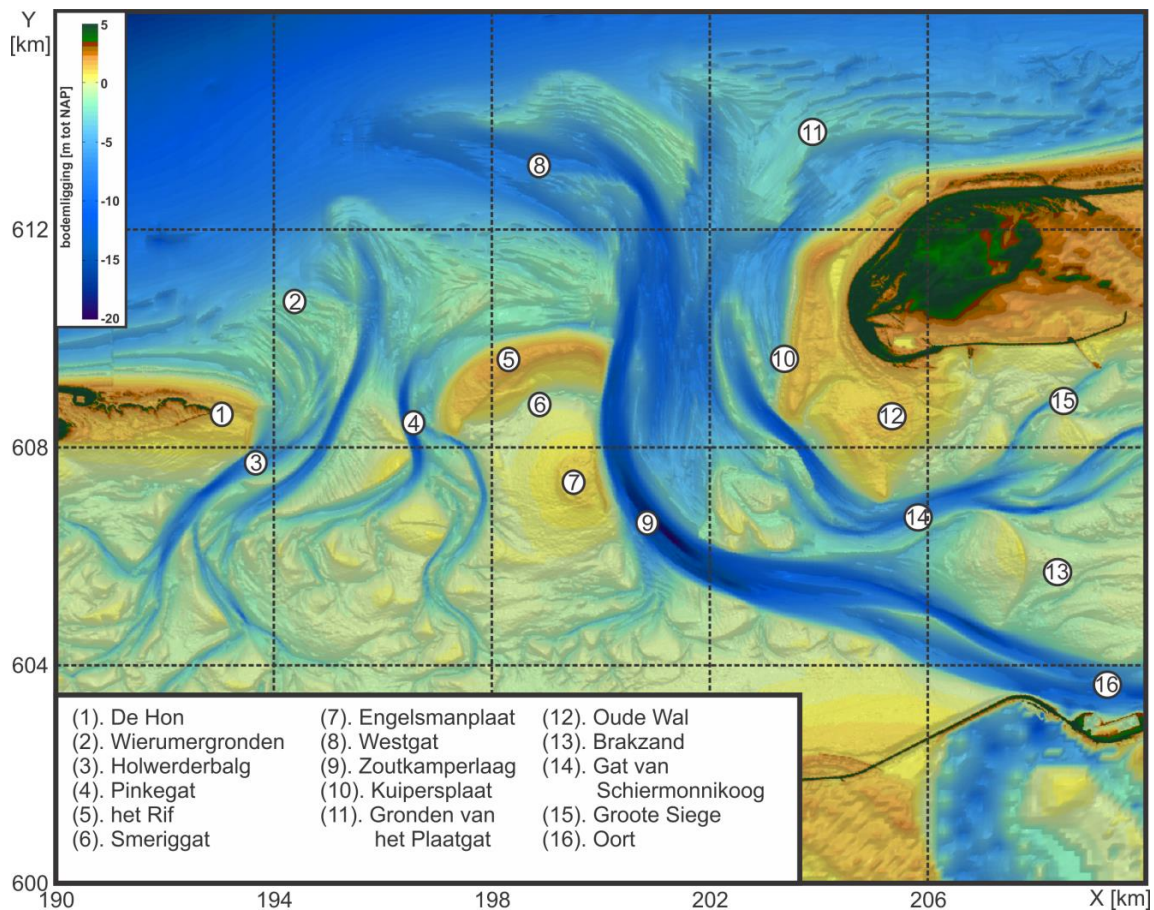
Het Ameland eiland is ingesloten door twee zeegaten. Het zeegat van Ameland, met de geul Borndiep bevindt zich aan de westkant en het Friesche Zeegat (met het Pinkegat) ligt ten oosten (Figuur 2.2). De morfologische ontwikkelingen van deze zeegaten bepalen in grote mate de ontwikkeling van het eiland Ameland en met name de veranderingen bij de eilandkoppen (Cleveringa e.a., 2005, Oost, 1995, Elias et al. 2019). De twee eilandkoppen hebben een verschillend morfologisch karakter. Aan de oostzijde (Pinkegat) kan de natuurlijke dynamiek vrijwel ongestoord plaatsvinden. Aan de westzijde van Ameland zijn er diverse harde kustverdedigingswerken uitgevoerd en vinden er met regelmaat suppleties plaats om erosie van de eilandkop door het opdringende Borndiep tegen te gaan.

(Figuur 2.3) geeft een overzicht van de belangrijkste geulen in het Amelander Zeegat. Historisch gezien vertoont de buitendelta van het zeegat een (pseudo-) cyclisch gedrag waarin enkele en dubbele geulconfiguraties elkaar afwisselen (Van der Spek en Noorbergen, 1992, Israël, 1998, Israël en Dunsbergen, 1999; Cheung en Gerritsen, 2007). De bodem (Figuur 2.2) vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde, langs de westkust van Ameland (het Borndiep-Akkepollegat [12,4]). Aan de westzijde, langs de Boschplaat [1], bevinden zich de geulen Westgat [2] aan de zeezijde en Boschgat in het bekken [8]. De grootte en invloed van deze twee nevengeulen varieert door de tijd. Op dit moment zijn de geulen over een ondiepte met elkaar verbonden.

Het grootste plaatoppervlakte op de buitendelta ligt ten noorden van de hoofdgeul. Periodiek is er door het aanlanden van zandbanken sprake van (veel) zanduitwisseling met de kust van Ameland. Een voorbeeld hiervan is de vorming en aanlanding van het Bornrif [6 en 7].



Figuur 2.3. Overzicht van de belangrijkste geulen en platen in het Amelander zeegat

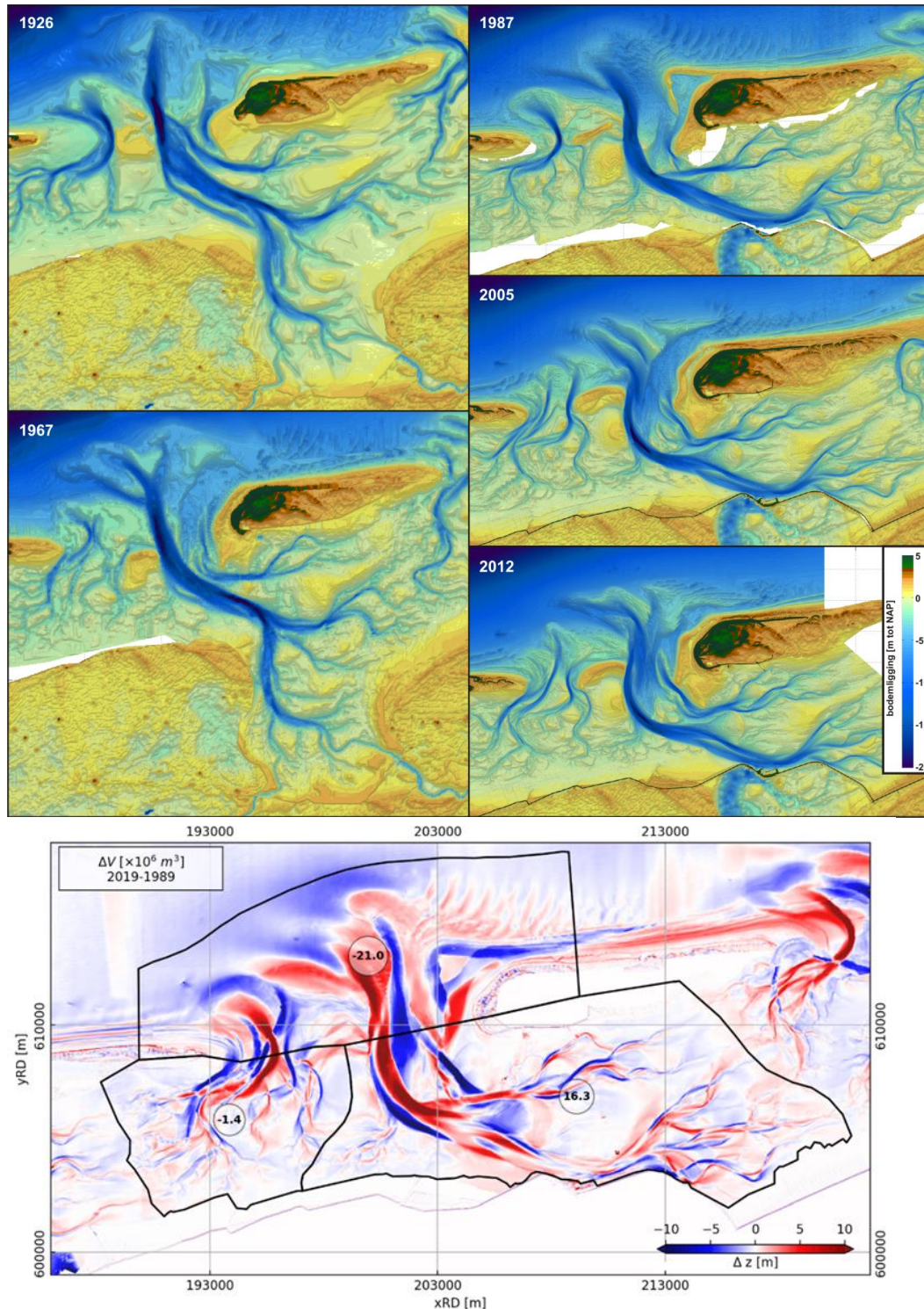


Figuur 2.4 Overzicht van de belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat

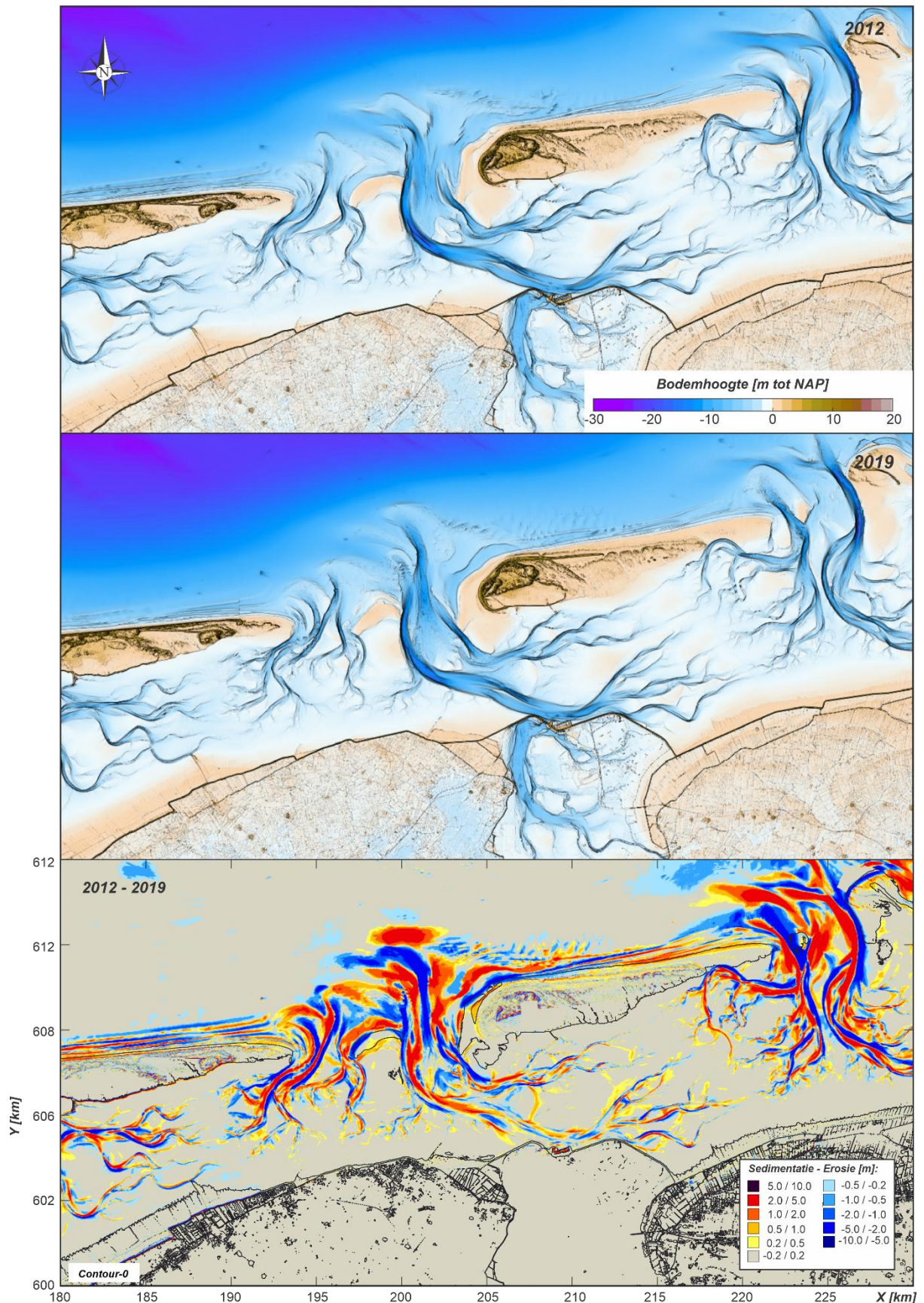
Het Friesche zeegat bestaat uit twee deelsystemen, Pinkegat en Zoutkamperlaag, gescheiden door de Engelmansplaat (Figuur 2.4). De huidige configuratie van platen en geulen is sterk beïnvloed door de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 (Biegel, 1993; Oost, 1995; Elias en Oost, 2021). Vóór de afsluiting was er zowel in het Pinkegat en het Zoutkamperlaag deelsysteem een cyclische ontwikkeling tussen één en twee-geulsystemen te zien. Na afsluiting, vonden er grote veranderingen in zowel het bekken als het zeegat plaats (Figuur 2.5). De afsluiting verkleinde de bekkenoppervlakte met ongeveer 30%, waardoor het getijprisma reduceerde van 306 miljoen m³ naar 200 miljoen m³. Deze grote afname in getijprisma was mede verantwoordelijk voor de morfologische veranderingen; het zeegat tracht een nieuw morfologisch evenwicht te vormen met het verkleinde prisma. Door de gereduceerde getijstromingen kon de omvang en de vorm van de oorspronkelijke buitendelta niet worden behouden. Golfgedreven transporten duwen de buitendelta landwaarts en een grote strandhaak werd gevormd aan de noordwest punt van Schiermonnikoog (Figuur 2.5, 1987). De aanlanding van deze strandhaak en de herverdeling van dit sediment bepaalt de huidige morfologische ontwikkeling van het eiland Schiermonnikoog (Elias, 2022).

In het onderste plaatje van Figuur 2.5 is het bodemhoogteverschil tussen 1989 en 2019 weergegeven. De grootste veranderingen treden op aan de geulranden t.g.v. geulmigratie. In het plaatje zijn ook de volumeveranderingen (van sediment) binnen de kombergingsgebieden van Pinkegat en Zoutkamperlaag en in het buitengebied gegeven.

De twee meest recente lodingen (2012 en 2019) en daaruit afgeleide bodemhoogteveranderingen zijn weergegeven in Figuur 2.6. Volgens deze twee lodingen is er sedimentatie (sedimentvolume toename) opgetreden in zowel Pinkegat (3,26 miljoen m³) als Zoutkamperlaag (8,57 miljoen m³), ondanks de bodemdaling van respectievelijk 0,93 (Pinkegat) en 1,01 miljoen m³ (Zoutkamperlaag).



Figuur 2.5. Grootschalige morfologische ontwikkeling van het Friesche zeegat op basis van de Vaklodingen (de eilanden zijn ingevuld met het AHN-1 (vanaf 1996)). De bodemhoogtes zijn getoond tot 2012 (de 2019 bodem is gegeven in Figuur 2.6 en het onderste plaatje toont de veranderingen in de periode 1989-2019 (de getallen in de cirkels geven de volumeveranderingen in miljoen m³ van de betreffende polygonen)).



Figuur 2.6 Grootchalige morfologische ontwikkeling van het Friesche zeegat van 2012 tot 2019 op basis van de Vaklodingen. Het onderste plaatje toont de sedimentatie erosie patroon over deze periode.

2.3 Grootschalige veranderingen en relatie tot bodemdaling

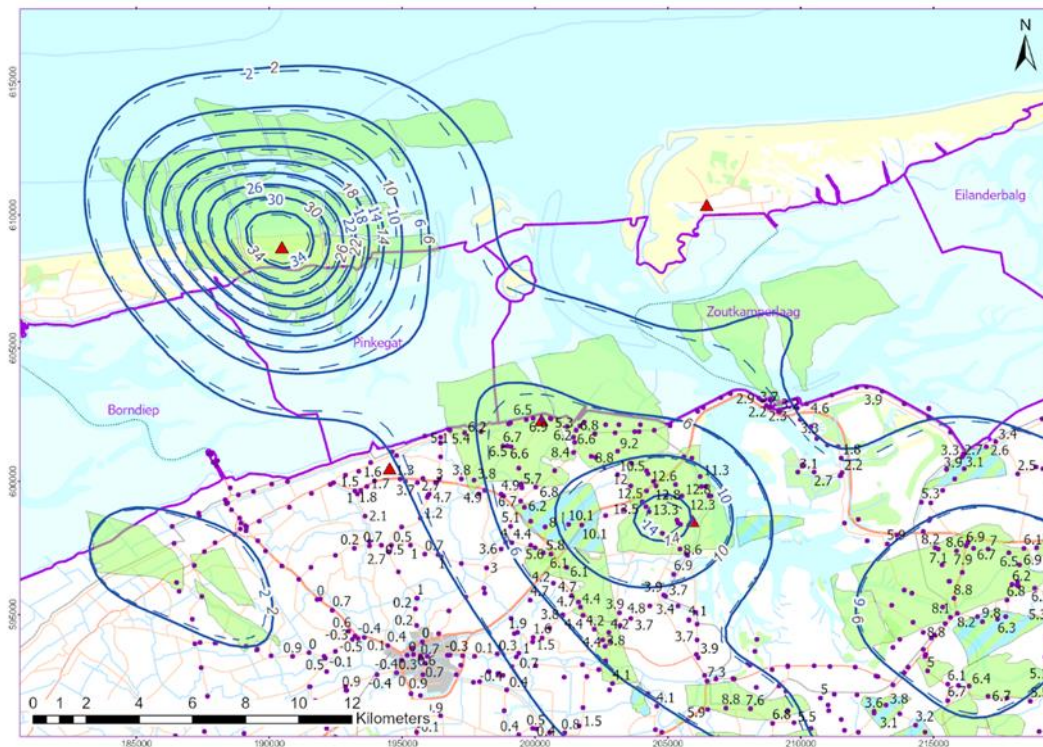
In de vorige rapportage was geconcludeerd dat de gemiddelde veranderingen in verschillende deelgebieden veel groter zijn dan de bodemdaling. Deze conclusie blijft van toepassing omdat de gemiddelde snelheid van bodemdaling niet veel is veranderd sindsdien.

Zoals in de vorige rapportage al is geconstateerd is het totale volume van de dalingskom echter niet verwaarloosbaar. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de daling tussen 1986 en 2022 door gaswinning. Merk op dat de tabel betreft bodemdaling door gaswinning vanuit alle velden, waarvan de winning op Ameland de grootste bijdrage levert. In de vloedkom van Zoutkamperlaag is het dalingsvolume van ongeveer 2,5 miljoen m³ relatief klein en blijkbaar weinig invloed gehad op de grootschalige ontwikkeling. Ondanks de bodemdaling is er sedimentvolumetoename van 16 miljoen m³ (1989-2019) in de vloedkom waargenomen (zie Figuur 2.5). Als we puur kijken naar de geaggregeerde volumes dan kan worden geconcludeerd dat grotendeels van het dalingsvolume (ongeveer 5 miljoen m³) in de vloedkom van Pinkegat is gecompenseerd door sedimentatie (in 2019 is er een verlies van 1,4 miljoen m³ over, zie Figuur 2.5).

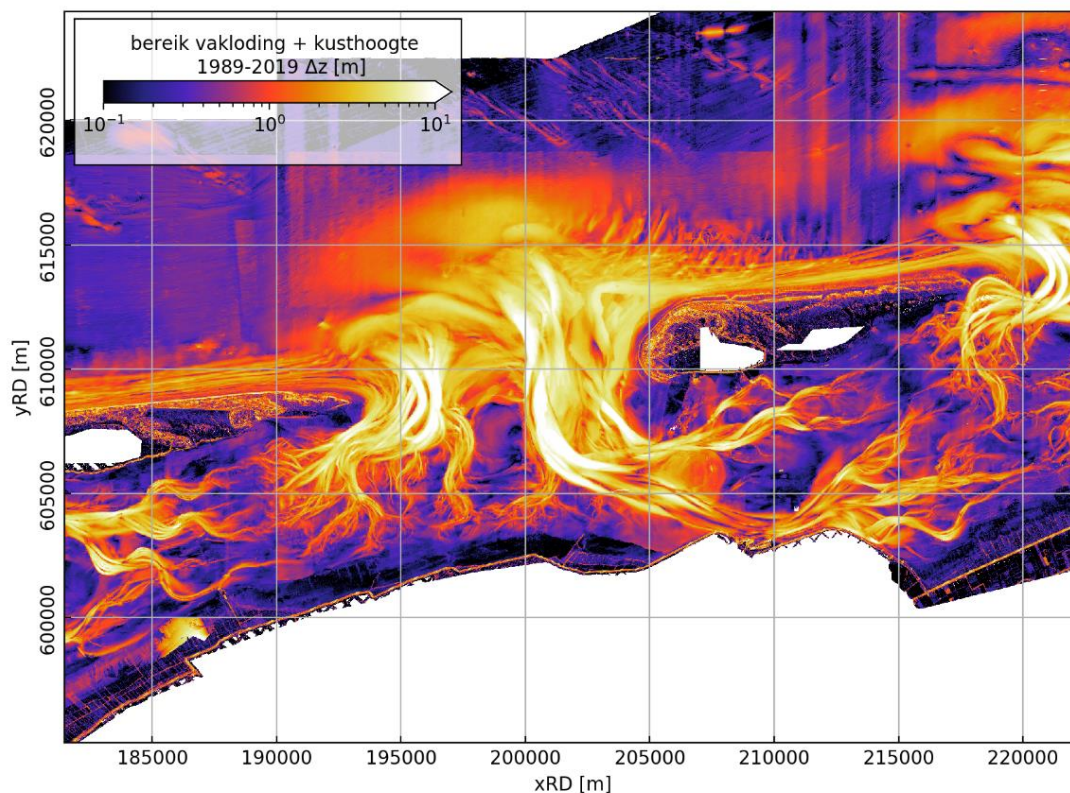
Tabel 2.1. Gemiddelde daling en volume van de dalingskom door gaswinning per geaggregeerd deelgebied in de periode 1986-2022.

	Gemiddelde daling [cm]	Volume daling [miljoen m ³]
Ameland	10,96	2,54
Kust Vooroever Ameland	5,81	8,16
Buitendelta Pinkegat	8,53	1,07
Vloedkom Pinkegat	8,57	5,26
Kust en vooroever Schiermonnikoog	0,20	0,26
Buitendelta Zoutkamperlaag	0,82	0,29
Vloedkom Zoutkamperlaag	1,62	2,40
Vloedkom Amelanderveeg	2,08	1,66

In de voorgaande rapportages werd geen zichtbaar effect van bodemdaling op de morfologische ontwikkeling van het gebied geconstateerd. De analyse van Van der Lugt e.a. (2020) geeft een verklaring hiervoor: de bodemdaling (maximaal orde 1 cm/jaar, zie Figuur 2.7) is een orde kleiner dan de waargenomen lokale sedimentatie-erosiesnelheid (Zie Figuur 2.8). Dit neemt echter niet weg dat de totale volumes van de daling in verschillende gebieden ten opzichte van de andere volumeveranderingen niet te verwaarlozen zijn.



Figuur 2.7 Grootschalige gebiedsindeling met de bodemdaling door gaswinning vanaf de start van de winning tot 2022



Figuur 2.8 Weergave is de range (maximum geobserveerde minus minimum geobserveerde bodemhoogte) van de vaklodingen en kusthoogte kaarten uit de periode 1989 en 2019. Gebieden die fel oplichten zijn hoog variabel, donkere gebieden hebben een nauwelijks variabele hoogteligging.

3 Noordzeekust

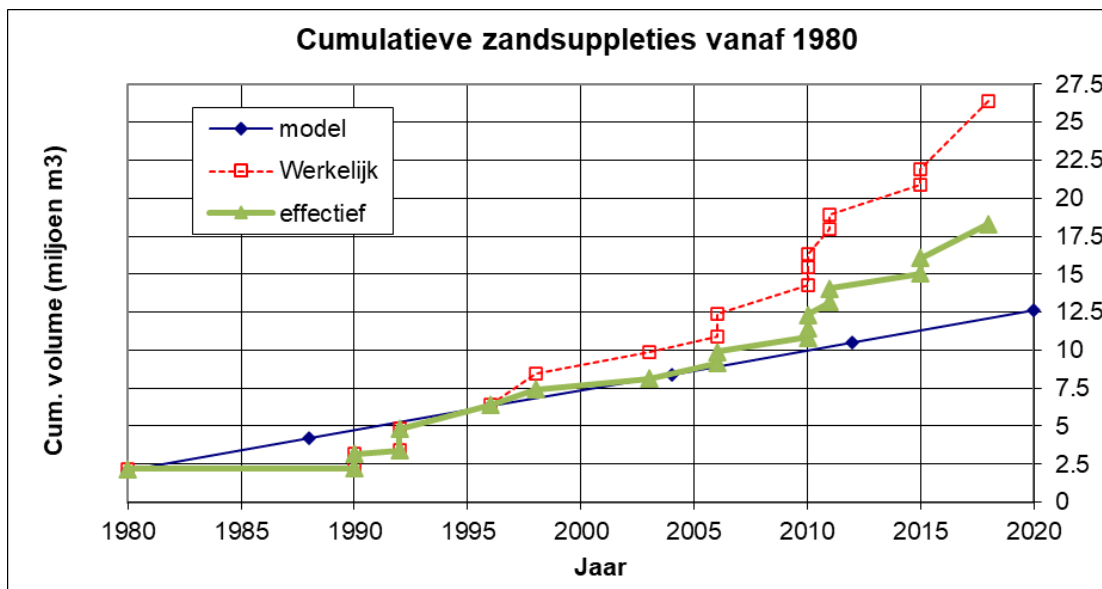
In 1987 is met behulp van een kustlijnmodel een voorspelling gemaakt van het gedrag van de Noordzeekust tussen kmr 7 en kmr 25 (Eysink 1987). De voorspelling geeft de berekende verandering in de positie van de gemiddelde hoogwaterlijn (GHW-lijn) ten opzichte van die in het jaar 1980. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de situatie met en zonder bodemdaling. In beide gevallen is om de acht jaar een strandsuppletie van 2,1 miljoen m³ tussen km 10 en km 17 toegepast beginnend in 1980.

Sinds 1990 is als rijksbeleid vastgesteld dat de kustligging van 1990 zal worden gehandhaafd. Bij de Noordzeekust van Ameland wordt de kustligging tot kmr. 23 via kustsuppleties onderhouden. Tot 1998 werden de suppleties aangebracht op het strand en één keer in 1990 tegen de zeereep voor herstel van stormafslag. Vanaf 1998 zijn de kustsuppleties uitgevoerd als vooroeversuppleties, waarbij rekening wordt gehouden dat slechts 50% van het aangebrachte zandvolume effectief bijdraagt aan de verbetering van de ligging van de GHW-lijn (Eysink e.a., 2000). De suppleties langs de Noordzeekust van Ameland ten oost van kmr. 7 sinds 1980 zijn weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Kustsuppleties Noordzeekust Ameland tussen kmr.7 en kmr.23. Volume effectief is berekend als de som van volume strand en helft van volume vooroever.

Jaar	Volume strand (10 ⁶ m ³)	Volume vooroever (10 ⁶ m ³)	Volume effectief (10 ⁶ m ³)	Cum. effectief vol.(10 ⁶ m ³)	Plaats (kmr)
1980	2,1		2,1	2,1	10 – 17
1990	1,0		1,0	3,1	12 – 17
1992	1,6		1,6	4,7	12 – 20
1996	1,5		1,5	6,2	7 – 11
1998		2,5	1,25	7,45	11 – 18
2003		1,5	0,75	8,2	10 – 14
2006	1,1	1,5	1,85	10,05	12 – 18
2010	0,9	3,4	2,6	12,65	11 – 17
2011	0,9	1,6	1,7	14,35	16 - 20
2015		2,0	1,0	15,35	12 - 17
2018		4,46			13 - 23

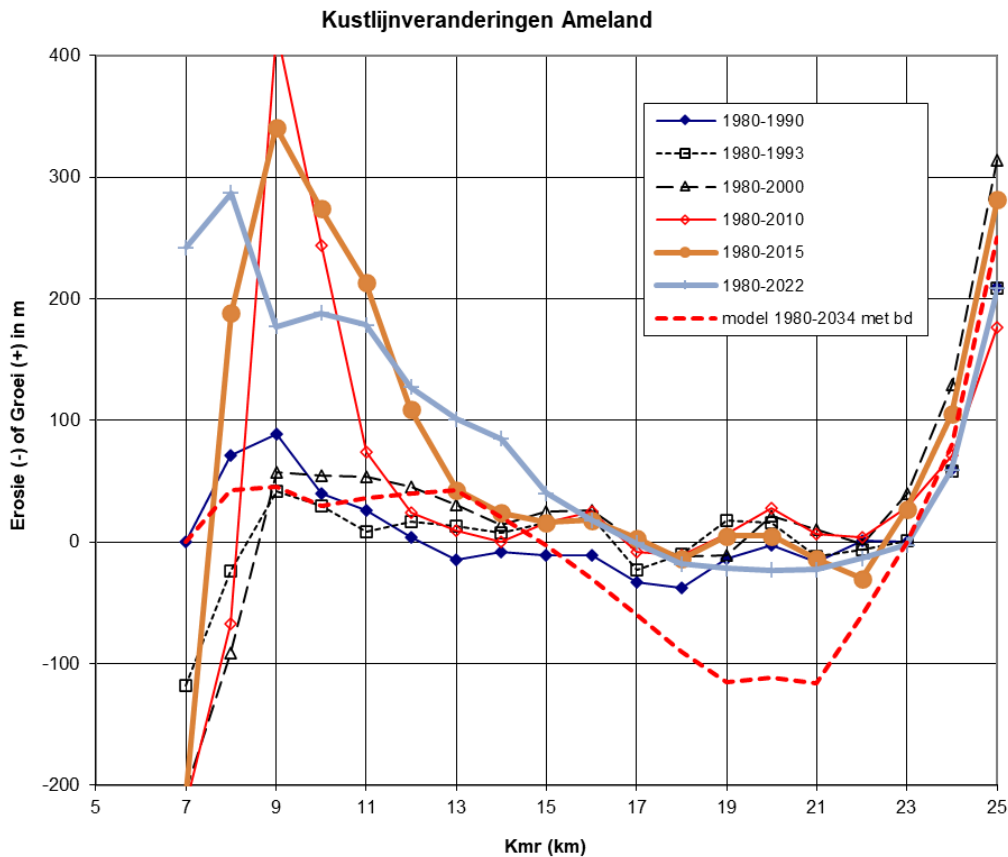
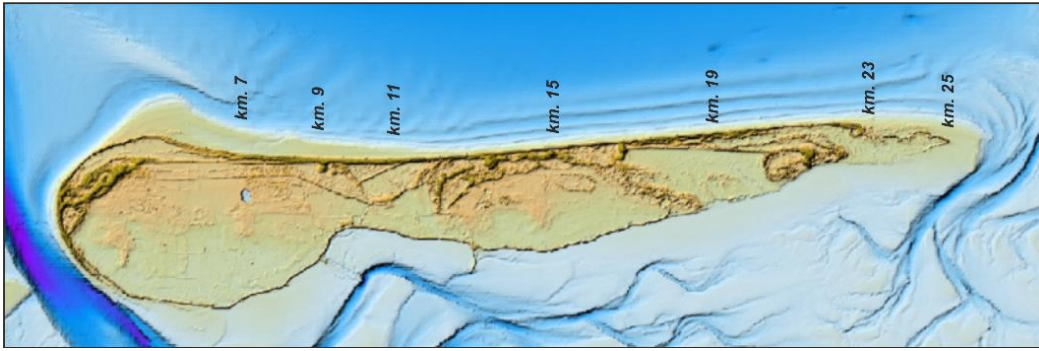
Figuur 3.1 laat de ontwikkeling van het cumulatieve volume effectief zien vanaf 1980, samen met die in het kustlijnmodel. In de periode 1980 – 1990 liepen de kustsuppleties achter vanwege het ontbreken van een kustbeleid. In 1990 werd de stormafslag van januari 1990 hersteld. Vanaf 1992 werd voor het handhaven van de Basiskustlijn (van 1 januari 1990) gesuppleerd. Vanaf 2007 werd extra gesuppleerd voor het in-stand-houden van het kustfundament en moest hiervoor een inhaalslag worden uitgevoerd. Vandaar de extra grote kustsuppleties op de Noordzeekust van Ameland in 2010/2011: op Ameland-west is totaal 2,4 miljoen m³ gesuppleerd en op Ameland-midden 2,0 miljoen m³ op het strand en 4,7 miljoen m³ op de vooroever (incl. 0,2 miljoen m³ op de vooroever voor compensatie van de extra zandvraag in de kustzone vanwege bodemdaling in de Waddenzee als gevolg van gaswinning in de gasvelden nabij Lauwersoog). In 2015 is er 2 miljoen m³ op de vooroever tussen kmr. 12 en kmr. 17 gesuppleerd, en in 2018 4,46 miljoen m³ tussen kmr. 13 en 23.



Figuur 3.1 Totale effectieve volume van de kustsuppleties op het Noordzeestrand van Ameland vanaf 1980

Hoewel de werkelijke kustsuppleties in tijd en plaats afwijken van de theoretische kustsuppletie in het kustlijnmodel, komt het geaccumuleerde, effectieve volume van de suppleties vrij redelijk naar verwachting overeen met dat in het model tot 2005 (zie Figuur 3.1). Vanaf 2005 loopt de werkelijke kustsuppletie sneller op in de tijd dan dat in het model. Deze afwijking was voor het eerst aangemerkt in de vorige rapportage die de gegevens tot 2015 beschouwde. De afwijkende trend is de laatste jaren doorgezet. Daarom concluderen wij nu dat de toegepaste kustsuppletie in het model niet overeenkomt met de werkelijkheid. Terugkijkend constateren wij dat de afwijking al vanaf 1990, toen het beleid van BKL-handhaving van kracht was geworden, al was begonnen. Het werkelijke verloop van het geaccumuleerde, effectieve volume van de suppleties vanaf 1990 toont een vrij lineaire trend ($R^2=0.96$) van 0,5 miljoen m^3 per jaar, aanzienlijk hoger dan de waarde van 0,2625 miljoen m^3 per jaar in het model. Deze afwijking zal in de tijd ook steeds meer doorwerken in de afwijking tussen de modelresultaten en de werkelijkheid m.b.t. kustlijnpositie.

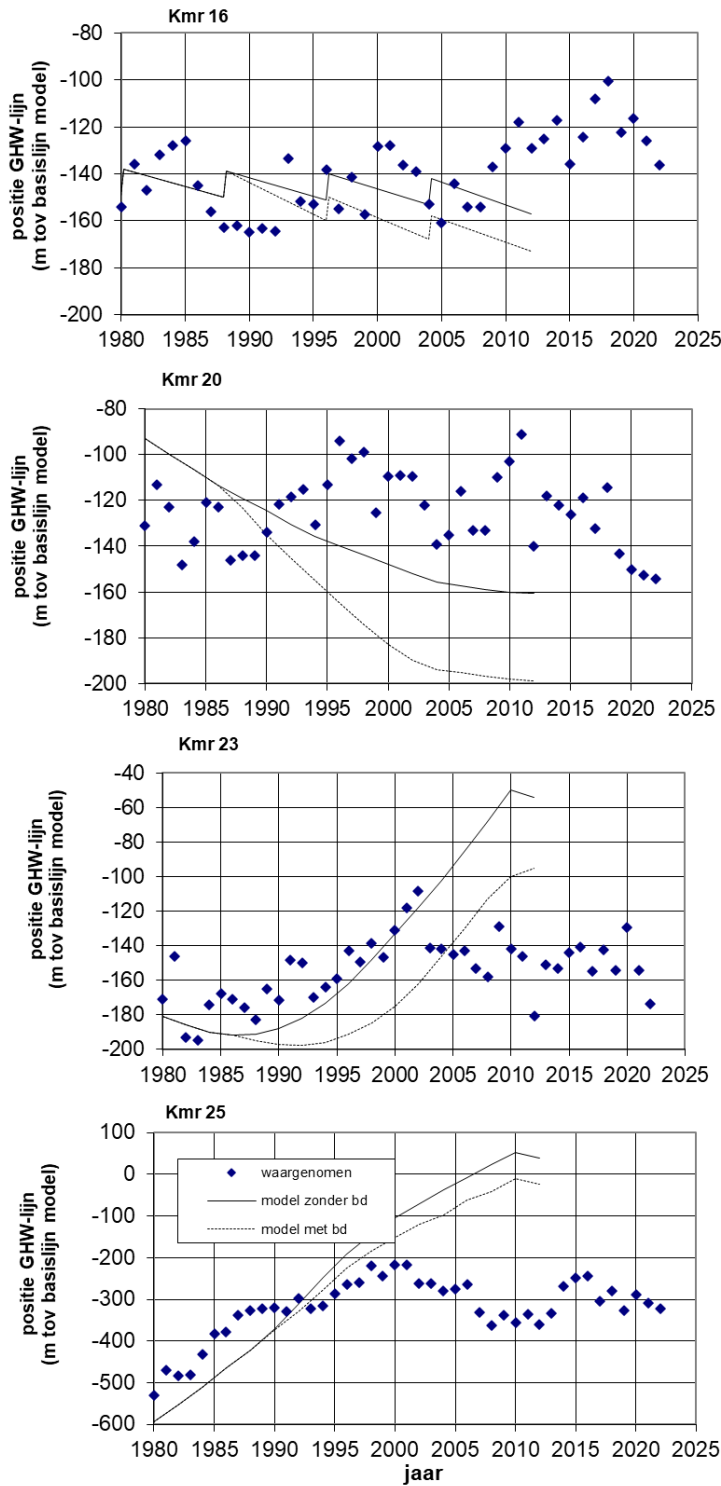
Uit de resultaten van het monitoren van de werkelijke kustveranderingen van de Noordzeekust van Ameland vanaf 1980 blijkt dat in 2010 de kust tussen kmr. 9 en kmr. 25 overal zeewaarts van de kustlijn in 1990 lag (Figuur 3.2). In 2010 was er bij kmr. 9 een plaat van het Bornrif (aanlanding Bornrif Strandhaak in 1985) met het Noordzeestrand van Ameland verheeld (de lagunemeer tussen de plaat en de strand verdwenen). De meest opvallende verandering in de periode 2010-2015 is de verspreiding van deze plaat, waardoor de kustlijn op kmr. 9 achteruit is gegaan en in de omgeving van kmr. 9 (kmr. 7-8 en kmr. 10-15) is vooruitgegaan. Tussen kmr. 19 en kmr. 23 is de kustlijn landwaarts verplaatst in de periode 2010-2015, waardoor de 1990 kustlijn op kmr. 22 iets is overschreden door de kustlijn in 2015. Dit was tussen 1990 en 2010 lokaal ook wel eens gebeurd zoals in de vorige rapportages zijn vermeld. In de periode 2015-2022 is de achteruitgang bij kmr. 9 verder doorgezet. Ook direct ten oost ervan (kmr. 10 en 11) is de kustlijn achteruitgegaan in deze periode, maar de kustlijn is nog steeds ver zeewaarts t.o.v. 1990. Tussen kmr.12 en kmr. 20 is de kustlijn vooruitgegaan en vanaf kmr. 21 is het achteruitgegaan. Ten west daarvan (kmr. 7 en 8) is de kustlijn sterk vooruit vooruitgegaan. Over het algemeen kan worden gesteld dat de kustlijn van 1990 tussen kmr. 9 en kmr. 23 goed wordt gehandhaafd.



Figuur 3.2. Waargenomen en berekende kustlijnveranderingen van het Noordzeestrand van Ameland na 1980

Het ziet er naar uit dat de voorspelling van het kustgedrag rond kmr 19 – 22 te veel erosie heeft aangegeven, omdat de invloed van het zeeget en de buitendelta op de kustlijn niet geheel juist konden worden in geschat. Een andere verklaring is dat het model uitging van veel minder kustsuppletie dan in de werkelijkheid is uitgevoerd. Door meer te suppleren wordt de kustlijn gehandhaafd sinds 1990. Het grillige verloop van de kustlijnveranderingen tussen kmr 7 en kmr 9 wordt veroorzaakt door het wandelen en met de kust verhelen van platen vanaf het Bornrif. In 2010 was er bij kmr. 9 een plaat van het Bornrif met het Noordzeestrand van Ameland verheeld. Dit ingewikkelde en discontinue proces kan niet goed in een kustlijnmodel worden gereproduceerd. De verdere verspreiding van de plaat langs de kust zal meer afwijking tussen de werkelijke en de gemodelleerde kustlijnposities veroorzaken. De groeifase van de Noordzeekust van De Hon (kmr. 23 – 25) werd tot 2003 wel vrij goed weergegeven, zij het dat de werkelijke groei bij kmr. 25 minder was dan voorspeld. In het model loopt de groei nog door tot 2010; in de werkelijkheid is de erosiefase van De Hon al na 2001 begonnen, zoals uit het kustgedrag bij kmr. 25 blijkt.

In Figuur 3.3 zijn de berekende en de waargenomen kustontwikkeling ter plaatse van de kilometerraaien 16, 20, 23 en 25 rond de NAM-locatie gegeven.



Figuur 3.3 Berekende en waargenomen kustontwikkeling t.p.v. kmr 16, kmr 20, kmr 23 en kmr 25

Duidelijk is te zien dat de positie van de GHW-lijn in werkelijkheid een aanzienlijke jaarlijkse fluctuatie vertoont rond een trendlijn.

In kmr. 16 kan duidelijk het effect op de GHW-lijn worden herkend van de strandsuppleties in 1980 en 1992. Het effect van de strandsuppletie in 1996 en van de vooroeversuppletie in 1998 is met een vertraging van twee tot vier jaar in de kustlijnontwikkeling terug te vinden. Ook het effect van de vooroeversuppleties in 2003, 2006, 2010-2011, 2015 en 2018 komt (deels) met vertraging terug in de kustontwikkeling bij kmr. 16. De ontwikkeling van de kustlijn op deze locatie vertoont een stabiel karakter en komt eerder overeen met de berekende ontwikkeling zonder bodemdaling.

De ontwikkeling van de kustlijn in kmr. 20 vertoont tot 1989 enige achteruitgang, maar niet zo snel als de berekende teruggang zonder bodemdaling. In de periode 1989 tot 1996 is er een groei opgetreden van circa 40 m in plaats van erosie van circa 20 m. Voor een deel kan dit direct worden toegeschreven aan de strandsuppletie in 1992 (tot aan kmr. 20) en voor een deel indirect aan de suppletie van de zeereep in 1990. Een dergelijk effect van de bovendriftse suppleties in het model is niet terug te vinden in de berekende kustlijnontwikkeling. Tussen 1996 en 2004 treedt er een teruggang op die ongeveer overeen komt met de berekende situatie zonder bodemdaling. Na 2004 treedt er weer groei op als gevolg van de suppleties in 2003 en 2006. De groei bereikt een maximum in 2011 toen een suppletie tot aan kmr. 20 was uitgevoerd. Daarna krijgt de kustlijn een terugslag en het lijkt erop dat wij op deze locatie dezelfde fluctuerende beeld onder invloed van suppleties zoals in kmr. 16 beginnen te zien.

De waargenomen kustlijnontwikkeling bij kmr 23 verloopt tot 1993 met forse fluctuaties rond een trendlijn. Als de situatie zonder bodemdaling (1980 – 1986) als referentie wordt genomen, dan ligt de trendlijn van de waargenomen ontwikkeling circa 20 m te hoog. Tussen 1993 en 2002 komt de kustlijn iets boven de berekende kustontwikkeling zonder bodemdaling te liggen. In 2003 vertoont de GHW-lijn een aanzienlijke teruggang maar blijft daarna tot 2010 min of meer op zijn plaats. In die periode komt de berekende kustlijn met bodemdaling door groei zelfs zeewaarts te liggen van de waargenomen positie. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de omslag van groei naar erosie in werkelijkheid al is opgetreden in 2001 in plaats van in 2010.

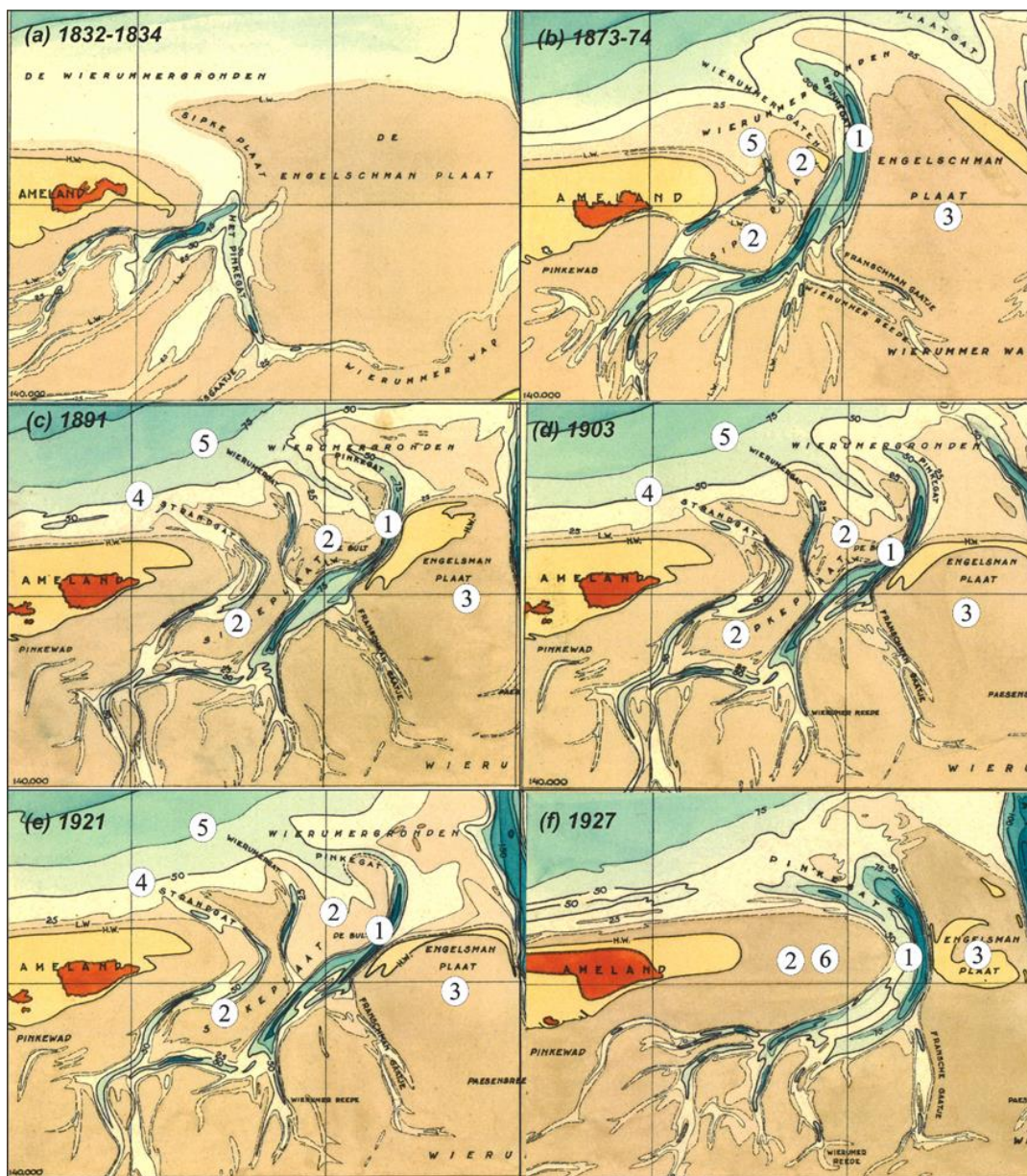
De kustlijnontwikkeling in kmr 25 vertoont een algemene trend van groei die overeenkomt met de berekende trend. Alleen in de periode 1988 tot 1994 stagneerde de zeewaartse groei in werkelijkheid. In die periode stagneerde ook de groei van De Hon naar het oosten. De oorzaak hiervan moet vermoedelijk worden gezocht in geulontwikkelingen in het zeegat rond het oostpunt van Ameland. In de periode van 1994 tot 1998 herstelde de groei zich weer om daarna weer te stoppen. Sinds het jaar 2001 is de groei van het oostpunt van Ameland te zijn omgeslagen in erosie, maar vanaf 2012 lijkt de groei weer te zijn hersteld.

Samenvattend kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- *De eerder getrokken conclusie blijft gerechtvaardigd dat de bodemdaling door gaswinning geen merkbare negatieve invloed op de ontwikkeling van de Noordzeekust heeft gehad. Dit werd mede veroorzaakt door het overheidsbeleid tot handhaving van de 1990-kustlijn.*
- *De werkelijke kustsuppleties op Ameland vertonen een afwijkend verloop ten opzichte van de verwachtingen zoals er in het kustlijnmodel uit 1987 was vanuit gegaan. Sinds 1990 is er gemiddeld 0,5 miljoen m³ gesuppleerd i.p.v. de 0,2625 miljoen m³ per jaar in het model.*
- *De resultaten van het kustlijnmodel wijken af van de werkelijke ontwikkelingen. Drie verschillende verklaringen kunnen worden gegeven voor de afwijkingen: (1) de verkeerde suppletie hoeveelheid in het model; (2) de onvoorspelbare aanlanding van platen op Ameland vanaf het Bornrif; (3) de eerder dan verwacht omslag van groei naar erosie van het oostpunt van Ameland.*

4 Friesche Zeegat en De Hon

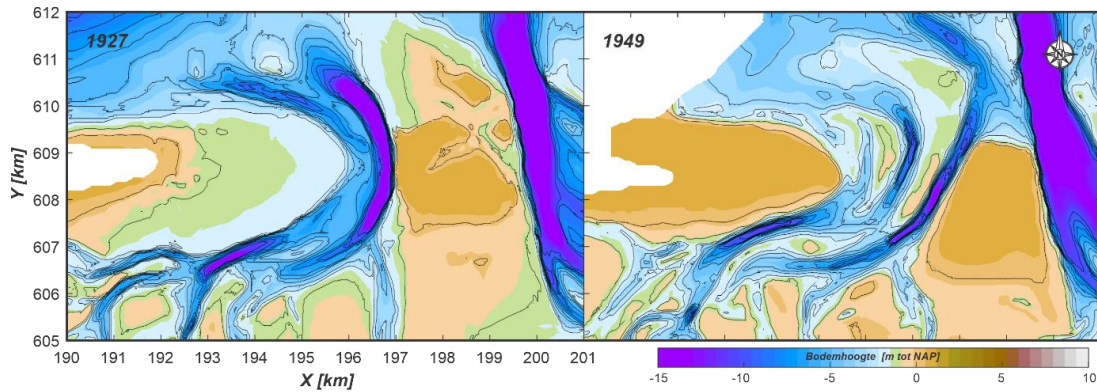
Het Friesche Zeegat is morfologisch een zeer dynamisch gebied. Uit vergelijking van alle hydrografische kaarten van 1832/1834 tot 1927 (Figuur 4.1) en lodingskaarten van 1927 t/m 2019 (Figuur 4.2 t/m Figuur 4.7) blijkt de sterke dynamiek in het geulgedrag in het zeegat en de vloedkom.



(1). Pinkegat geul (2). Sykeplaat (3). Engelsmanplaat (4). Strandgat (5). Wierumergat (6). De Hon

Figuur 4.1 Ontwikkeling van het Pinkegat in de periode 1832/1834 - 1927 op basis van de hydrografische kaarten.

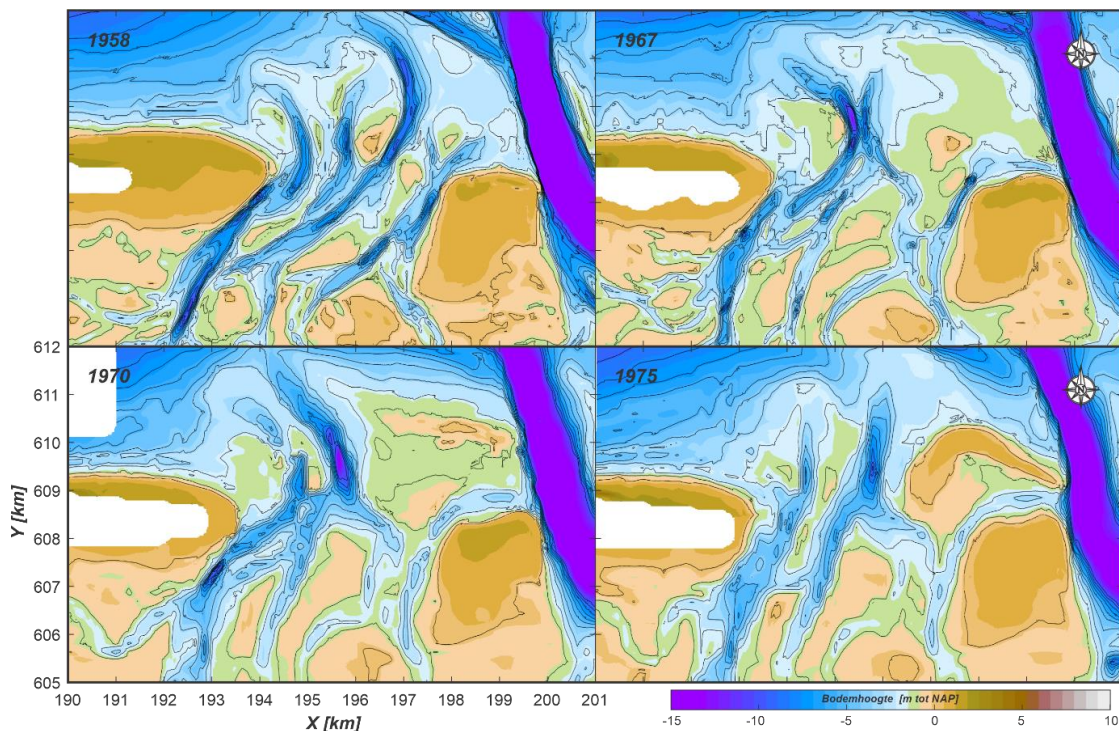
Uit bestudering van deze kaarten in samenhang met het groeien en eroderen van het oostpunt van Ameland (Eysink e.a., 2000) blijkt dat het gedrag van De Hon in sterke mate wordt bepaald door het geulgedrag in de vloedkom en het zeegat van het Pinkegat. Rond 1910 was De Hon niet meer dan circa 1 km lang vanaf de Oerderduinen. Daarna voltrok zich, mogelijk mede door de aanleg van de Kooioerdstuifdijk in de periode 1880-1893, een sterke groei naar het oosten. De peilkaart uit 1927 toont dat de hoofdgeulen op het wad toen min of meer van west naar oost liepen en pas op grote afstand van De Hon naar het noorden afbogen. De afstroming van het water naar zee vormde hierdoor een minimale hinder voor de groei van De Hon. Ook waren er geen vloedcharren aan de Noordzezijde van De Hon, waardoor ook de vloedstroom geen aanval op De Hon deed. De omstandigheden voor groei waren toen dus optimaal.



Figuur 4.2 Pinkegat in 1927 en 1949

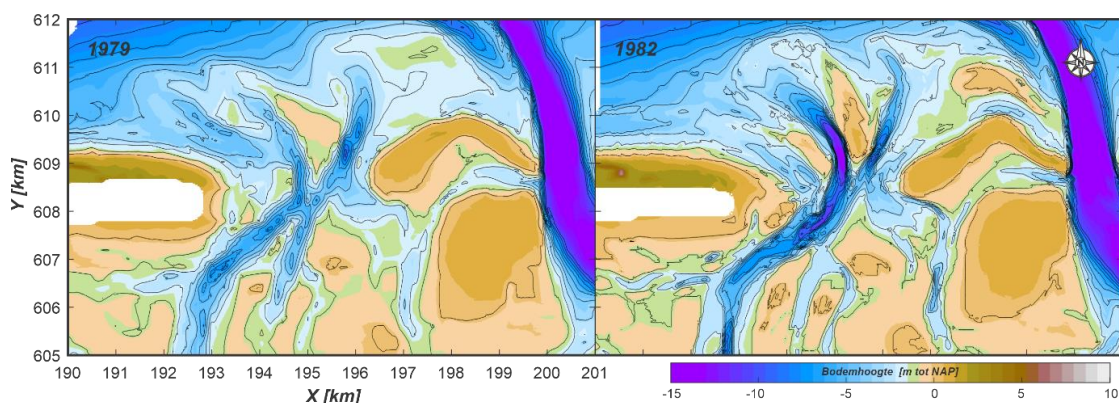
Rond 1940 - 1950 had De Hon een maximale uitbreiding naar het oosten (Figuur 4.2). De peilkaart uit 1949 laat zien dat de hoofdgeul op het wad zich in tweeën had gesplitst en dat de noordelijke tak dicht onder Ameland was komen te liggen. Ook was de geul iets meer linksom gedraaid. Daarnaast was de grote geul Pinkegat opgesplitst in drie geulen, waarvan de meest westelijke dicht bij De Hon was komen te liggen. Met deze geulontwikkeling was de aanval op De Hon ingezet.

In 1958 was de noordelijke geul in de Waddenzee nog verder linksom gedraaid en had zich een nog westelijker liggende geul in het zeegat ontwikkeld (Figuur 4.3). Door deze geulontwikkelingen nam De Hon vervolgens tot 1975 - 1980 weer af tot een minimum. In 1975 lag de Holwerderbalg maximaal linksom gedraaid.



Figuur 4.3 Pinkegat in 1958, 1967, 1970 en 1975

In 1979 was de Holwerderbalg al weer een stuk teruggedraaid, maar inmiddels had zich aan de noordzijde van De Hon een vloodschaar ontwikkeld die de groei van De Hon nog tegenhield (Figuur 4.4). In die fase had De Hon een lengte van circa 3 km.

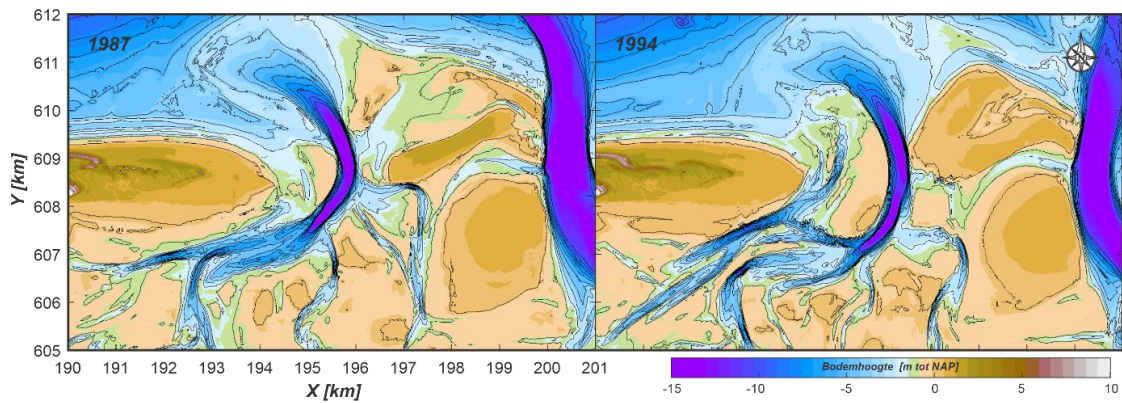


Figuur 4.4 Pinkegat 1979 en 1982

In 1982 was de omvang van de vloodschaar afgenomen en werden de condities langzamerhand weer gunstig voor groei van het oostpunt van Ameland.

Vanaf ongeveer 1987 stagneerde de groei (Figuur 4.5) door de ontwikkeling van een secundaire geul net ten oosten van De Hon. Het duurde echter nog tot 1999 voordat de Hon korter begon te worden.

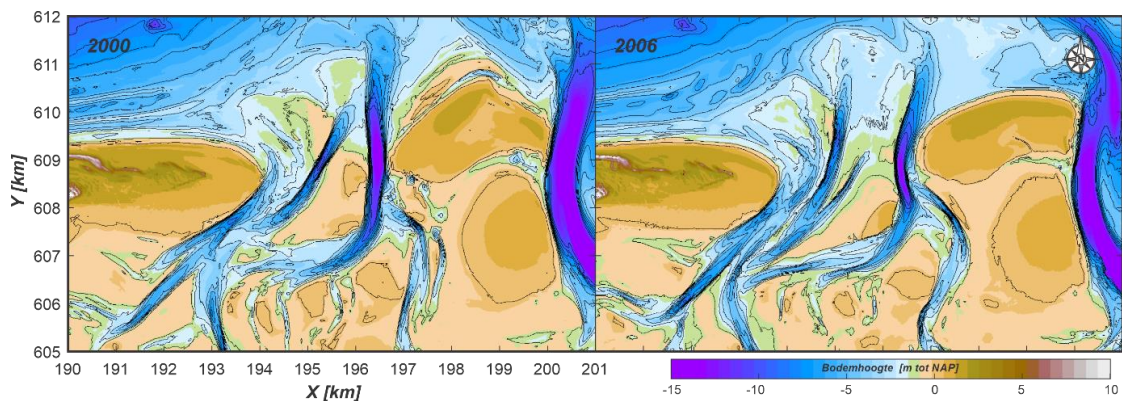
In 1987 was de Holwerderbalg aansluitend op het Pinkegat bijna van west naar oost georiënteerd en stroomde het meeste water via het diepe Pinkegat af naar zee.



Figuur 4.5 Pinkegat in 1987 en 1994

Van 1987 tot 1994 ontwikkelen de vertakkingen van de Holwerderbalg op het wad zich zodanig dat steeds meer water via de secundaire geul tussen Pinkegat en De Hon gaat afstromen naar zee.

Het Pinkegat migreerde tot circa 2000 steeds verder naar het oosten. Vanaf 1994 nam het Pinkegat langzaam in omvang af, terwijl de Holwerderbalg zich steeds verder ging ontwikkelen. In 2000 is het Pinkegat sinds 1994 nog circa 140 m verder naar het oosten verschoven en nog wat in omvang afgenomen (zie Figuur 4.6) De zeewaartse kant is verder naar het oosten gedraaid en wijst dan recht naar het noorden. In 2005 is de positie van het Pinkegat ter hoogte van kmr 608,8 niet verder naar het oosten gemigreerd, maar is de geul wel in grootte afgenomen. De secundaire geul (Holwerderbalg) heeft zich in de periode 1994-2006 sterk ontwikkeld tot een brede en lokaal diepe geul Figuur 4.6

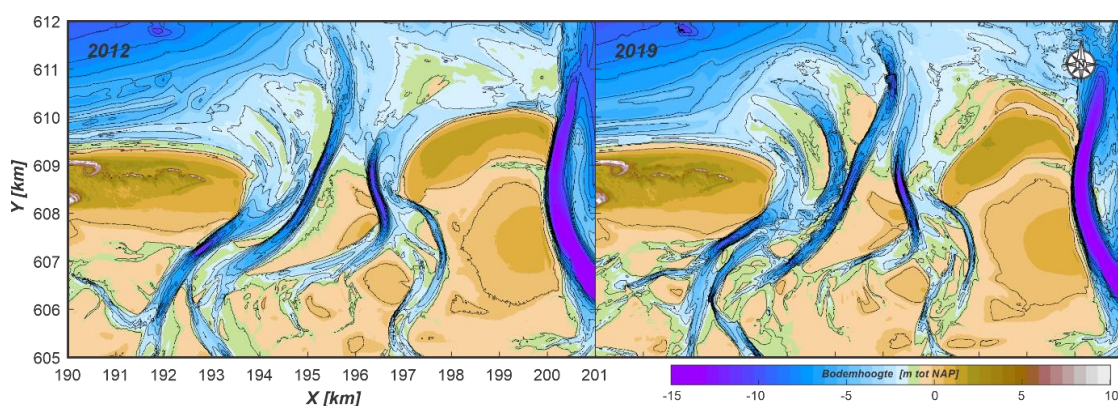


Figuur 4.6 Pinkegat in 2000 en 2006

In 2006 was het nieuwe zeegat verder verbreed en had drie geulen. Ook uit de aantakking van de wadgeulen blijkt dat er meer water door de westelijke geul stroomt; het water van de Holwerderbalg stroomt nu vrijwel volledig via deze geul naar buiten.

De diepe tak, die tegen de plaat aan de zuidoost zijde van De Hon ligt, is tussen 1994 en 2003 verder linksom geroteerd door het oostwaarts migreren van de waddegeul en het westwaarts verplaatsen van het deel in het zeegat. Als gevolg hiervan was de GLW-lijn van De Hon in het zeegat in 2000 circa 300 m naar het westen verschoven en in 2003 nog eens circa 150 m. De GLW-lijn van De Hon is tot 2000 aan de Noordzeekant westelijk van kmr. 193,5 (kmp. 25,6) niet noemenswaardig veranderd. In de periode 2000-2003 vond daar echter ook erosie plaats tussen kmr. 191,2 en 193,2 (kmp. 23,5-25,5). De maximum regressie van de GLW-lijn lag rond kmp. 25 en bedroeg circa 70 m.

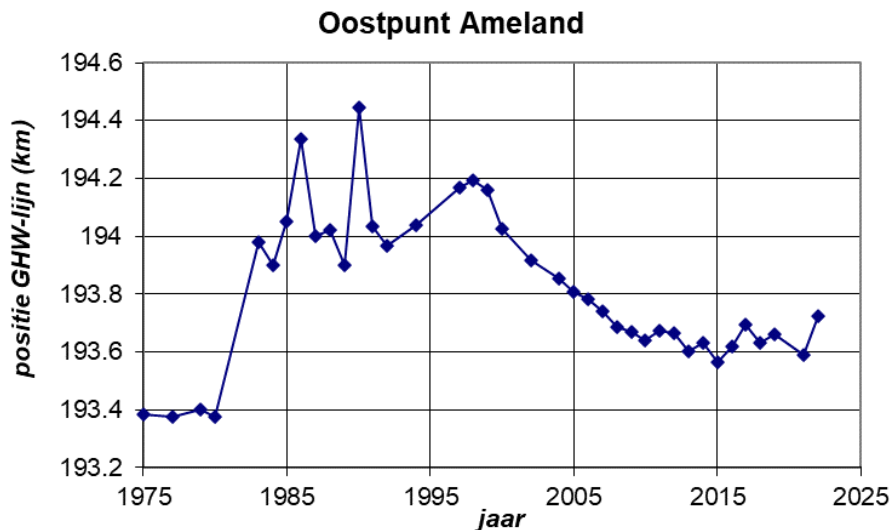
Met de rotatie van de noordwestelijke hoofdtek van de Holwerderbalg in de Waddenzee zijn ook de kleinere geulen op het wad onder De Hon tussen 1994 en 2000 naar het oosten gemigreerd en zijn bovendien in omvang afgenomen. De NAP-lijn ten zuiden van De Hon is in die periode gemiddeld tussen de 50 en 100 m naar het noorden verschoven.



Figuur 4.7 Pinkegat in 2012 en 2019

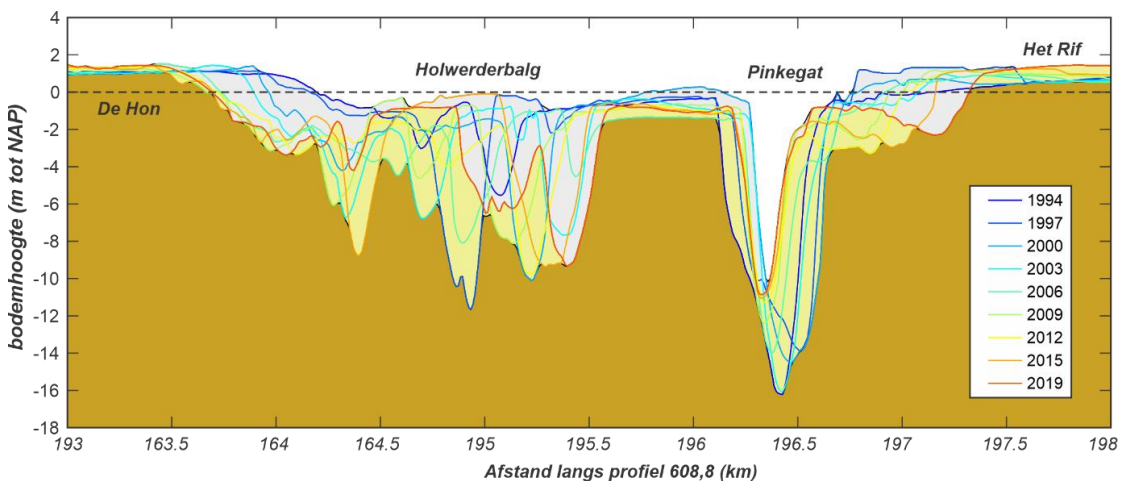
In 2006 lijkt de invloed van het Pinkegat nog wat verder afgenomen te zijn. De Holwerderbalg heeft zich sinds 2000 in meerdere geulen gesplitst, maar in 2012 lijkt het weer tot een enkel geul te ontwikkelen (Figuur 4.7). De hoofdgeul van de Holwerderbalg heeft in 2012 op de buitendelta de functie van het Pinkegat overgenomen. Het ziet er naar uit dat het Pinkegat versneld aan het verdwijnen is (vergelijk 2006 en 2012). Als de Holwerderbalg inderdaad tot een enkel geul zal ontwikkelen en het Pinkegat zal verdwijnen dan zal de situatie weer gunstig worden voor de groei van het oostpunt van Ameland. Maar in 2019 lijkt de meer-geulen karakteristiek zich te behouden: de geulen aan beide kanten naast de hoofdgeul zijn groter geworden dan in 2012 (Figuur 4.7). De meer-geulen karakteristiek zal waarschijnlijk zich blijven behouden zolang het oostpunt van Ameland niet aanzienlijk groeit en het zeegat breed blijft.

Indien de ontwikkeling van het oostpunt van Ameland zich inderdaad cyclisch gedraagt, zoals bij de voorspelling in Eysink . (1987) is aangenomen, dan zou vanaf circa 2010 de groei van het oostpunt van Ameland kunnen omslaan in afslag. In de werkelijkheid is dit proces, dat voornamelijk wordt gedictieerd door het geulgedrag in en rond het zeegat tussen Ameland en Engelsmanplaat, al in 1999 begonnen. Het erosieproces zal niet of nauwelijks door de nog komende extra bodemdaling worden beïnvloed, omdat het grootste deel van de bodemdaling door gaswinning al heeft plaatsgevonden in de groeifase van het oostpunt van Ameland.



Figuur 4.8 West-oost-migratie van het oostpunt van Ameland (toename = groei)

Gebaseerd op een geïdealiseerd cyclisch geulgedrag in het Friesche Zeegat met een periode van 70 à 75 jaar werd vanaf 1980 een groei van De Hon in noordelijke en oostelijke richting verwacht tot 2010. Verwacht werd een groei van meer dan 2 km (zelfde positie als in 1940) en mogelijk zelfs 4 km verminderd met een reductie van circa 375 m als gevolg van zandverlies door de bodemdaling in de Waddenzee (Eysink., 1987). De werkelijke groei sinds 1980 was tot nu toe slechts in de orde van 0,6 à 1 km en de erosiefase van het oostpunt van De Hon rond 1999 is begonnen. De ontwikkeling is ingezet door de geulontwikkelingen aan de wadzijde van het zeegat. Tot 2009 was de aanval op het oostpunt van Ameland in volle gang, zoals vooral blijkt uit de geulontwikkeling in het zeegat (zie Figuur 4.9) Deze laatste toont een forse verschuiving van de laagwaterlijn naar het westen. In 2012 lijkt deze ontwikkeling zich te hebben gestopt. De ontwikkeling van de positie van het oostpunt van Ameland (Figuur 4.8) in de periode 2012-2022 (gebaseerd op Jarkus gegevens) laat de omslag van afslag naar groei nog niet zien; vanaf 2013 is er sprake van een periode van stabilisatie, ondanks de terugtrekking van de kustlijn tussen Km23 en Km25 sinds 2020 (zie Figuur 3.3).



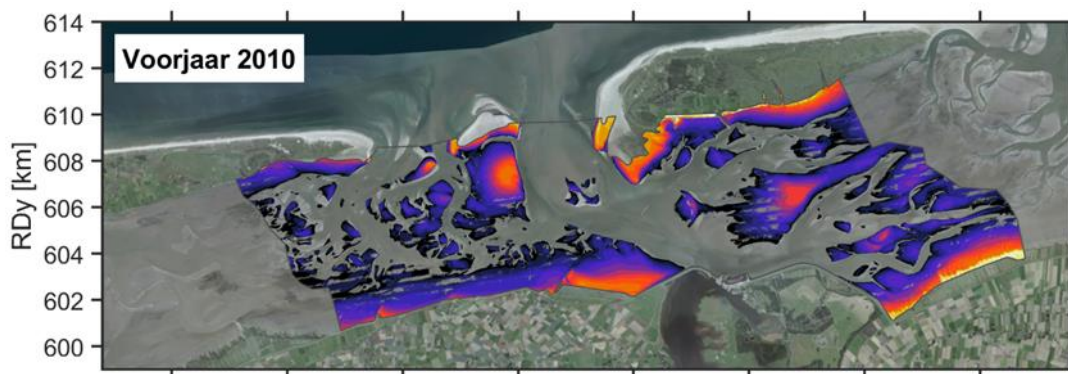
Figuur 4.9 Ontwikkelingen in het zeegat Holwerderbalg/Pinkegat in de periode 1994 – 2005

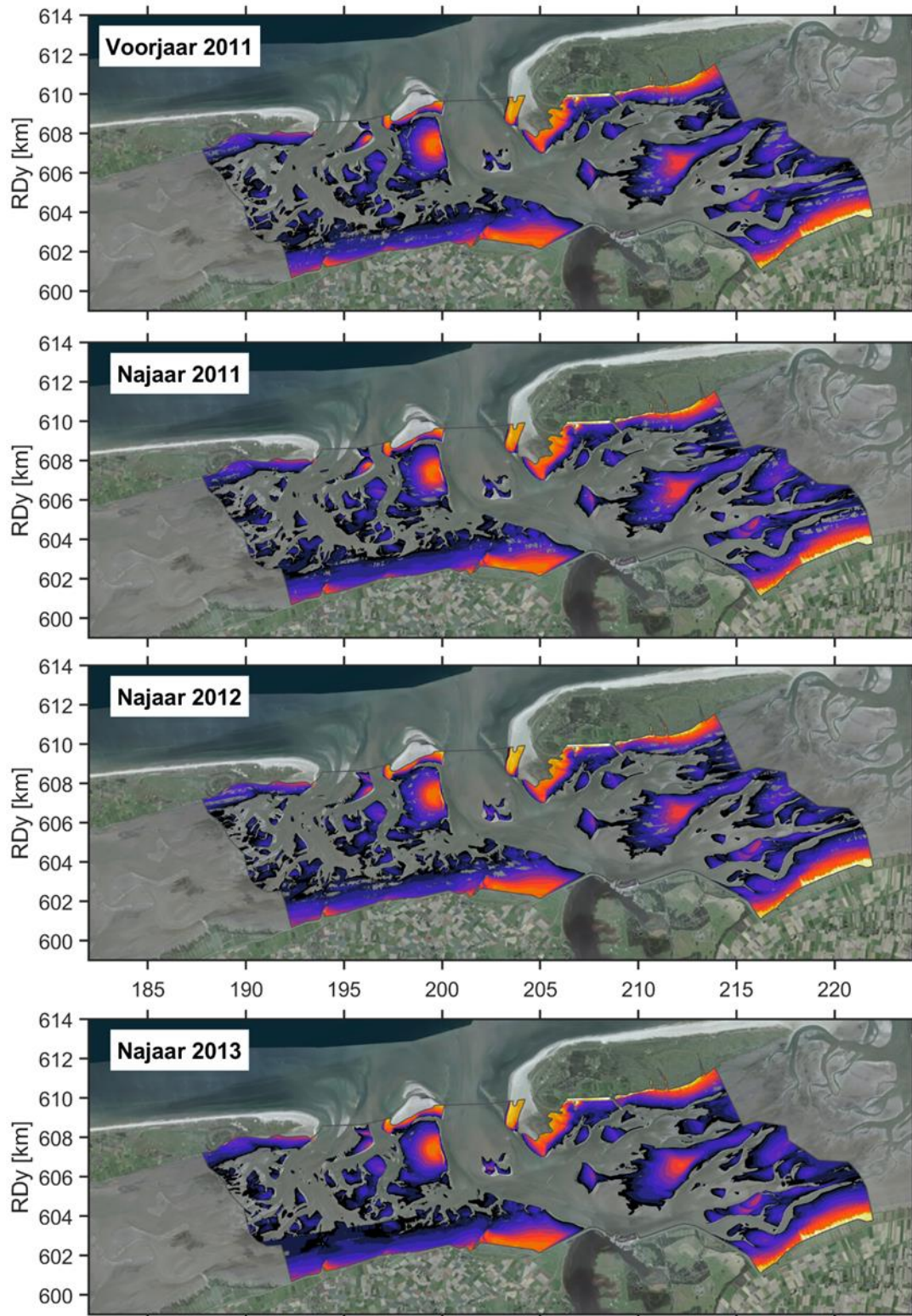
5 Waddenzee

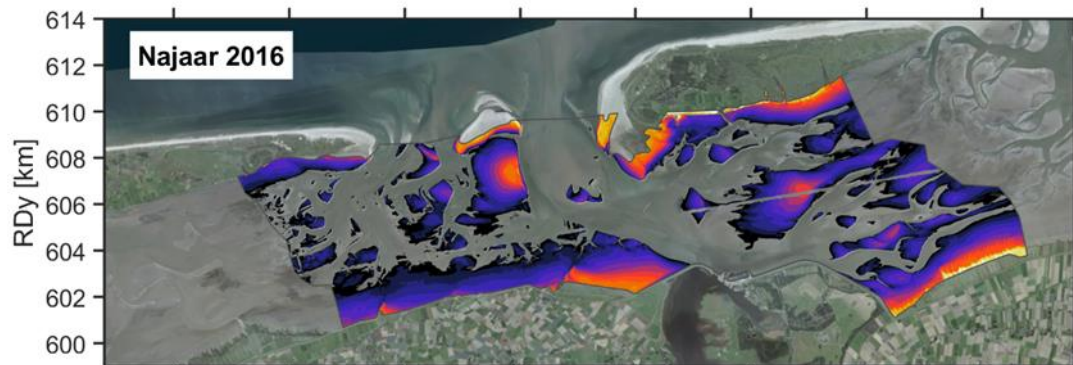
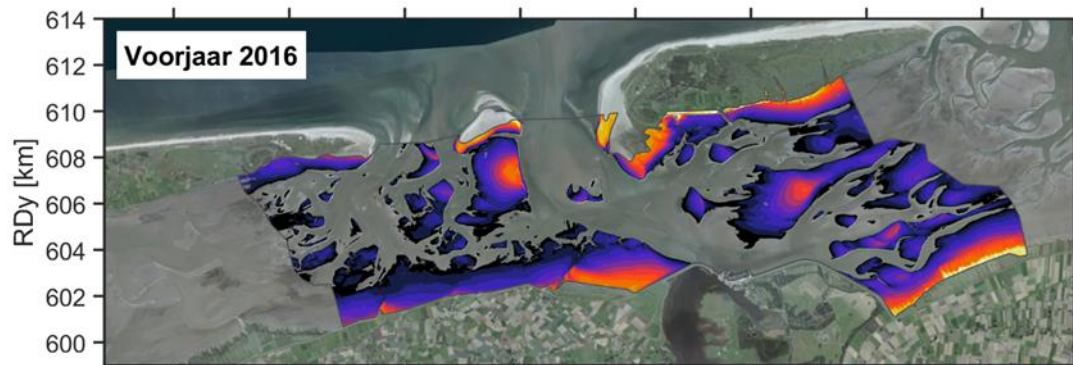
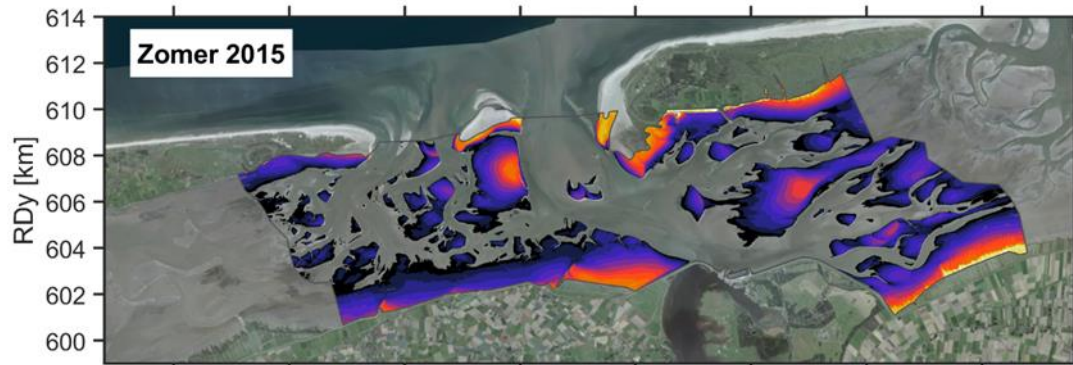
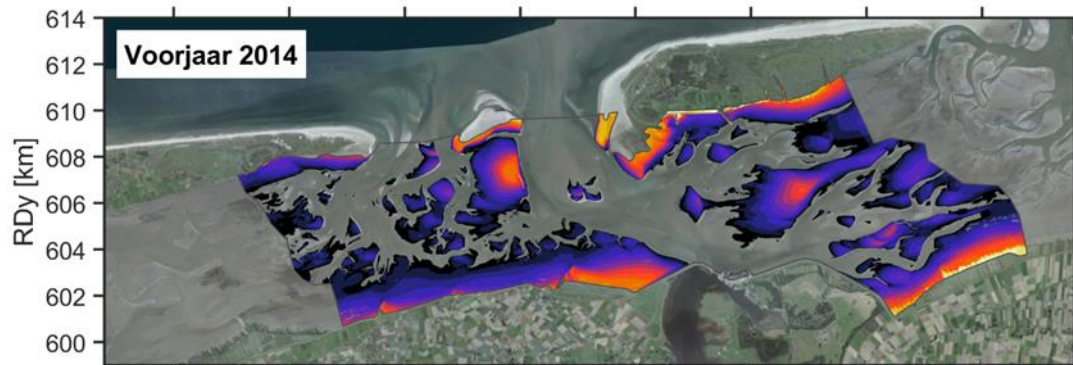
In de vorige rapporten is aangetoond dat het onmogelijk is om compensatie van de bodemdalingsschotel in de Waddenzee door sedimentatie aan te tonen met behulp van de lodingsgegevens. Lokaal lukt dit zeker niet door de grote variaties in bodemniveau als gevolg van de grote dynamiek in het waddensysteem (zie Figuur 2.8). Ook als op een hoger integratieniveau wordt gekeken (volumina), dan blijkt dat de onnauwkeurigheid van het loden (orde 0,1 m) in het totale volume van de vloedkom zo groot is, dat de fout in het verschilvolume van dezelfde orde van grootte is als het bodemdalingsvolume (Eysink e.a., 2000). Hierdoor is het onmogelijk om via peilkaarten een betrouwbare schatting te maken van de verwachte compensatie door sedimentatie; de bodemdaling is hiervoor veel te gering. Deze conclusie wordt indirect ondersteund door gegevens van de vloedkom van het Pinkegat (zie Figuur 2.5). Daaruit blijkt dat het totale sedimentvolume in de vloedkom tussen 1989 en 2019 met 1,4 miljoen m³ zou zijn afgenomen. De volumevermindering komt overeen met een gemiddelde verdieping van de vloedkom van minder dan 3 cm (ofwel minder dan 1 mm/jaar) hetgeen ver binnen de onbetrouwbaarheidsmarge van het loden ligt.

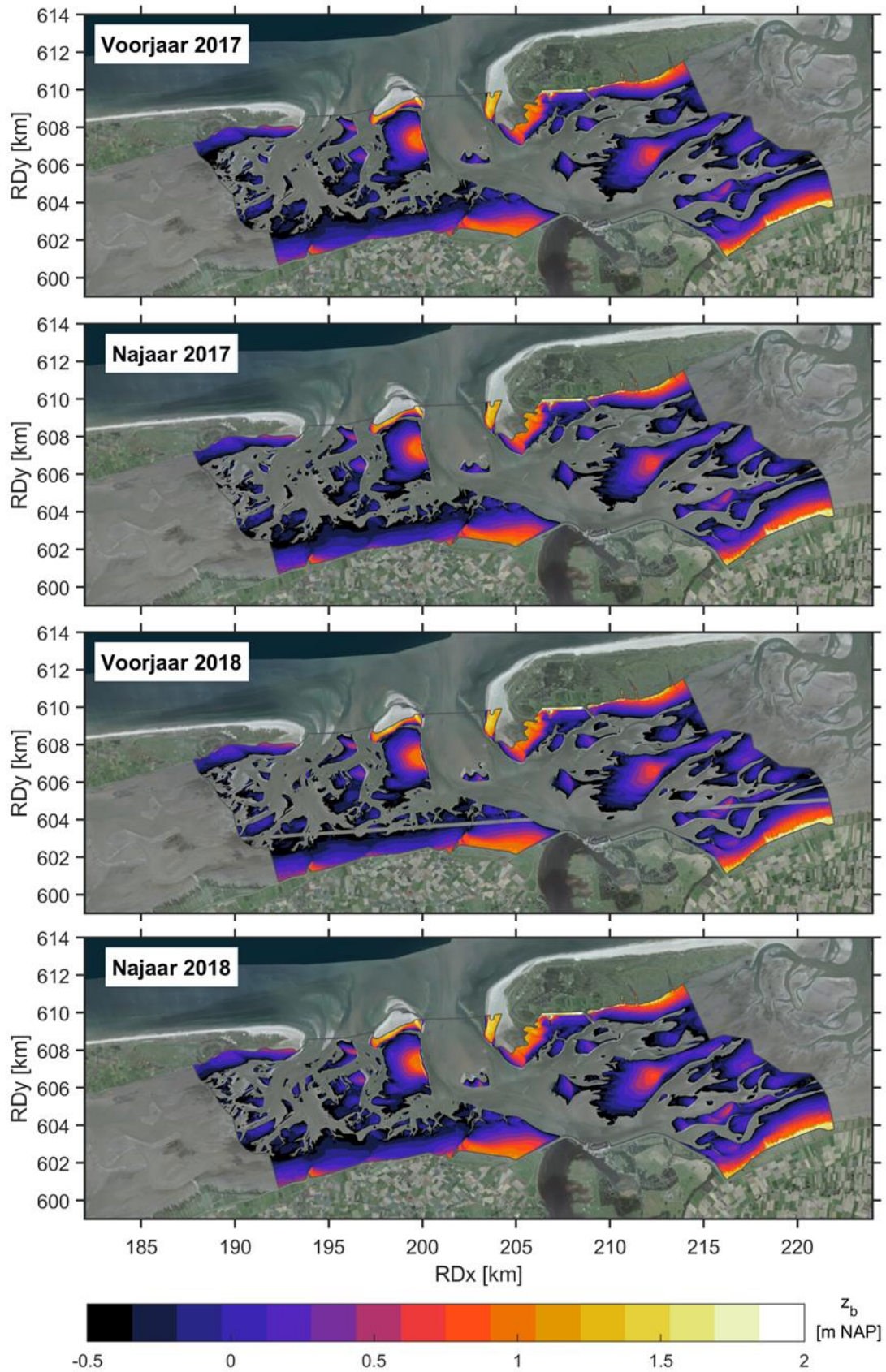
Het belangrijkste waddegebied dat door bodemdaling zal verlagen ligt op het Pinkewad direct onder de Hon, de Oerderduinen en het Nieuwlandsrijd. Omdat de platen minder dynamisch zijn dan de geulen en plaatranden, hebben de meetdienst van RWS en de NAM samen geprobeerd om hoogteveranderingen van deze platen via waterpassen en GPS-metingen te meten. Op deze wijze werd gepoogd een betrouwbaar verloop van de plaathoogte te meten. Vergelijking van dit verloop met de uit de nauwkeurigheidswaterpassingen op het eiland herleide bodemdaling zou dan een indruk van de compensatie door sedimentatie kunnen geven. In de praktijk bleek de nauwkeurigheid van de metingen echter in de orde van 1 tot 2 cm te liggen. Dit is evenveel of meer dan de jaarlijkse daling in het gebied. Ook deze methode bleek dus slecht bruikbaar om compensatie door sedimentatie aan te tonen. Om deze reden is hier in dit verslag verder geen aandacht aan besteed. De 'Spijkermetingen' uitgevoerd door Natuur Centrum Ameland geven wel nauwkeurige informatie over de snelheid van sedimentatie op een aantal punten op het Wad. Deze metingen worden apart gerapporteerd door Natuur Centrum Ameland in Hoofdstuk 6.

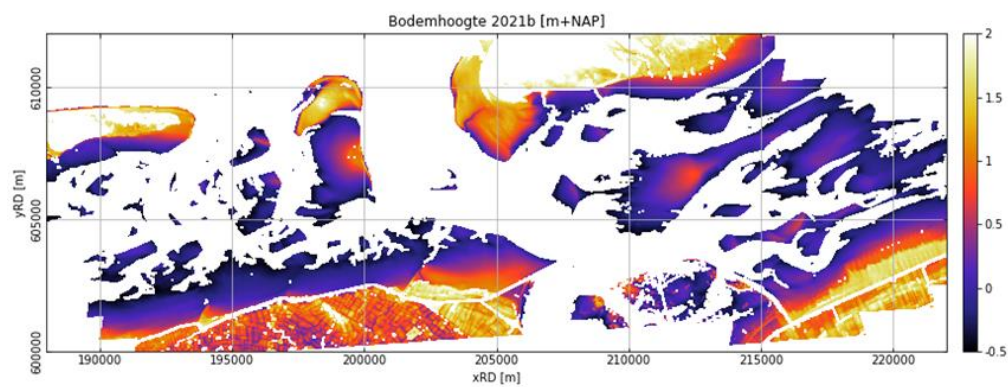
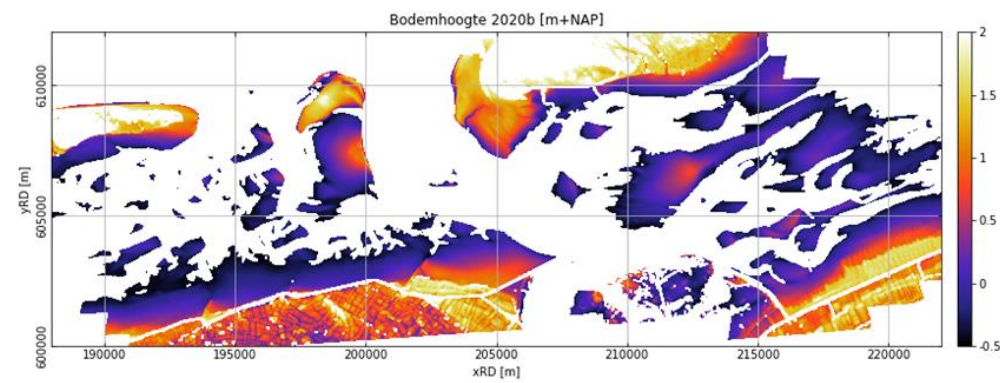
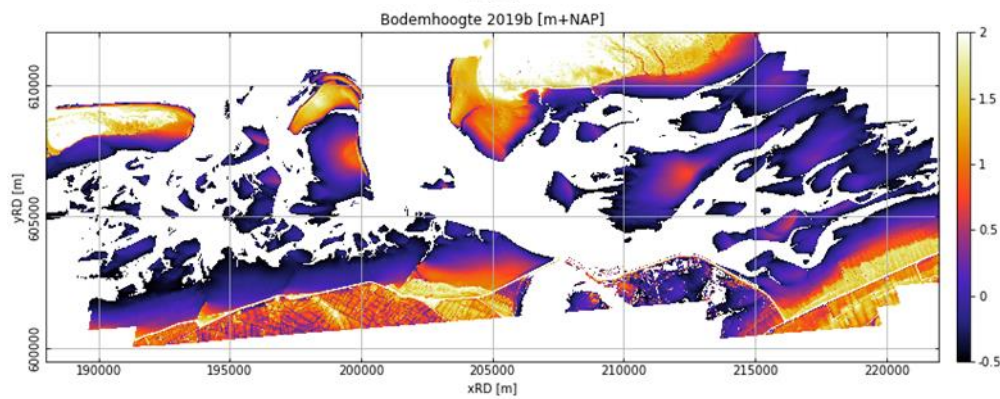
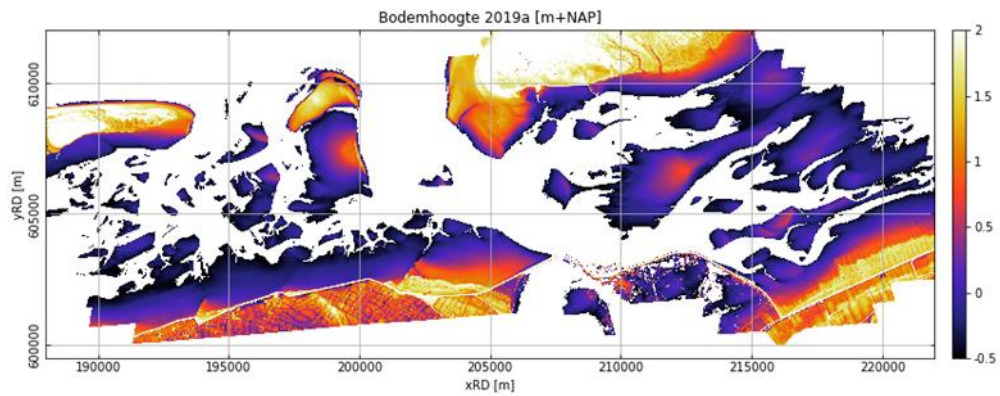
Binnen het kader van de monitoring effect bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee worden vanaf 2010 Lidar opnames gedaan voor het hele Friesche Zeegat. Tot nu toe zijn er achttien bruikbare opnames gedaan en geanalyseerd (Wang e.a., 2010; Cronin en Wang, 2012; Elias e.a., 2013; Arentz en Vroom, 2014; Schrijvershof en Vroom, 2016; Schrijvershof e.a., 2017; Schrijvershof e.a., 2018; Van der Lugt e.a., 2019, 2020; van der Vegt en Van de Lugt, 2021, 2022; Gawehn, 2023). De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Figuur 5.1.

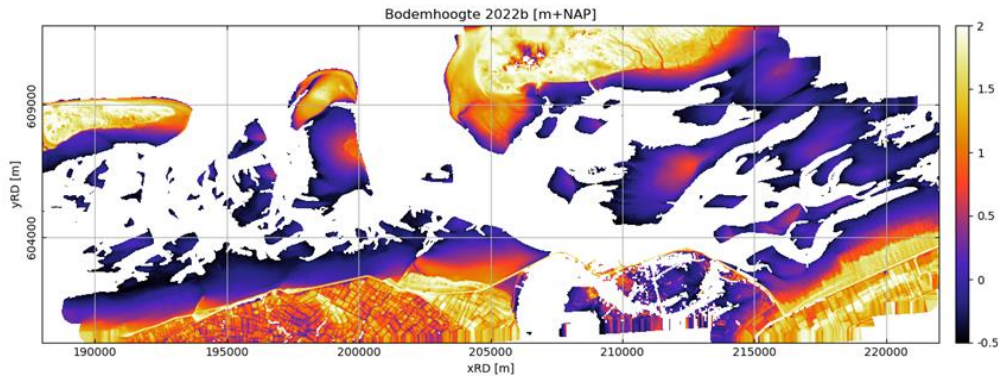




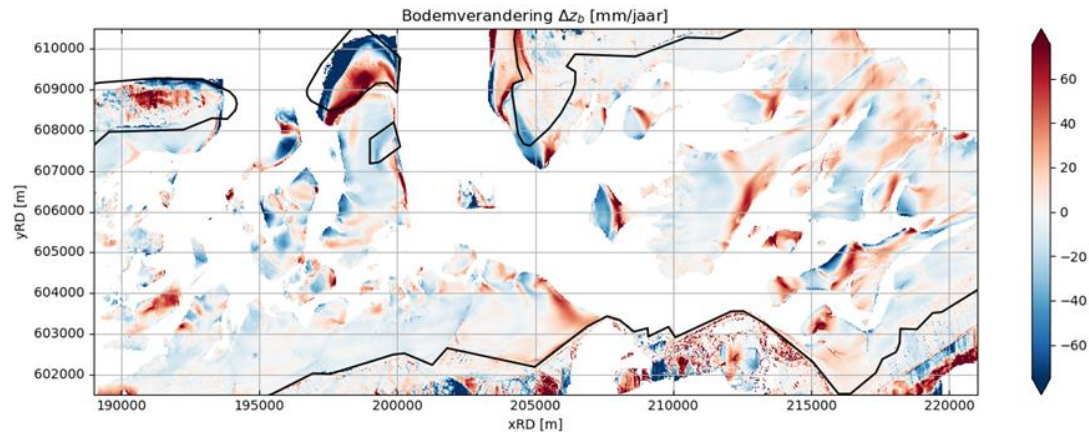








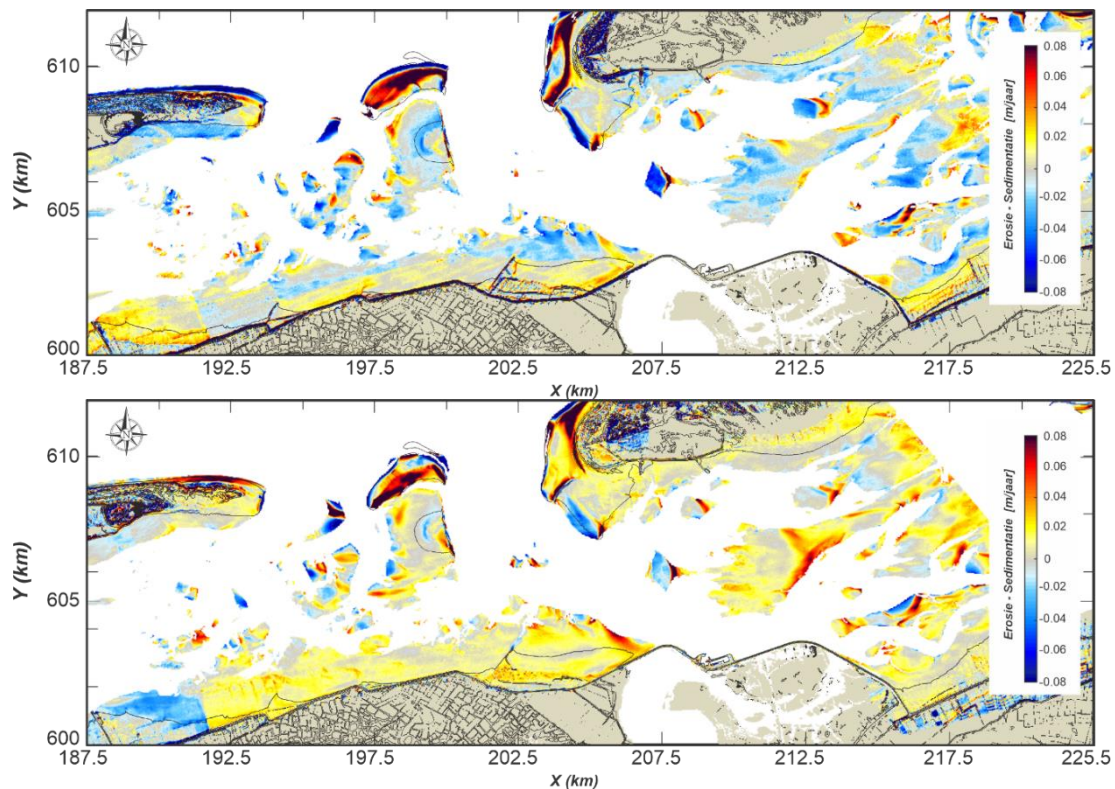
Figuur 5.1 Visualisatie van alle LiDAR opnames (2010 t/m 2022) op een 10m x 10m roostercel.



Figuur 5.2 De gemiddelde verandering in bodemhoogte (mm/jaar) zoals berekend per roostercel (10x10m) op basis van de tijdserie 2010-2022. Blauwe kleuren geven verlaging weer, rode kleuren sedimentatie. Cellen waar minder dan 8 waarnemingen aanwezig waren in de tijdreeks zijn uitgesloten van de berekening en blijven dus wit (geen data). (Uit Gawehn, 2023).

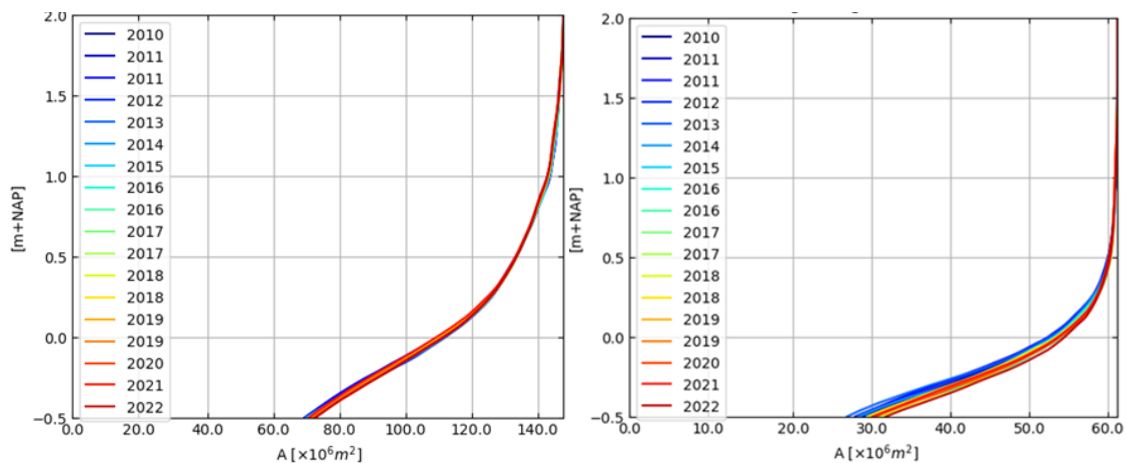
Tijdsgemiddelde bodemhoogteveranderingen zijn weergegeven in Figuur 5.2, op basis van de lineaire trend berekend uit alle metingen voor elke roostercel van 10x10m. Migratiepatronen domineren het verkregen beeld. De grootste veranderingen zijn de aanlanding van het Rif op de Engelsmanplaat waardoor het Oude Smerig Gat (OSG) verzandt. Er vindt sterke erosie plaats aan de oostzijde van het Binnenplaatgat en het Roode Hoofd migreert sterk oostwaarts.

De snelheden van sedimentatie-erosie kunnen ook worden afgeleid uit de verschillende vakklodingen die gemiddeld iedere zes jaar worden gemeten. Het beeld van de veranderingen wordt gedomineerd door veranderingen (vooral migratie) van de geulen (Figuur 2.6). Als wij op de platen inzomen Figuur 5.3) lijkt de patroon van de veranderingen meer op die afgeleid van de lidar metingen, maar de veranderingen fluctueren sterk tussen de opeenvolgende perioden t.g.v. waarschijnlijk de meeton nauwkeurigheden.



Figuur 5.3 Erosie/sedimentatiesnelheden (mm/jaar) afgeleid van de vaklodingen data. Boven van 2012 ten opzichte van 2006; onder: van 2019 ten op zicht van 2012.

De metingen kunnen ook worden gebruikt om de hypsometrie van bijvoorbeeld een vloedkom te bepalen (Figuur 5.4). Merk op dat alleen de informatie boven een bepaalde hoogte is betrouwbaar (dit is geschat als boven NAP-0,5 m). Dat blauwe curven boven rode curven liggen suggereert een afname in hoogte, maar de afname is relatief klein.



Figuur 5.4 Hypsometrische curves voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag (links) en Pinkegat (rechts) voor alle LiDAR opnames

6 Wadplaat sedimentatie bij Ameland

6.1 Inleiding

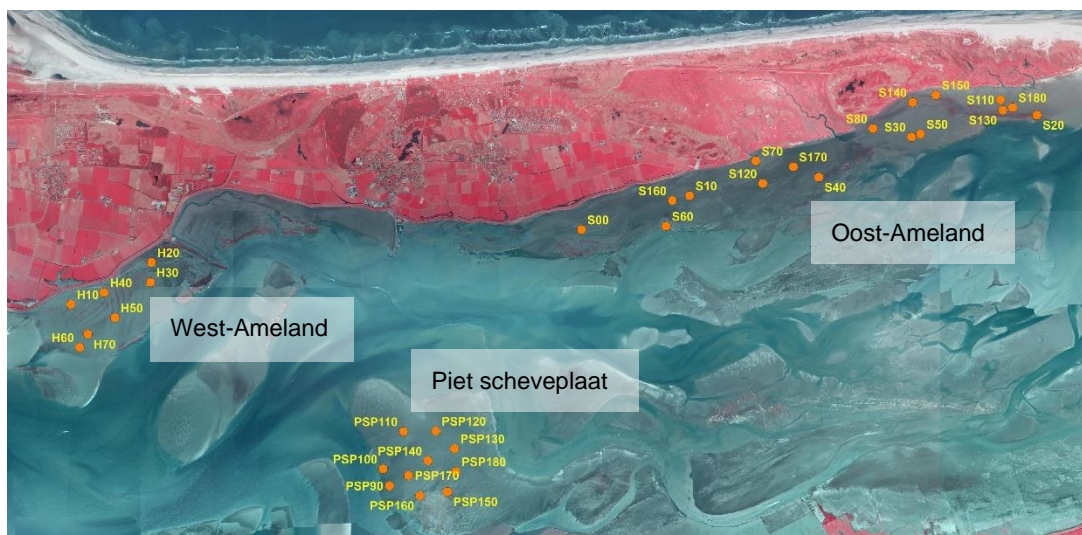
Ten gevolge van aardgaswinning onder Oost-Ameland vindt sinds 1986 diepe daling plaats in het nabijgelegen deel van de Waddenzee (Ketelaar, 2011; de Vlas 2017). Om de mogelijke effecten te onderzoeken is een uitgebreid monitoringprogramma opgesteld.

In dit rapport worden de resultaten van de monitoring betreffende de wadplaat sedimentatie behandeld en geëvalueerd. Het effect van de bodemdaling kan worden gecompenseerd door sedimentatie, maar het kan ook versterkt worden door erosie. Om vast te kunnen stellen hoeveel sedimentatie en/of erosie er in het bodemdalingsgebied optreedt zijn er meetstations ingericht. Tevens zijn, als referentie, ook meetstations ingericht op twee wadplaten zonder bodemdaling. Door de steeds langere reeks van meetjaren wordt steeds beter inzicht verkregen in de lokale dynamiek en de resultante van diepe daling en sedimentatie in een wadplaatgebied van ongeveer 8 km lengte langs de kust van Oost-Ameland. Daarnaast kunnen de resultaten vergeleken worden met de (iets kortere) meetreeksen in de referentiegebieden.

Droogvallende wadplaten vormen een uiterst belangrijke schakel in diverse voedselketens in de Waddenzee. Het best zichtbare voorbeeld daarvan is het intensieve gebruik door vogels, waarvan veel soorten in grote aantallen lopend foerageren op de wadplaten (Kersten et al., in de Vlas 2017). Verlaging van wadplaten kan van invloed zijn op de leefomstandigheden van bodemdieren en de foerageer omstandigheden van wadvogels.

6.2 Materiaal en methode

In het gebied ten zuiden van Oost-Ameland wordt de sedimentatie aan het wad oppervlak sinds 2000 gemeten op 17 locaties (Figuur 6.1 en Figuur 6.7). In 2006 is een gebied ten zuiden van West-Ameland met 7 meetstations aan het meetprogramma toegevoegd als referentiegebied zonder bodemdaling (Figuur 6.1 en Figuur 6.8). In 2014 is als tweede referentiegebied de Piet Scheveplaat toegevoegd met 10 meetstations (Figuur 6.1 en Figuur 6.9).



Figuur 6.1 Een overzicht van het onderzoeksgebied bij Oost-Ameland en de beide referentiegebieden West-Ameland en Piet Scheveplaat, met de meetstations op een infrarood luchtfoto ingetekend.

Om sedimentatie aan het wadoppervlak te kunnen meten is een methode ontworpen waarbij grondankers tot ongeveer 90 cm in de bodem worden geschroefd. Aanvankelijk werden hiervoor grote bouwmarktschroeven gebruikt, later is overgestapt op een nog zwaardere eigenbouw schroef als grondanker (Figuur 6.2). Een meetstation op het wad bestaat uit 4 grondankers (Figuur 6.3) die in een vierkant rond een middelpuntmarkering staan. De afstand van het grondanker tot het middelpunt is ruim 1 meter in de richting van de vier windstreken. Ieder meetstation is met een hand-GPS ingemeten. Vanaf het grondanker loopt een dyneema (niet rekbaar) touw naar het oppervlak en steekt daar ongeveer 40 cm uit met aan het eind een markering en een aluminium ring die gebruikt wordt om de afstand tot de bodem te meten (Figuur 6.6) en daarmee ook de verandering ten opzichte van de vorige meting te bepalen. Dit dyneema materiaal is langdurig (2 jaar) in zout water van het aquarium in het Natuurcentrum Ameland ondergedompeld en regelmatig gemeten. Hierbij is geen enkele krimp of rek vastgesteld. Teneinde een check op de stabiliteit van de ondergrondse ankers te hebben zijn ze twee aan twee waterpas geplaatst. Dit wordt gedaan door de bovengrondse meetringen waterpas aan de dyneema lijnen te bevestigen (Figuur 6.4) en in de loop van de tijd te blijven meten of dit systeem waterpas blijft (Figuur 6.5). Dit is bij vrijwel alle stations het geval. Een enkele keer ontstaat er na verloop van tijd (soms jaren) een klein verschil van 1-2- cm. Dat wordt bij de verwerking van de data gecompenseerd.

Aanvankelijk werd in plaats van een aluminium ring een plastic label gebruikt maar deze zijn minder duurzaam en reageren niet op een metaaldetector. Indien de afleesring/label niet aan het oppervlak zichtbaar is wordt een metaaldetector gebruikt om deze onder het oppervlak op te sporen waarna de dyneema lijn met een haakje uit het sediment wordt gehaald. De metingen vinden 6 maal per jaar plaats waarbij gestreefd wordt naar metingen in de laatste decade van februari, april, juni, augustus, oktober en december. De meetstations worden tijdens laagwater lopend over het wad bezocht. Indien een label van een grondanker langere tijd onvindbaar is, wordt een nieuw grondanker geplaatst en telt de eerste meetwaarde na tenminste 2 maanden weer mee. De methode werkt prima op wadplaten die weinig dynamisch zijn en de sedimentatie of erosie kan tweemaandelijks op millimeterniveau (Figuur 6.6) worden gevolgd. Hierbij wordt een goede indruk gekregen van de sedimentatie in de tijd waarbij vooral ook duidelijk wordt wat lokaal de natuurlijke variatie is. Naarmate de meetreeksen zich uitstrekken over een langere periode winnen ze aan kracht.

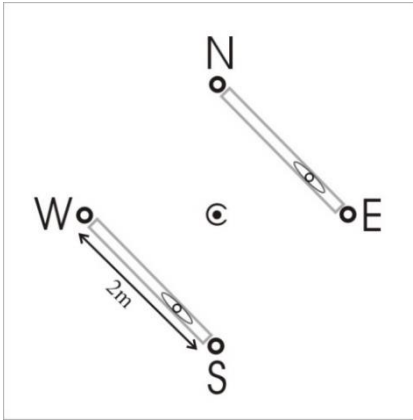
Indien een gebied erg dynamisch is en er over een periode van enkele maanden niveauveranderingen in een grootteorde van een decimeter plaatsvinden raken de meetringen en touwtjes snel onvindbaar. In een dergelijk gebied kunnen beter andere methodes worden ingezet om sedimentatie/erosie te volgen in de tijd. In het onderzoeksgebied Oost-Ameland is per meetlocatie (S00 t/m S150) sprake van een duplo meetstation op 10 m onderlinge afstand waardoor per meting 8 grondankers opgemeten worden. Dit werd aanvankelijk gedaan vanwege regelmatige verstoring van de meetstations door machinale kokkelvisserij. Deze kokkelvisserij is sinds 2005 gestopt en alle grondankers worden nu in de metingen opgenomen. In het referentiegebied West-Ameland bestaat een meetstation uit een enkele set van 4 grondankers.



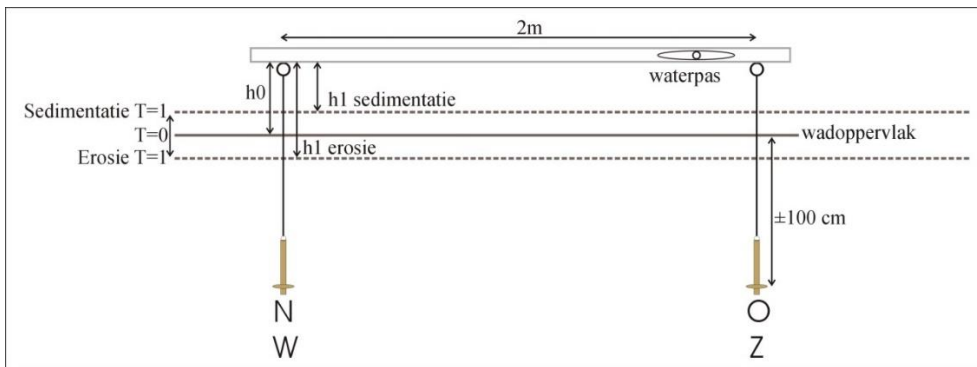
Figuur 6.2 Eigenbouw grondanker waaraan niet rekkend meetouw bevestigd wordt. Rechts de dop aan het uiteinde van de T-grondboor waarmee het anker in de bodem geschroefd wordt (Figuur 6.3).



Figuur 6.3 De 4 grondankers die ongeveer 80-100 cm onder het oppervlak worden geschroefd. Hieraan is een dyneema lijn met aan het bovengrondse deel een identificatieblikje en aluminium afleesring bevestigd (Figuur 6.6)



Figuur 6.4 Verticale aanblik van een meetstation met 4 grondankers (noord, oost, zuid, west). Per tweetal (N-E en W-S) zijn de metingen aan de bovengrondse dyneema lijnen waterpas gezet als check op nazakking.



Figuur 6.5 Horizontale aanblik van een meetstation en principeschema van de meetmethode om wadsedimentatie te monitoren. Indien na verloop van tijd een langere afstand tussen metring en wadbodem gemeten wordt is er sprake van erosie. Andersom is er sprake van sedimentatie. Er ontstaat dus een meetreeks waarbij de afwijking van de beginmeting in de tijd wordt gevolgd

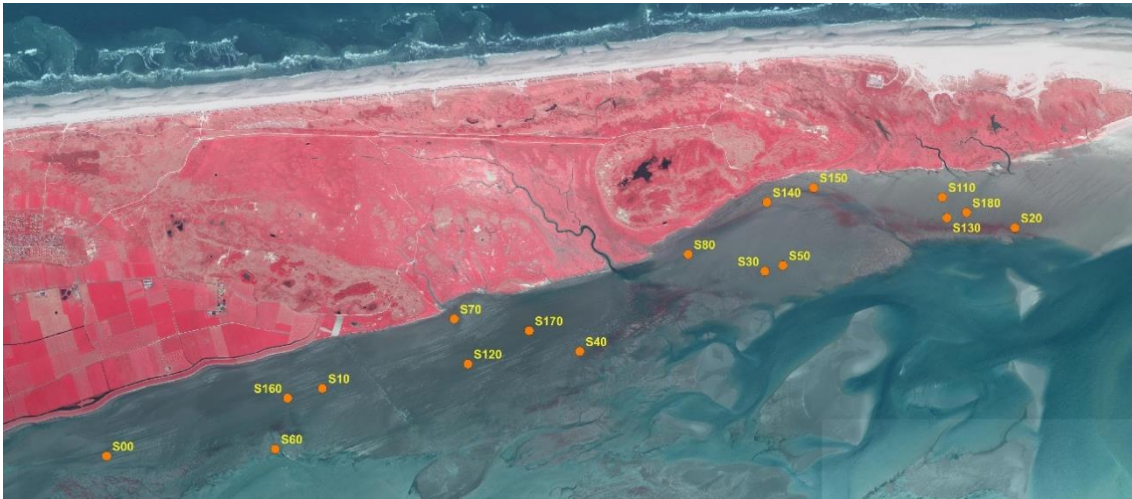


Figuur 6.6 Meetliniaal met brede meetvoet (niet zichtbaar). Deze wordt steeds op dezelfde wijze op de bodem gezet waarna de lengte van de dyneema lijn langs de schaal wordt afgelezen. In dit geval 45,1 cm.

6.3 Onderzoeksgebieden en meetstations

6.3.1 Bodemdalingsgebied Oost-Ameland

De eerste metingen zijn in 2000 begonnen in het bodemdalingsgebied ten zuiden van Oost-Ameland (Kersten 2002; Tabel 6.1). Vanaf 2004 zijn hier 16 meetstations ingericht (Figuur 6.7) waarbij er steeds sprake is van een duplo vanwege mogelijke verstoring door mechanische kokkelvisserij. Sinds 2005 is deze visserij verboden. Het gebied valt binnen de bodemdalingschotel vanwege de gaswinning onder Oost-Ameland. De meetstations zijn 'op het oog' daar neergelegd waar het terrein geschikt leek voor plaatsing. Hierbij is steeds gekozen voor een zo vlak mogelijk groot gebied rond het meetstation zodat de meting ook iets zegt over sedimentatie van een zo groot mogelijk gebied rondom. De diepe ondergrond in het onderzoeksgebied is sinds 1986 tot 2022 ruim 37 cm (S150) tot ruim 3 cm (S00) gedaald volgens berekening met het NAM-model Ameland_GRIDS_2020. Het meetstation S100 is in 2009 door geulvorming verloren gegaan. Het station S60 is in het voorjaar van 2022 verloren gegaan door werkzaamheden aan de elektriciteitskabel van de vaste wal naar Ameland. In 2011 zijn er drie nieuwe stations (S160 t/m S180) tussengevoegd en deze bestaan ieder uit 4 grondankers. In tabel 1 staan ook de NAP-hoogten van de wadplaat bij de meetstations. Deze zijn in 2013 ingemeten met een RTK/DGPS ontvanger waarbij de meetfout maximaal 20 mm bedraagt.



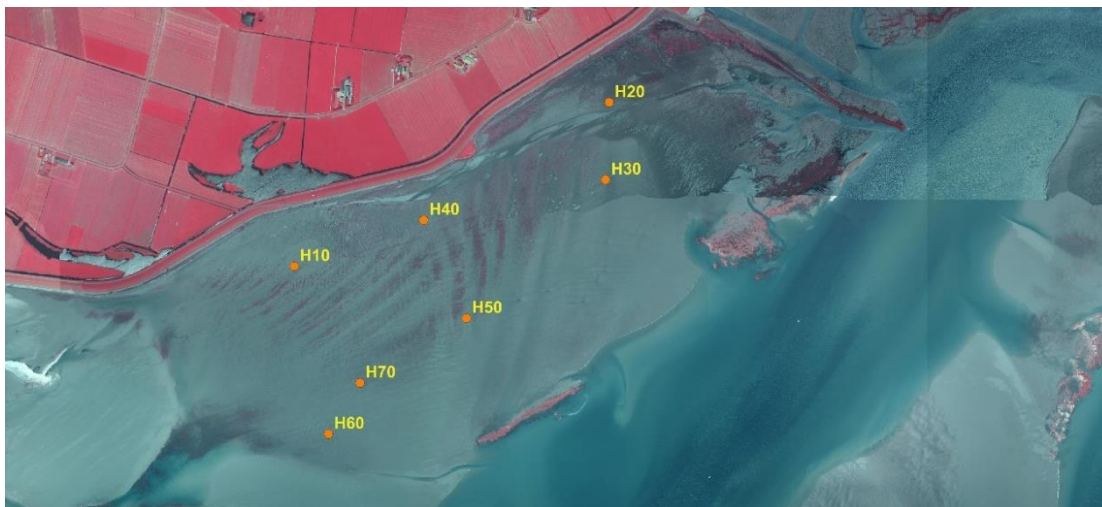
Figuur 6.7 Luchtfoto (infrarood) met 17 meetstations bij Oost-Ameland ingetekend

Tabel 6.1 Coördinaten en hoogteligging van meetstations Oost-Ameland.

LOCATIE	X	Y	Z (cm NAP) 2013	Datum plaatsing
S00	183.915	605.684	-43,6	30-7-2000
S10	185.751	606.260	-3	8-8-2000
S20	191.644	607.626	-9,9	11-8-2000
S30	189.516	607.256	-3,7	11-8-2000
S40	187.941	606.574	-16,7	11-8-2000
S50	189.670	607.305	-5,3	6-3-2001
S60	185.350	605.743	-52,8	27-3-2002
S70	186.873	606.850	4,9	27-3-2002
S80	188.863	607.400	4,7	27-3-2002
S110	191.027	607.886	18,4	27-3-2002
S120	186.990	606.467	-2,5	20-3-2003
S130	191.065	607.710	-5,2	20-3-2003
S140	189.534	607.843	20,3	1-3-2004
S150	189.931	607.967	25,1	1-3-2004
S160	185.456	606.177	-8,7	7-11-2011
S170	187.510	606.750	0,3	20-12-2011
S180	191.233	607.756	-0,3	24-10-2011

6.3.2 Referentiegebied West-Ameland.

Als referentiegebied zonder bodemdaling is op het wad ten zuiden van West-Ameland in 2006 een zestal meetstations ingericht. In 2012 is hieraan station H70 toegevoegd (Figuur 6.8).



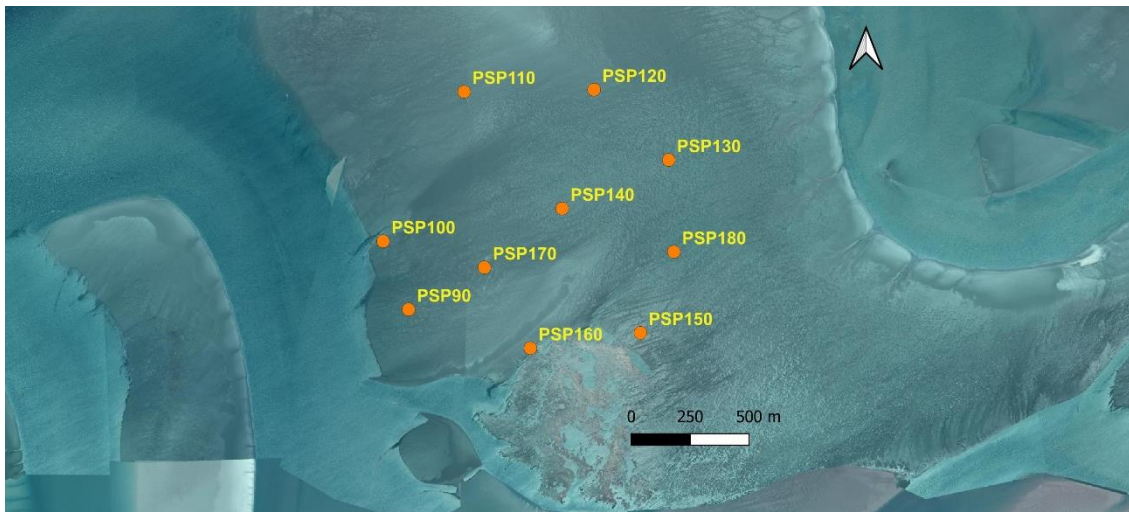
Figuur 6.8 Infrarood luchtfoto met 7 meetstations bij West-Ameland ingetekend.

Tabel 6.2 Coördinaten en hoogteligging van meetstations West-Ameland.

LOCATIE	X	Y	Z (cm NAP) 2013	Datum plaatsing
H10	175.248	604.416	49,7	4-9-2006
H20	176.617	605.128	6,1	4-9-2006
H30	176.601	604.792	7,5	4-9-2006
H40	175.811	604.617	44,2	4-9-2006
H50	175.997	604.190	6,4	4-9-2006
H60	175.397	603.687	6,3	4-9-2006
H70	175.534	603.909	22,7	28-2-2012

6.3.3 Referentiegebied Piet Scheveplaat

In 2014 is een tweede referentiegebied, de Piet Scheve plaat, ingericht met 10 meetstations (Figuur 6.9). De Piet Scheveplaat is een groot plaatgebied zonder diepe daling door gaswinning. Het is gelegen tussen Holwerd en Nes ten westen van de vaargeul naar Ameland. De NAP hoogteligging is in 2019 ingemeten (Tabel 6.3).



Figuur 6.9 infrarood luchtfoto met 10 meetstations op de Piet Scheveplaat ingetekend

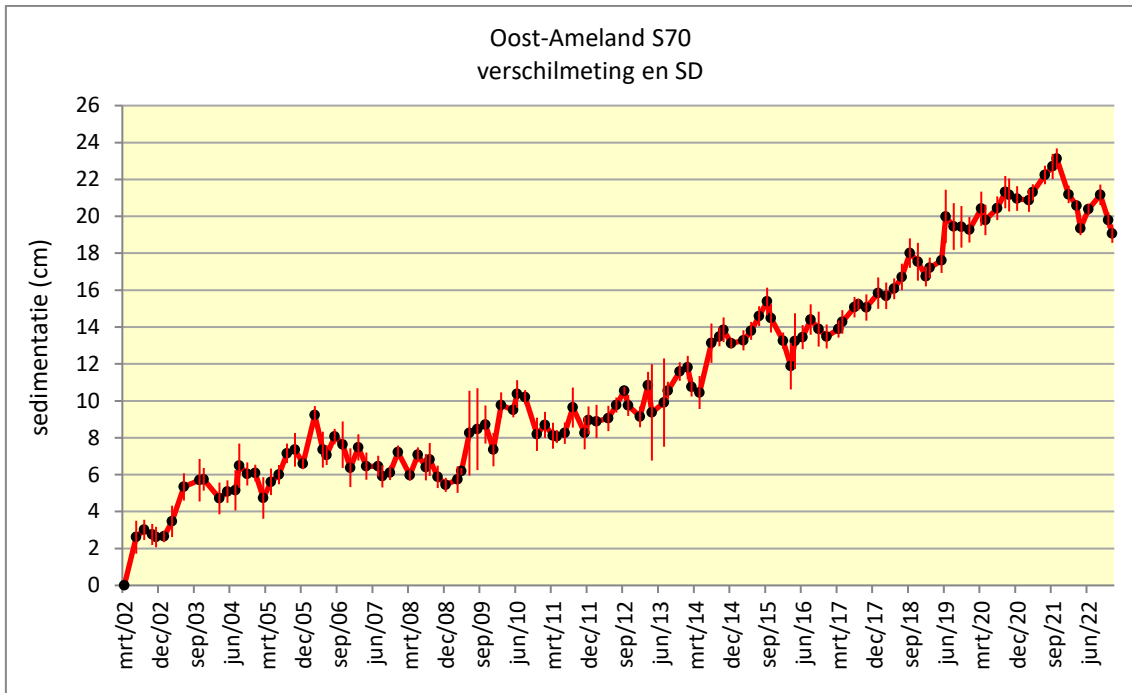
Tabel 6.3 Coördinaten en hoogteligging meetstations Piet Scheveplaat.

	X	Y	Z (cm NAP) 23-10-2019	Datum plaatsing
PSP 90	180.656	601.336	-17	8-9-14
PSP 100	180.548	601.625	-35,8	8-9-14
PSP 110	180.892	602.259	-0,4	8-9-14
PSP 120	181.443	602.268	-2,3	8-9-14
PSP 130	181.760	601.970	14,1	8-9-14
PSP 140	181.308	601.764	12,8	8-9-14
PSP 150	181.640	601.237	2,9	8-9-14
PSP 160	181.173	601.172	-31,3	8-9-14
PSP 170	180.978	601.514	5,5	8-9-14
PSP 180	181.782	601.580	13,4	19-11-14

6.4 Resultaten bodemdalingsgebied Oost-Ameland

6.4.1 Uitwerking per meetstation

Voor de berekeningen van de verandering ten opzichte van het meetbegin zijn per meetstation alle metingen van de beschikbare grondankers meegenomen. In de meeste gevallen betekent dit per meetstation meting aan 8 grondankers die gemiddeld worden. Soms is een touwtje met meetlabel (tijdelijk) onvindbaar en vindt middeling over de wel beschikbare grondankers plaats. Een voorbeeld van een meetreeks staat in (Figuur 6.10) De gemiddelde verandering en standaarddeviatie ten opzichte van het meetbegin van de grondankers staat uitgezet tegen de tijd. Op deze wijze zijn alle meetstations uitgewerkt.



Figuur 6.10 Meetreeks van meetstation S70 in het onderzoeksgebied Oost-Ameland.

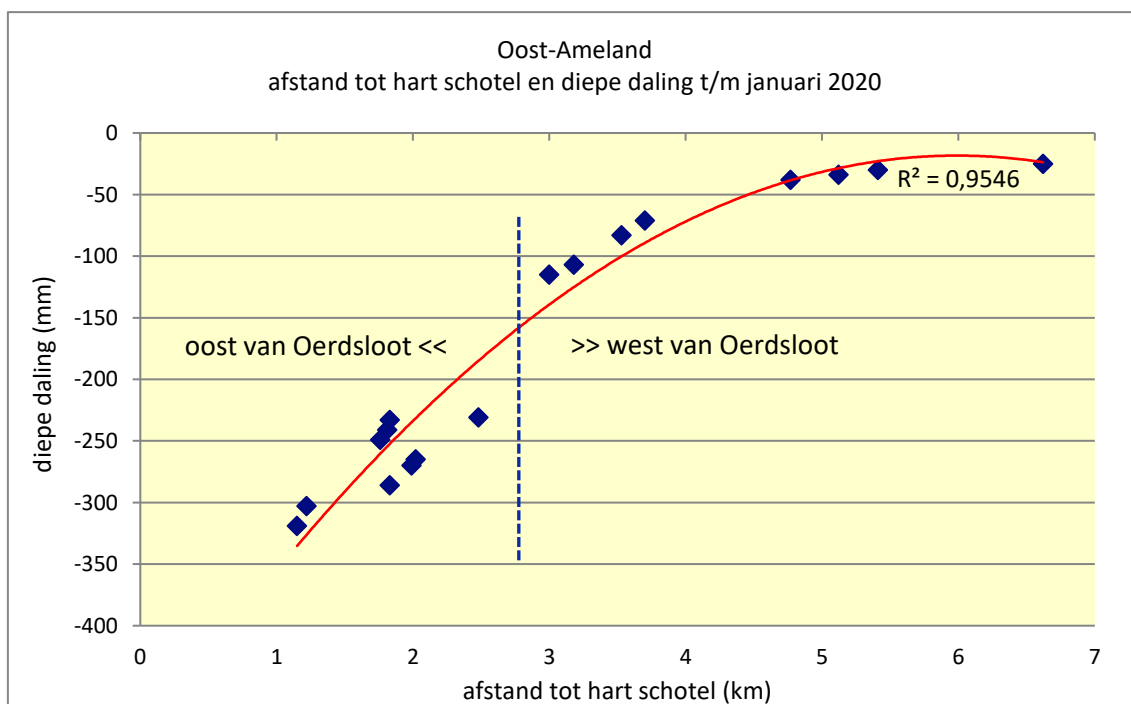
6.4.2 Bodemdaling wadplaten Oost-Ameland

De bodemdalingsschotel strekt zich uit onder het wad ten zuiden van Oost-Ameland. De afstand van de meetstations op het wad tot het hart van de dalingschotel staat in (Tabel 6.3) gegeven. Deze afstand is met handheld GPS bepaald vanaf de zeereep (X189618/Y609065) bij strandpaal 22. De tabel laat zien dat de dichtstbijzijnde stations S140 en S150 op ruim 1 km afstand van het hart van de dalingschotel liggen en dat de maximale afstand oploopt tot ruim 6,6 km voor station S00. De stations S10, S60, S160 en S00 liggen dicht bij 'de rand' van de dalingschotel.

In 2013 is de hoogte van het wad bij de meetstations met RTK/DGPS meting bepaald (Tabel 6.1). De meeste stations liggen tussen +35 cm NAP en -35 cm NAP. De diepe daling op de RD-coördinaat van ieder station is vanaf 1986 t/m februari 2020 uitgerekend met het NAM-model Ameland_GRIDS_2020 en is weergegeven in tabel 6.3.

Tabel 6.4 Afstand tot hart van bodemdaling schotel en diepe daling in 1986-2017 bij meetstations berekend met NAM-model Ameland_GRIDS_2020.

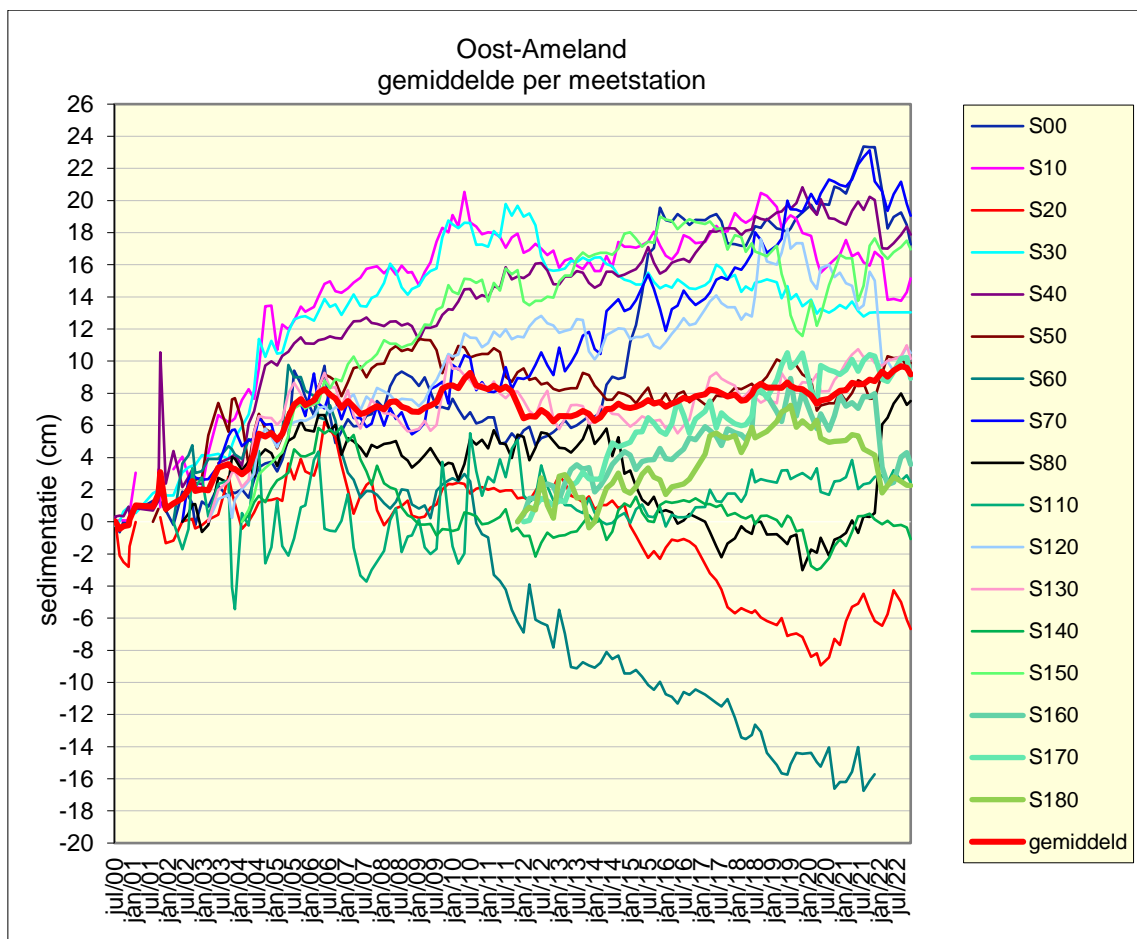
Station	Afstand km	t/m jan 2020 diepe daling mm
S00	6,62	-25
S10	4,77	-38
S20	2,48	-231
S30	1,81	-241
S40	3,00	-115
S50	1,76	-249
S60	5,41	-30
S70	3,53	-83
S80	1,83	-233
S110	1,83	-286
S120	3,70	-71
S130	1,99	-270
S140	1,22	-303
S150	1,15	-319
S160	5,12	-34
S170	3,18	-107
S180	2,02	-265



Figuur 6.11 Afstand tot hart dalingsschotel en de diepe daling van 1986 tot februari 2020. Het wantij ter hoogte van de Oerdsloot vormt een scheiding tussen veel en weinig gedaalde stations.

6.4.3 Sedimentatie op wadplaat Oost-Ameland

Per meetstation is het verloop van de sedimentatie ten opzichte van het begin van de meetreeks verwerkt in (Figuur 6.12). Deze figuur laat dus de sedimentatie aan het oppervlak zien van de wadplaat ten zuiden van Oost-Ameland. Station S110 kent aanvankelijk een grillig verloop. Dit station ligt niet ver van de kwelderrand van de Hon in een gebied waar een soort zandgolven van ongeveer een decimeter hoogte bewogen (Figuur 6.13) tot 2011. Daarna verdwenen deze en verdwijnen de pieken uit de metingen. Station S60 liet aanvankelijk sedimentatie zien maar sinds juli 2005 volgde een doorgaande periode van erosie en waarbij ruim 20 cm sediment verdween. In die periode vormde zich een waaivormig geulensiel vanaf het plaatgebied bij S60 naar de geul langs de wadplaat. Als bizar tastbaar bewijs voor deze forse erosie op deze plaats werden in de loop van 2010 steeds meer stukken aluminium aan het oppervlak zichtbaar. Achteraf blijkt dat het station S60 exact op het wrak van een Engelse Short Stirling bommenwerper is geplaatst die hier op 19-2-1943 werd neergeschoten waarbij de 7 bemanningsleden omkwamen. Dit vliegtuigwrak is decennia onzichtbaar geweest en komt door lokale erosie dan weer boven maaiveld (Figuur 6.14). Dit station is in het voorjaar van 2022 verloren gegaan door graafwerkzaamheden voor de elektriciteitskabel naar Ameland die hier vlak langs bleek te liggen. Naast S60 (einde meting dec 2021) zijn de stations S20 en S140 de enige die aan het eind van de meetreeks, in december 2022, enige erosie aan het oppervlak laten zien. De overige stations laten sedimentatie zien ten opzichte van het meetbegin.



Figuur 6.12 Sedimentatie van alle meetstations op wadplaat ten zuiden van Oost-Ameland.



Figuur 6.13 Meetstation S110 op luchtfoto. Zandgolven veroorzaken lokale dynamiek. Na 2010 verdwijnen deze zandgolven en laten de metingen geen hoge pieken en dalen meer zien (Figuur 6.12).

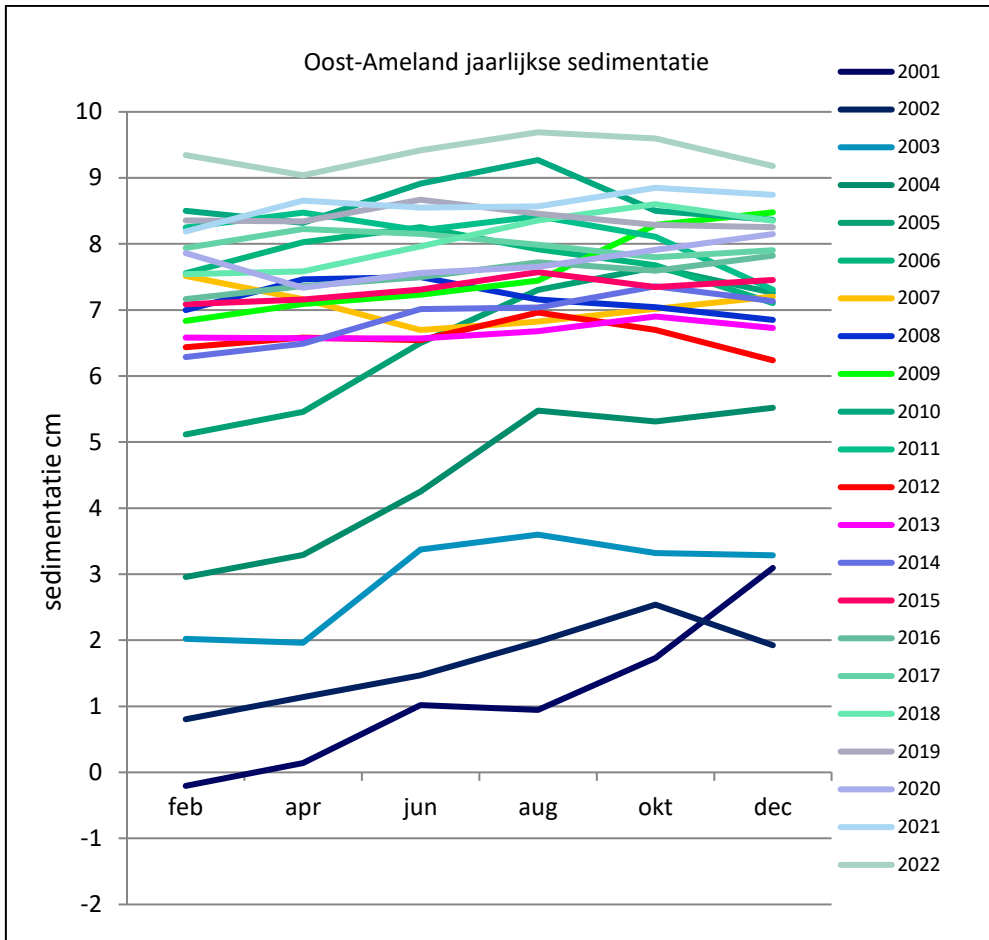


Figuur 6.14 Station S60, herkenbaar aan witte buisje en scheve paal op voorgrond (zuidelijke station van duplo) met geulvorming en wadplaat in erosiefase. Op achtergrond zijn aluminium onderdelen van een viermotorige Engelse Short Stirling RAF (BF378) bommenwerper zichtbaar die hier op 19 februari 1943 's nachts neergeschoten werd waarbij alle 7 bemanningsleden omkwamen. Tijdens plaatsen van dit station op 27-3 2002 was het gebied vlak en was er niets dat zou kunnen wijzen op een vliegtuigwrak in de bodem (foto 30-6-2011).

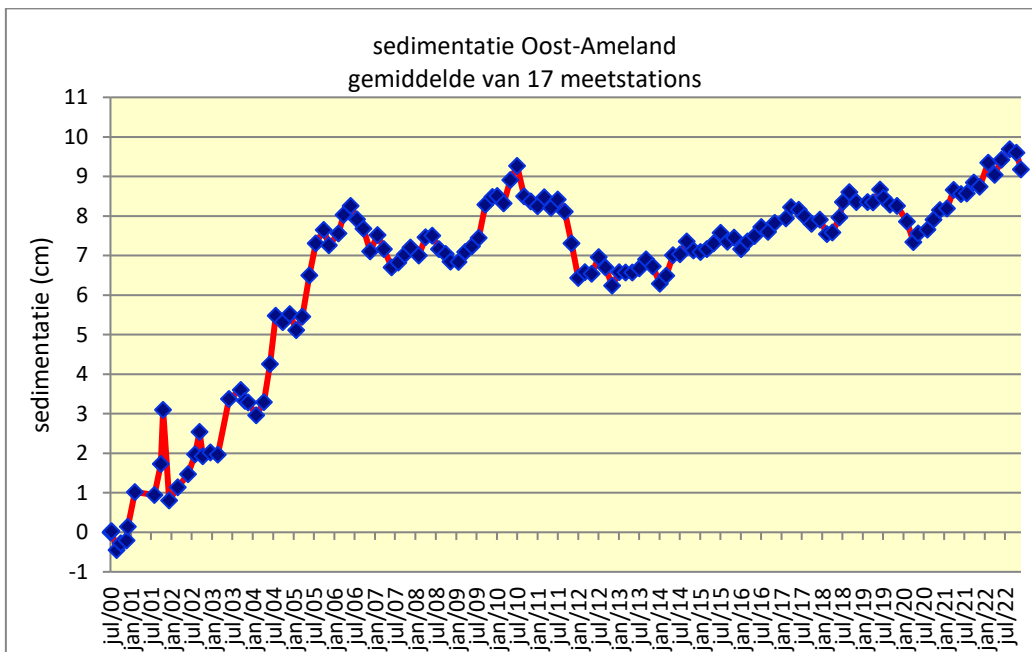
6.4.4 Plaatsedimentatie in relatie tot de tijd

Om de ontwikkeling van de sedimentatie op de wadplaten te kunnen beoordelen zijn verschilberekeningen gemaakt maken ten opzichte van de vorige meting (bijlage A). Dat levert steeds jaarlijks 6 waarden op voor de 22 complete jaren 2001 t/m 2022. Hierbij moet worden bedacht dat het aantal stations oploopt van 5 in 2001 tot 14 vanaf mei 2004 en 17 vanaf november 2011 (Figuur 6.7). Acht jaren laten erosie zien, 14 jaren laten sedimentatie zien. Indien de data in één grafiek worden samengevat, de lijnen van (Figuur 6.15) worden als het ware achter elkaar geplakt, ontstaat (Figuur 6.16). Deze figuur geeft een goed overzicht van het plaatgedrag op maaiveldhoogte. Indien de grafiek in meer detail beschouwd wordt kunnen 5 opeenvolgende perioden van sedimentatie en erosie worden onderscheiden. Vanaf het begin van de meting in 2001 volgt een periode van 64 maanden sedimentatie die eindigt in april 2006. Vanaf daar volgt een periode van 26 maanden erosie tot april 2009. Daarna volgt een periode van 17 maanden sedimentatie tot augustus 2010 waarna 18 maanden snelle erosie volgt tot februari 2012. Daarna volgt een periode van 10 jaar langzame sedimentatie met af en toe een kleine terugval tot het eind van de reeks in december 2022. Indien de reeks globaler beschouwd wordt is er sprake van sedimentatie tot juni 2006 waarna de rest van de reeks stabilisatie laat zien. Uiteindelijk is er in (Figuur 6.16) sprake van een gemiddelde sedimentatie van 9,2 cm voor de 17 meetstations die op de wadplaat liggen gerekend over de gehele meetreeks. Dat komt overeen met een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 4,8 mm per jaar.

In de dagen van 16-20 februari 2022 kwamen in 4 dagen tijd 3 stormen voor (literatuur: website KNMI). Een dergelijke drielingstorm in een vrijwel aaneengesloten periode komt eens in de 100 jaar voor (KNMI). Bovendien was storm 'Eunice' op vrijdag 18 februari langdurig en hoort deze bij de 3 sterkste stormen van de afgelopen 50 jaar. Deze stormen hebben op het wad gezorgd voor een soort nivellering van de plaathoogte bij een aantal meetstations. Sommige stijgende stations zijn gedaald en sommige dalende stations zijn van sediment voorzien. Het gemiddelde laat geen grote uitslag zien bij de eerstvolgende meting in maart 2022, maar in de grafieken van individuele stations zijn de stormen wel herkenbaar (bijlage A.3). Stijgers waren S50 en S80. Dalers waren S00, S10, S40, S120, S160, S170 en S180.



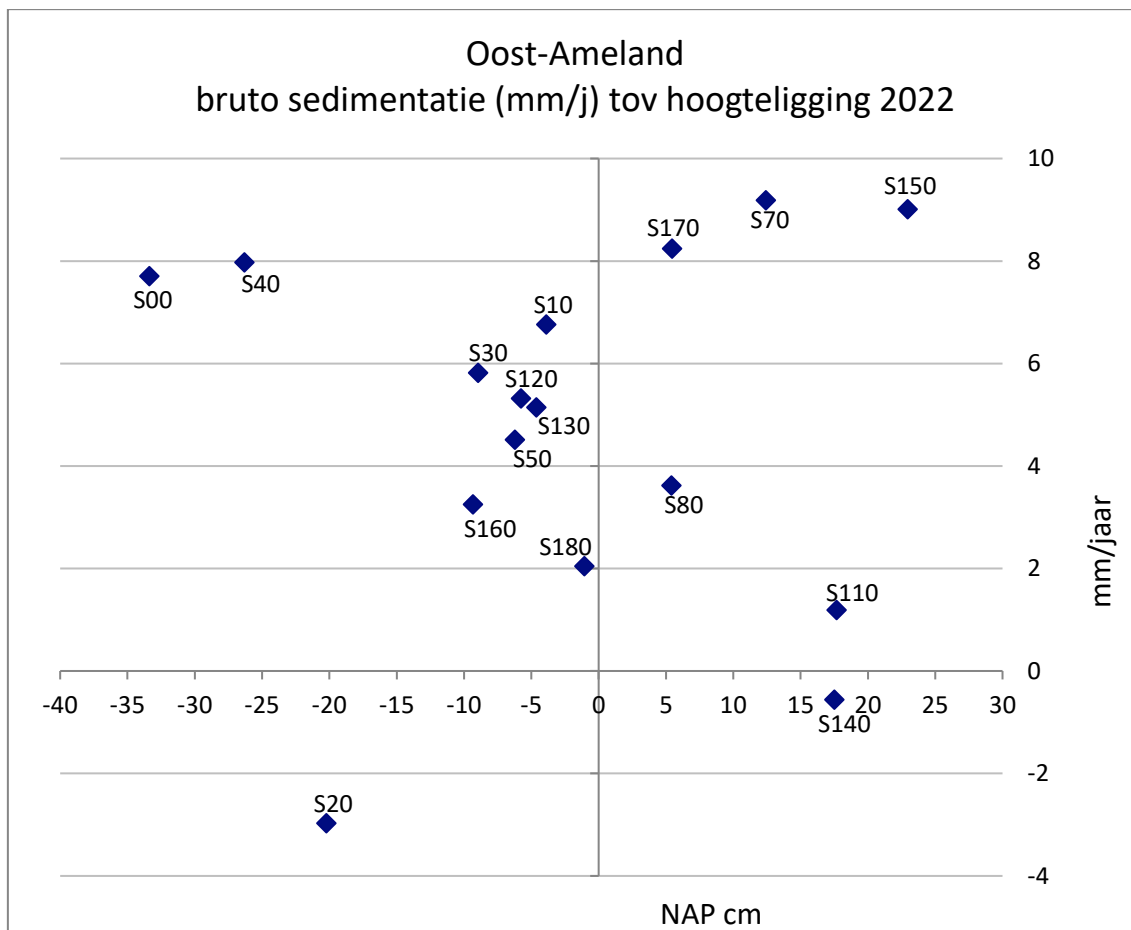
Figuur 6.15 Jaarlijkse sedimentatie op de stations van de wadplaat onder Oost-Ameland. Gemiddelde van alle meetstations per meting per maand en jaar.



Figuur 6.16 Sedimentatie op wadplaten op Oost-Ameland. Gemiddelde van alle gemeten stations.

6.4.5 Wadplaats sedimentatie in relatie tot hoogteligging

Van het gebied Oost-Ameland is de NAP-hoogte van de meetstations met RTK/DGPS ingemeten in 2013 (Tabel 6.1). Hierin kan een onnauwkeurigheid zitten van ongeveer 20 mm, maar desondanks zijn deze data goed bruikbaar om alle meetstations te rangschikken op hoogteligging en te relateren aan de gemeten sedimentatie. De gepresenteerde hoogteligging is de berekende hoogte in december 2022 op basis van de RTK/DGPS-meting in 2013. Deze hoogten zijn gerangschikt en bij iedere hoogteligging is de sedimentatiesnelheid gegeven zoals die tot december 2022 was over de gehele meetperiode van ieder meetstation. Er is alleen sprake van erosie bij station S20 en S140. S20 is het meest oostelijke station en dynamische processen rond de oostpunt van het eiland (het eiland werd korter tussen 2000 en e015) kunnen hiervan de oorzaak zijn. Bij S140 is sprake van schommeling rond een nulpunt en is geen sprake van een dalende trend (bijlage A.3). Bij de overige 15 stations is sprake van sedimentatie vanaf een hoogte van +23 cm NAP (S150) tot -33 cm NAP (S00) (Figuur 6.17). Dit betreft vrijwel de volledige hoogterange waarop de stations liggen. In het spreidingsdiagram van (Figuur 6.17) lijkt er een optimum in de opslibbing te zijn rond de nul cm NAP-hoogte, maar de correlatie is niet sterk. Dit wordt veroorzaakt door de stations S80, S110 en S140. Deze stations laten een veel lagere opslibbing zien dan stations met vergelijkbare hoogteligging. Indien de ligging van deze stations in ovenschouw wordt genomen (Figuur 6.18) dan valt op dat ze op een gebogen lijn vlak ten zuiden van het eiland liggen waar de diepe daling hoog is geweest.



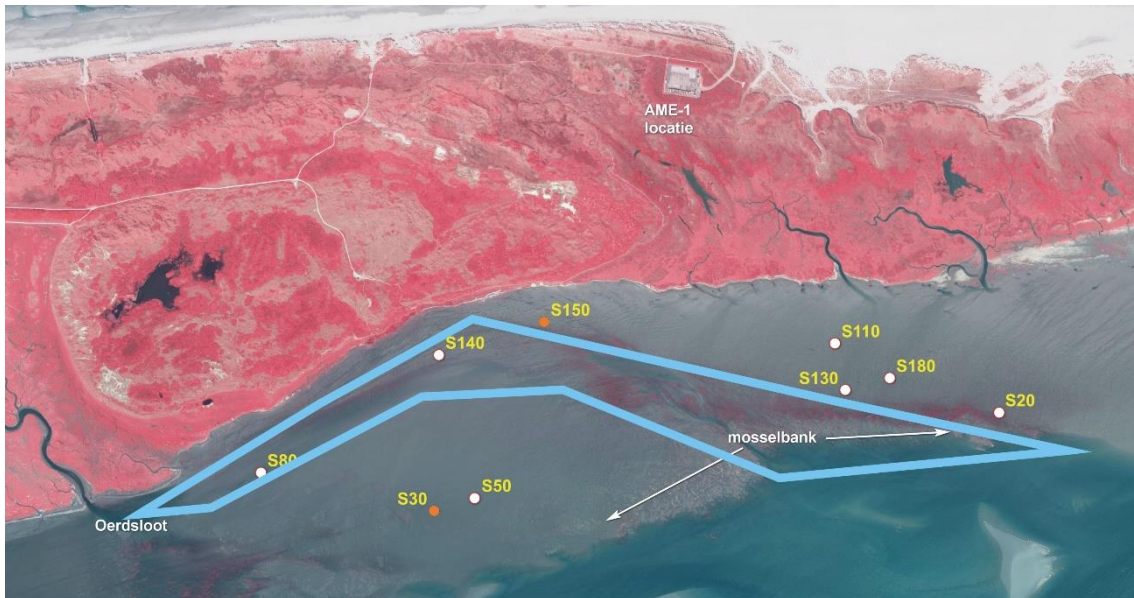
Figuur 6.17 Spreidingsdiagram van de sedimentatiesnelheid ten opzichte van hoogteligging eind 2022 van de meetstations bij Oost-Ameland. Sedimentatiesnelheid in mm per jaar over de totale meetperiode die eindigt in december 2022. Meetperiode van de meetstations varieert van 11 tot 21 jaar (tabel 1).

6.4.6 Wadplaatsedimentatie in relatie tot bodemdaling

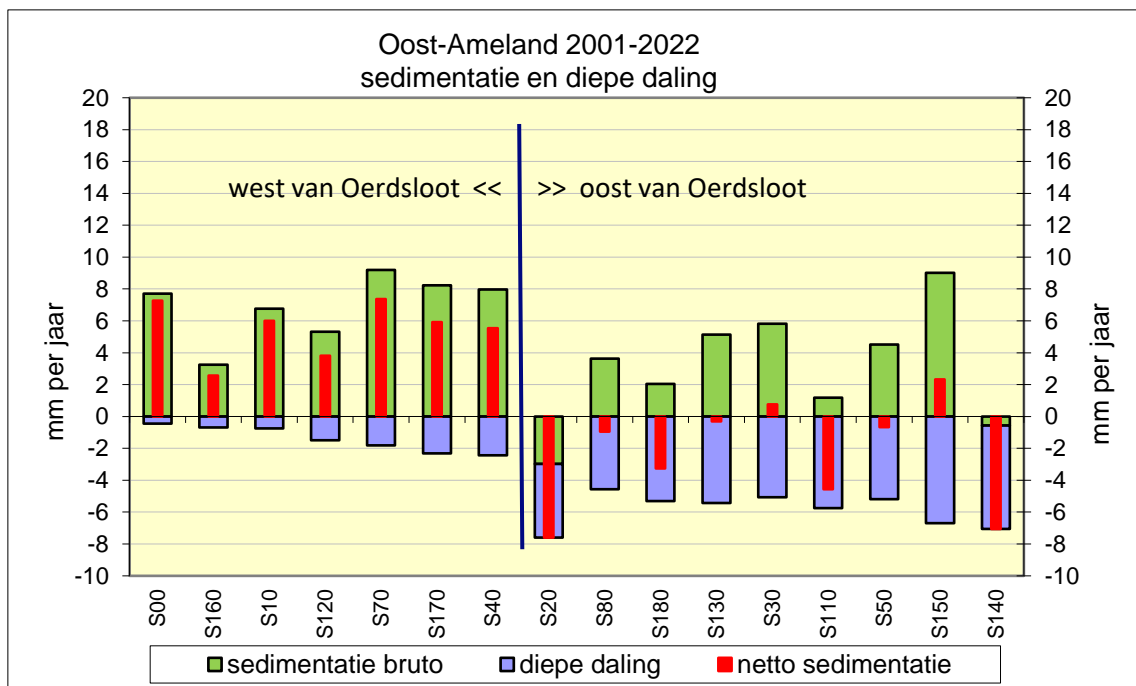
In het Waddengebied bij Oost-Ameland zijn de meetstations gedaald door diepe daling vanwege de gaswinning. Tegelijkertijd heeft er ook opslibbing plaatsgevonden aan het oppervlak bij het merendeel van de meetstations als de gehele meetperiode in ogenschouw wordt genomen (paragraaf 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5). In hoeverre de opslibbing aan het oppervlak voldoende is om tenminste de diepe daling te compenseren kan per meetstation bepaald worden. Dan blijkt dat het maaiveld bij de twee stations S20 en S140, die tijdens de meetperiode erosie lieten zien (paragraaf 3.5), door de diepe daling versterkt daalt (Figuur 6.19). Bij het merendeel van de stations is er voldoende sedimentatie om de diepe daling volledig te compenseren en vindt er dus geen maaiveldverlaging plaats (Figuur 6.19). Dit is het geval voor alle stations ten westen van de Oerdsloot/ het wantij. In vijf gevallen ten oosten van het wantij is sprake van een maaiveldverlaging veroorzaakt door bodemdaling waar anders een maaiveldverhoging zou zijn geweest. Dit betreft de stations S50, S80, S110, S130 en S180. Alle vijf dalende stations liggen in het plaatgebied bij Oost-Ameland waar een diepe daling van maximaal 6,5 mm/jaar (S140) plaatsvindt, wat bij deze stations resulteert in een netto (sedimentatie minus diepe daling) maaiveldverlaging van 0,5 mm/j (S50, S80, S130) tot 7,9 (S20) mm/j.

In (Figuur 6.18) is handmatig geschetst om welk gebied het gaat waar de stations liggen die in de periode 2000-2022 netto (sedimentatie minus diepe daling) tussen 0,3 en 7,6 mm/jaar dalen. Dit betreft een vrij smalle strook van ongeveer 2,8 km lengte en beperkte breedte gezien de ligging vlak langs de kust en de sedimentatie bij de omliggende stations. Een ruwe schatting duidt op een sedimenttekort van 3000 m³ /jaar, uitgaande van een oppervlak van 75 ha waar ongeveer 4mm/j sedimenttekort is.

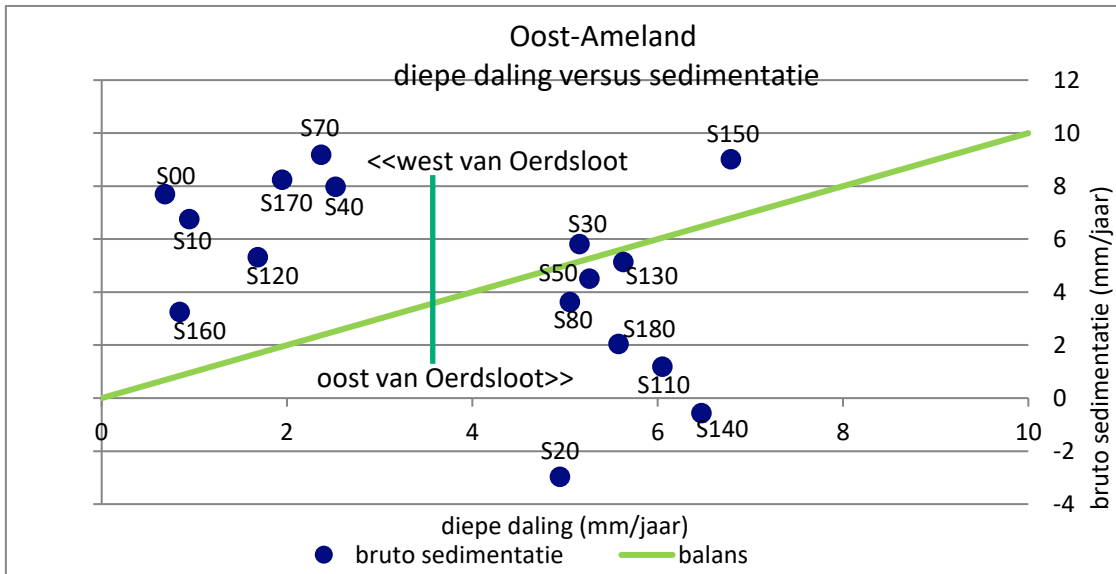
Indien alle stations samen worden genomen is er in de periode 2000-2022 sprake van een bruto sedimentatie van 4,8 mm/jaar. Dit is dan een gemiddelde van alle gemiddelde snelheden van alle stations. Dit is rekenkundig niet helemaal juist want de kortere reeksen zijn in deze berekening te belangrijk vertegenwoordigd, maar het geeft een goede indicatie. De individuele snelheden per meetstation zijn in de (Figuur 6.19 en Figuur 6.20) zichtbaar. Een ruwe schatting duidt op een opslibbingsvolume van ruim 19.000 m³/jaar (8000x500x0,0048 m) sediment voor het gehele gebied. Door de diepe daling van gemiddeld 3,9 mm/jaar resulteert uiteindelijk gemiddeld een netto ophoging van 0,9 mm/jaar. Ook in eerdere studies (Hoeksema 2004, De Vlas 2005) is geconcludeerd dat de sedimentatie bij Ameland gemiddeld genomen voldoende is om de diepe bodemdaling door gaswinning te compenseren. Dat is zeker het geval ten westen van de Oerdsloot/het wantij. Maar deze studie laat zien dat ten oosten van het wantij lokaal sprake is van een netto maaiveldddaling (Figuur 6.18).



Figuur 6.18 De stations die met de witte stippen zijn gekleurd laten netto daling van het maaiveld zien ten gevolge van diepe daling door gaswinning. Het met blauw omlinjnde gebied markeert globaal het gebied van netto maaiveld daling. Hierover stroomt/staat water tijdens lage waterstanden als de hogere delen zijn drooggefallen vanaf de monding van de Oerdsloot in oostelijke richting naar de eerste geul van het Pinkegat. Nieuw is een mosselbank die in 2021 op het zuidelijke deel van de wadplaat is ontstaan. Het gaat om ongeveer 20 ha over een lengte van ruim 1,5 km. De mossels waren in december 2022 ongeveer 3 tot maximaal 5 cm lang. Deze bank gaat mogelijk van invloed zijn op de afwatering en sedimentatie van het plaatgebied.



Figuur 6.19 Snelheid van sedimentatie en bodemdaling en het netto effect per meetstation gedurende de meetperiode. Data t/m december 2022.

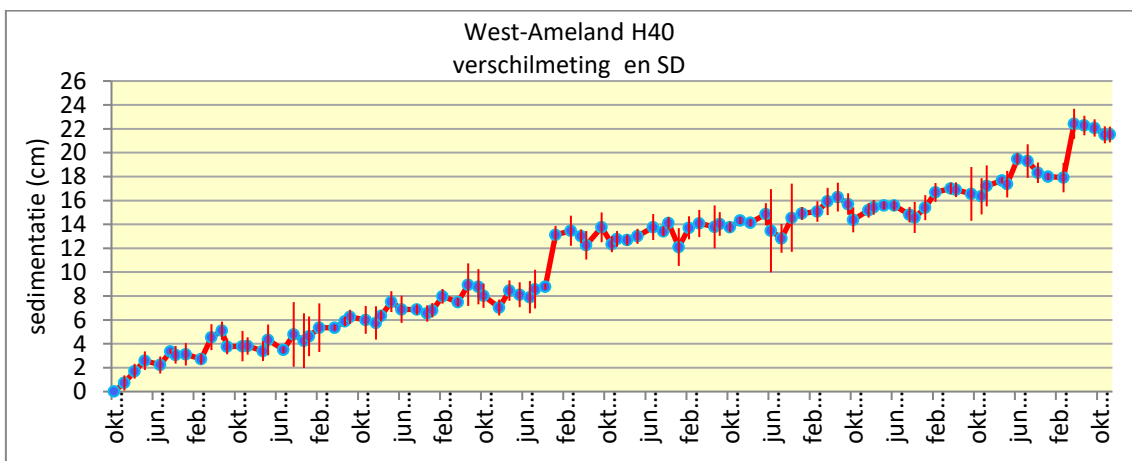


Figuur 6.20 Verband tussen diepe daling en sedimentatiesnelheid op alle meetstations. Data t/m december 2022. De getrokken groene lijn geeft aan waar bodemdaling en sedimentatie in balans zijn zodat het maaiveld op gelijke hoogte blijft. Met de verticale oranje lijn is de scheiding tussen de stations ten westen en oosten van de Oerdsloot/wantij aangegeven.

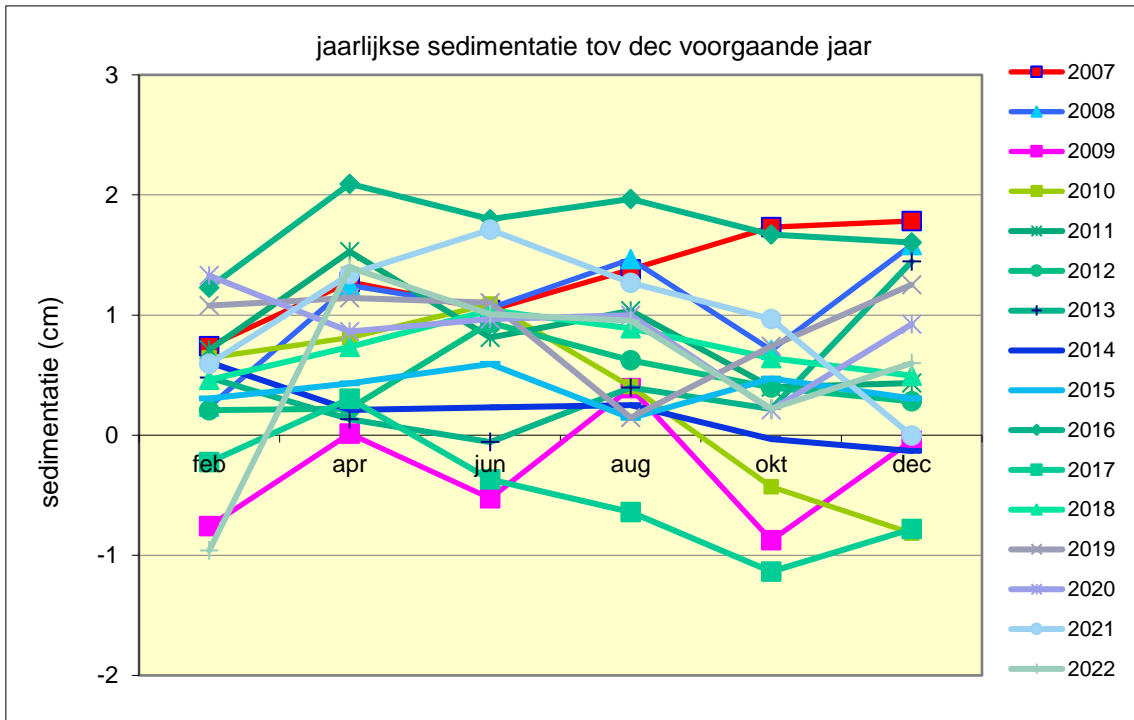
6.5 Resultaten referentiegebied West-Ameland

6.5.1 Uitwerking per meetstation

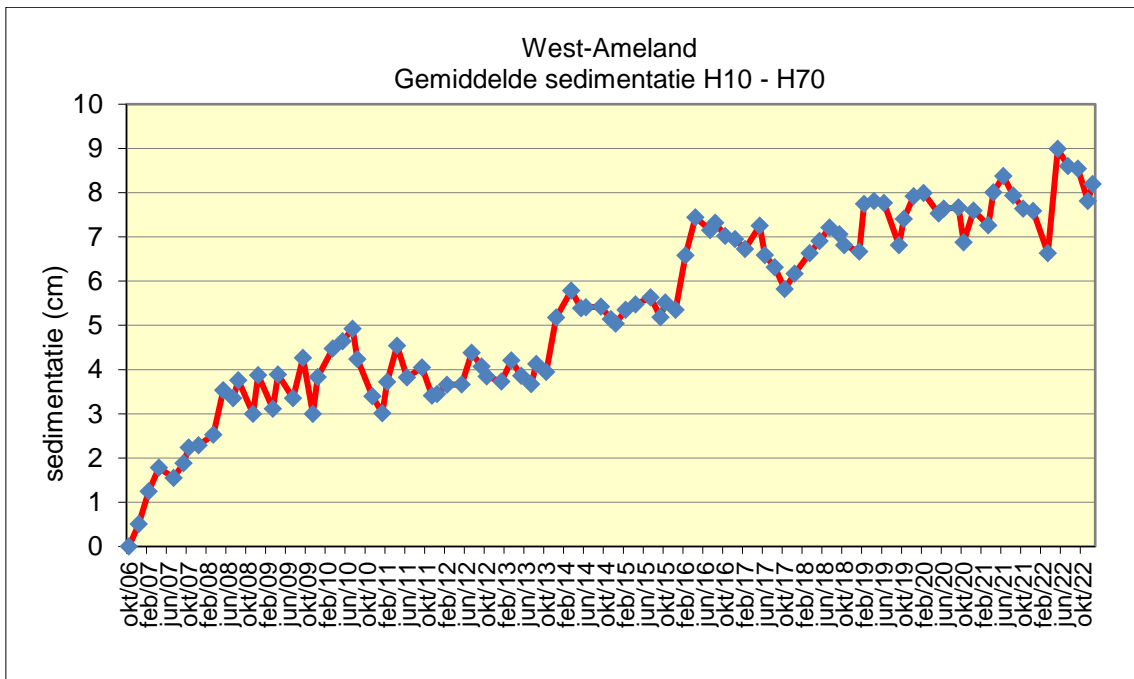
Per meetstation zijn vier grondankers gebruikt voor de metingen. Maar soms is een touwtje met meetlabel (tijdelijk) onvindbaar. Dit betekent dat er per meetstation bij iedere meting maximaal vier meetwaarden worden verkregen. Voor de berekeningen van de verandering ten opzichte van het begin van de metingen zijn voor iedere meting alle beschikbare meetwaarden meegenomen. In de meeste gevallen betekent dit per meting per meetstation 4 meetwaarden die worden gemiddeld. Een voorbeeld van een meetreeks staat in (Figuur 6.20). De gemiddelde verandering en standaardafwijking zijn uitgezet tegen de tijd. Op deze wijze zijn alle meetstations uitgewerkt.



Figuur 6.21 Meetreeks van meetstation H40 in het onderzoeksgebied West-Ameland.



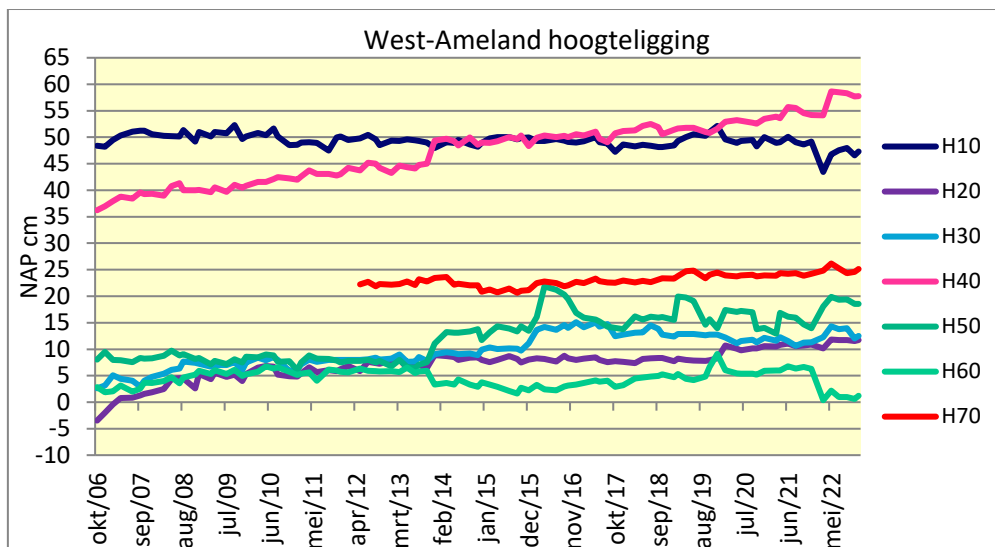
Figuur 6.23 Jaarlijkse sedimentatie West-Ameland ten opzichte van decembermeting voorgaande jaar.



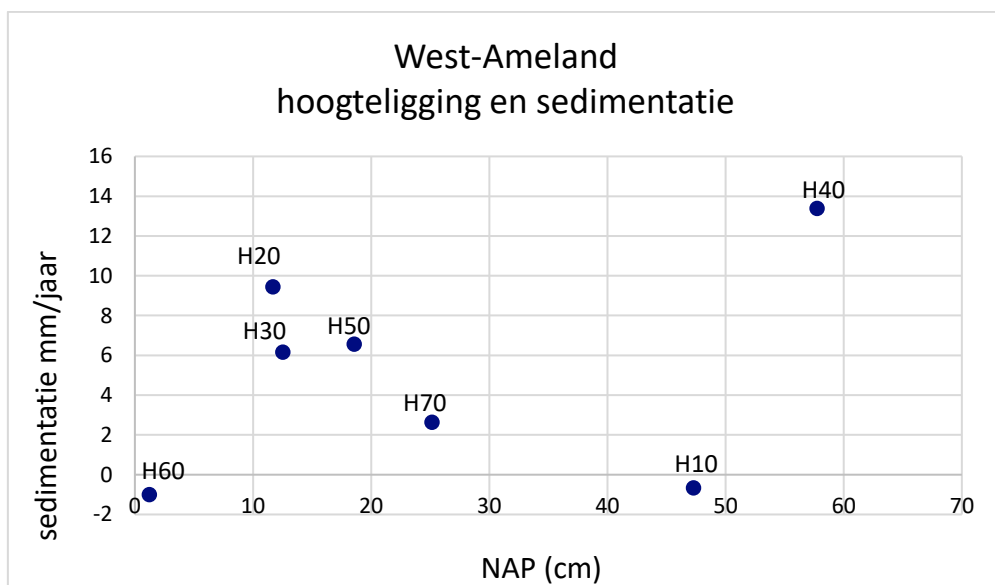
Figuur 6.24 Sedimentatie op wadplaat bij West-Ameland. Alle meetstations.

6.5.4 Plaatsedimentatie in relatie tot hoogteligging

Van het gebied West-Ameland zijn de NAP-hoogten van de meetstations met RTK/DGPS ingemeten in 2013 (Tabel 6.2). Hierin kan een onnauwkeurigheid zitten van ongeveer 20 mm maar desondanks zijn deze data goed bruikbaar om alle meetstations te rangschikken op hoogteligging en te relateren aan de gemeten sedimentatie (Figuur 6.25). De stations liggen in december 2022 tussen +1 cm NAP en +58 cm NAP. Het hoogteverloop in de loop van de tijd is in (Figuur 6.25) weergegeven.



Figuur 6.25 Hoogteverloop (NAP cm) van de meetstations op wadplaat bij West-Ameland.

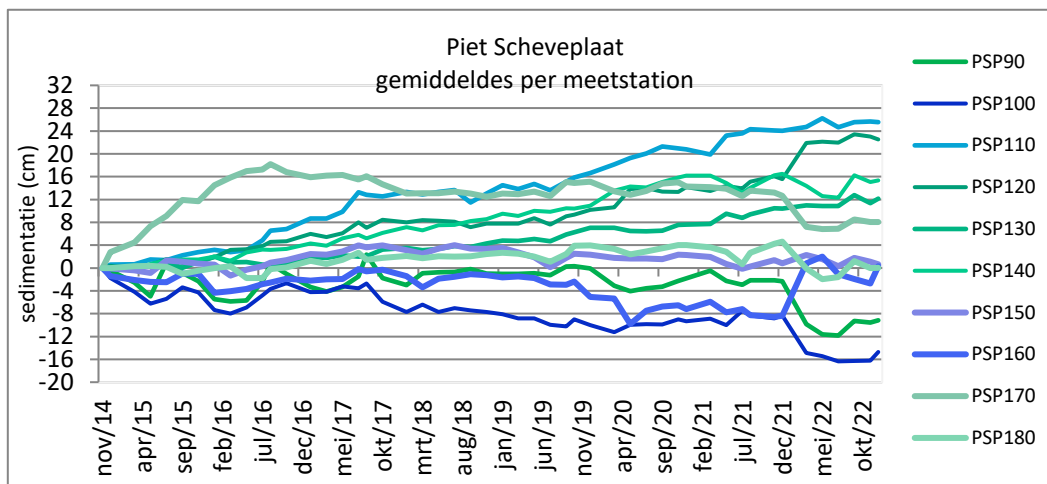


Figuur 6.26 Sedimentatie in relatie de hoogteligging van alle meetstations op wadplaat bij West-Ameland.

6.6 Resultaten referentiegebied Piet Scheveplaat

6.6.1 Sedimentatie alle meetstations Piet Scheveplaat

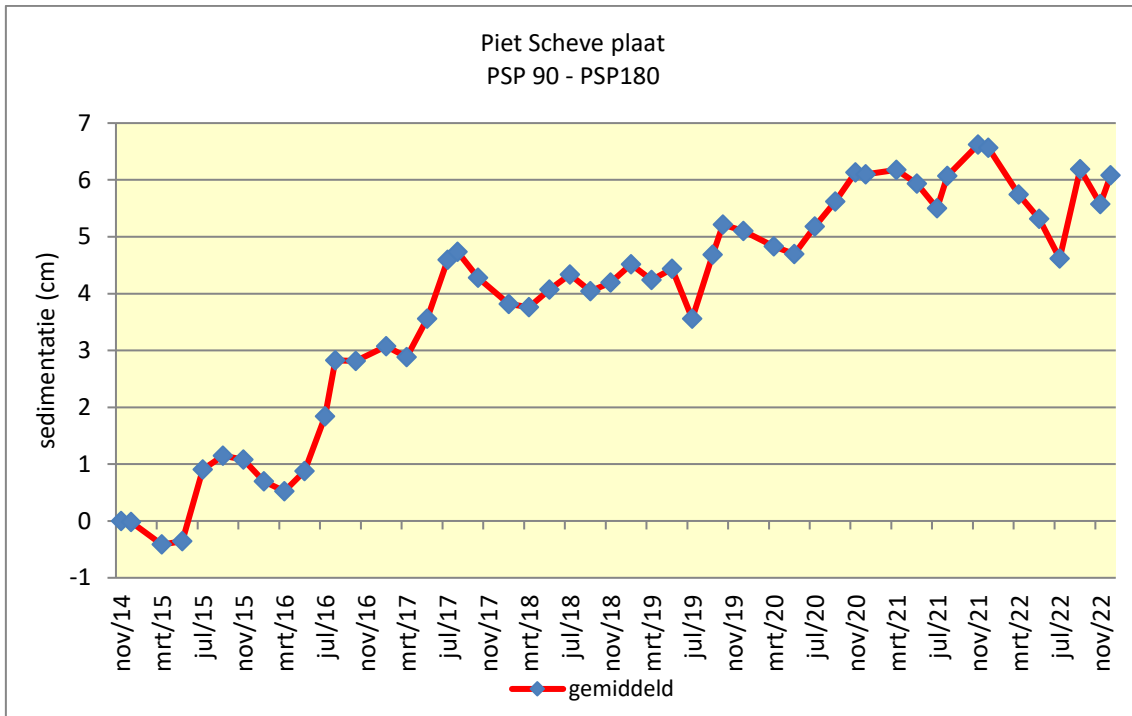
Per meetstation is het verloop van de sedimentatie ten opzichte van het begin van de meetreeks verwerkt in (Figuur 6.27). Hieruit blijkt dat twee stations (PSP90 en PSP100) een behoorlijke erosie laten zien van >8cm. Drie stations (PSP150, PSP160, PSP180) zijn stabiel gebleven. En vijf stations (PSP110, PSP120, PSP130, PSP140, PSP170) laten sedimentatie van 8 tot 24 cm zien. Ook bij de Piet Scheveplaat is de invloed van de extreme stormsituatie in de periode 16-20 februari 2022 (<https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/drielingstorm-dudley-eunice-en-franklin>) zichtbaar bij de eerstvolgende meting in maart 2022. Opvallend stijgend was station PSP120 en PSP160, maar PSP90, PSP100, PSP140, PSP170 en PSP180, lieten een sterke erosie zien. Door de stormen daalde het gemiddelde bijna 1 cm maar dat is een normale schommeling tussen twee meetdata (Figuur 6.28).



Figuur 6.27 Gemiddelde sedimentatie van de meetstations PSP90 t/m PSP180 in het onderzoeksgebied Piet Scheveplaat.

6.6.2 Plaats sedimentatie in relatie tot tijd

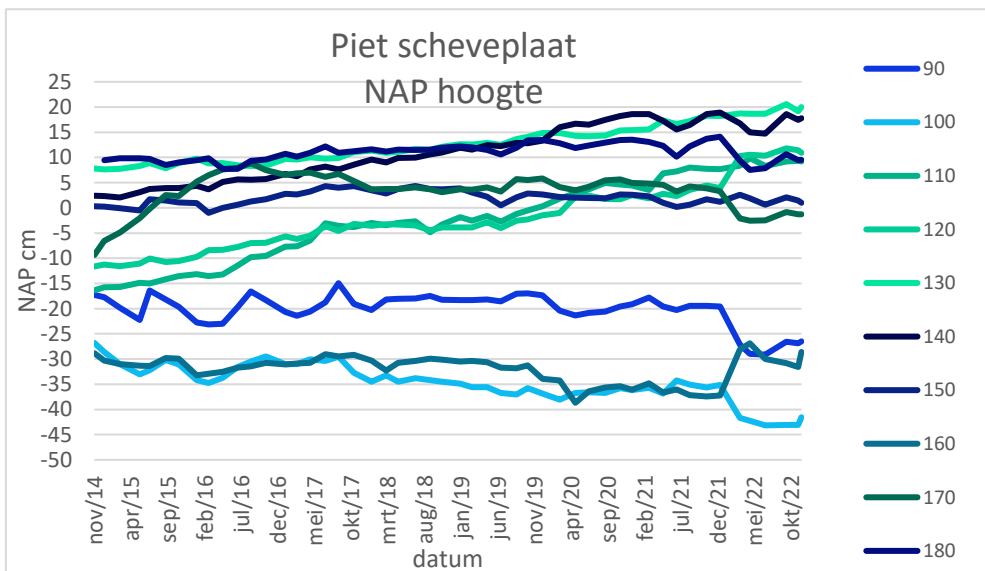
Om de ontwikkeling van de sedimentatie op Piet Scheveplaat in zijn algemeenheid te kunnen beoordelen zijn de resultaten van de zeven stations samengevoegd (Figuur 6.28). Deze figuur geeft een goed overzicht van het plaatgedrag op maaiveldhoogte. Aan het eind van de meetreeks in december 2022 is gemiddeld sprake van 6,1 cm sedimentatie wat overeenkomt met een gemiddelde opslibbingsnelheid van 7,5 mm/j. De variatie tussen de stations is echter behoorlijk groot (Figuur 6.27) maar zowel de sedimentatie als de gemiddelde snelheid van sedimentatie en de variatie tussen de stations zijn daarmee op een iets hoger niveau dan op Oost-Ameland (zie paragraaf 6.4) en West-Ameland (zie paragraaf 6.5). Merk op dat de meetreeks voor Piet Scheveplaat korter (sinds 2014 i.p.v. 2000) is dan die van de andere twee gebieden.



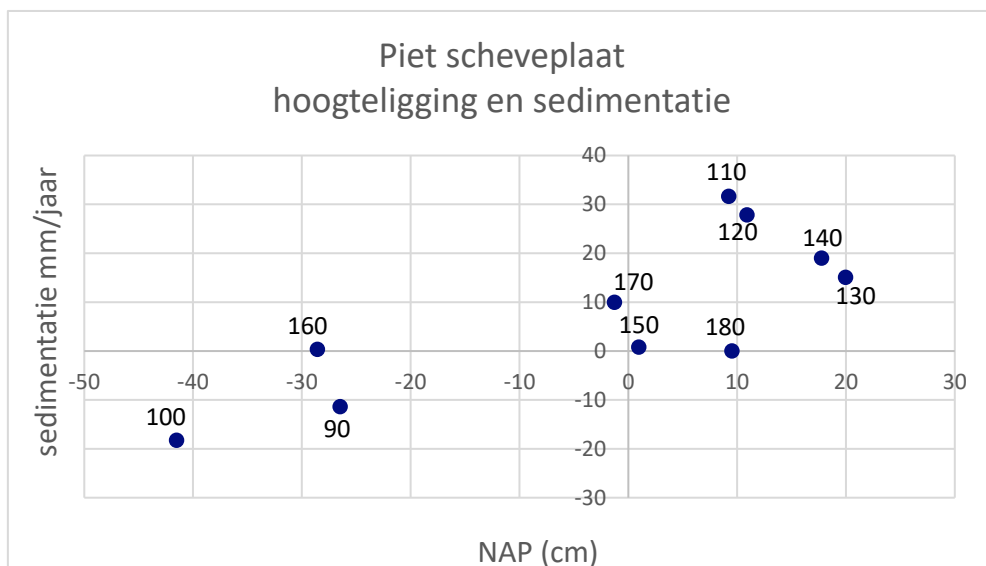
Figuur 6.28 Sedimentatie gemiddeld op de Piet Scheveplaat. Alle meetstations.

6.6.3 Plaats sedimentatie in relatie tot hoogteligging

Van het gebied Piet Scheveplaat zijn de NAP-hoogten van de meetstations met RTK/DGPS ingemeten in 2019 (Tabel 6.3). Hierin kan een onnauwkeurigheid zitten van ongeveer 20 mm maar desondanks zijn deze data goed bruikbaar om alle meetstations te rangschikken op hoogteligging (december 2022) en te relateren aan de gemeten sedimentatie (Figuur 6.30). De stations variëren in hoogteligging tussen -42 cm NAP en +20 cm NAP. Er lijkt een positief verband te zijn tussen een hogere ligging en hogere sedimentatie. (Figuur 6.29) laat de hoogteligging van alle stations zien in de loop van de tijd.



Figuur 6.29 Hoogteverloop (NAP cm) van de meetstations op de Piet Scheveplaat.



Figuur 6.30 Sedimentatie in relatie de hoogteligging van alle meetstations op de Piet Scheveplaat.

6.7 Discussie

Teneinde vast te kunnen stellen of er een verdieping van de Waddenzee plaatsvindt ten gevolge van gaswinning, zijn er binnen de bodemdalingsschotel meetstations ingericht. Met behulp van deze meetstations wordt sinds 2000 de ontwikkeling van de plaathoogte ten zuiden van Oost-Ameland gemeten.

Vanaf 2004 zijn 14 meetstations gevolgd en in 2011 zijn daar nog 3 stations aan toegevoegd. In 2006 zijn op het wad bij West-Ameland 6 referentiestations ingericht in een gebied zonder bodemdaling. In 2012 is daar een 7e station aan toegevoegd. In 2014 is een tweede referentiegebied zonder gaswinning gekozen op de Piet Scheveplaat. Deze plaat ligt tussen Holwerd en Ameland ten westen van de vaargeul naar Ameland. Hier zijn 10 meetstations ingericht die op dezelfde wijze als de andere twee gebieden wordt gemonitord in de tijd. De ligging van de meetstations is zo gekozen dat ze verspreid over het hele plaatgebied voorkomen en in een vlak gebied liggen waardoor de resultaten van de metingen zoveel mogelijk 'zeggingskracht' hebben over een relatief groot gebied. Een aantal meetstations is juist wel in de buurt van een geul, mosselbank of kwelderrand gelegd teneinde een indruk te krijgen van lokale sedimentatie in een meer dynamische omgeving. Indien de dynamiek echter te hoog is zoals langs een plaatrand blijkt de methode ongeschikt door het verdwijnen van de bovengrondse meetlijntjes en draagt de meting bovendien niet mee aan het verzamelen van data van een echte wadplaat.

In hoeverre de meetstations per plaatgebied iets zeggen over de gehele plaat wordt bij iedere meting in het oog gehouden door de omgeving van het meetstation te blijven beoordelen om te zien of het station nog voldoet aan de eisen toen het ingericht is. Daaruit is gebleken dat het merendeel van de meetstations ook na vele jaren nog steeds representatief is voor de directe omgeving en daarmee de sedimentatie op de plaat. In een enkel geval spelen er dynamische processen die dit beeld verstoren. Voorbeelden zijn de stations S100 dat op een plaatrand lag en door dynamiek verloren is gegaan en S60 bij Oost-Ameland waar na verloop van tijd eerst een geul door het meetstation uitgesleten is en het vervolgens in 2022 door graafwerkzaamheden aan de elektriciteitskabel naar Ameland helemaal verloren is gegaan. Soms is de dynamiek ook tijdelijk, zoals bij station S00 bij Oost-Ameland waar in de loop van de tijd de opkomst en ondergang van een mosselbank in de meetreeks kon worden gevolgd en in de periode 2014-2016 een sterke sedimentatie optrad door de ontwikkeling van een rif van zandkokerwormen (*Pygospio elegans*).

Deze metingen moeten worden gezien als een eenvoudige en doeltreffende manier om op een nauwkeurige schaal (mm niveau) met een vrij hoge frequentie (6 maal per jaar) sedimentatie op wadplaten te kunnen volgen. Hierbij wordt een goede indruk gekregen van de sedimentatie in de tijd waarbij vooral duidelijk wordt hoe groot lokaal de natuurlijke variatie door dynamiek is. Naarmate de meetreeksen zich uitstrekken over een langere periode winnen ze aan kracht. Hoe langer de reeks meetjaren is, des te beter zal het mogelijk zijn om langzame processen als bodemdaling door gaswinning en zeespiegelstijging te onderscheiden van natuurlijke variatie op kortere tijdschalen. In dit onderzoek blijkt het mogelijk om na een reeks van 21 meetjaren (2000-2022) een goede kwantificatie te kunnen geven van het gecombineerde effect van bodemdaling en sedimentatie van een groot wadplaatgebied van ongeveer 8 km lengte langs de kust van Oost-Ameland. In dit gebied wordt een gemiddelde sedimentatie van 4,8 mm/j gemeten. Ten zuiden van West-Ameland is dit 5,2 mm/j over een kortere (2006-2022) meetperiode en op de Piet Scheveplaat is dit 7,5 mm/j over de periode 2014-2022. Deze vergelijkbare sedimentatiesnelheden wijzen mogelijk op een voor dit deel van de Waddenzee geldend sedimentatiemechanisme, waarbij de midden in zee gelegen plaat iets meer sedimenteert dan de twee aan Ameland gelegen platen. In het grootste deel van het wadplatengebied bij Oost-Ameland is er voldoende sedimentatie om de diepe daling door gaswinning te compenseren. Echter, in een beperkt gebied ten zuiden van het Oerd en de Hon is de sedimentatie minimaal en de diepe daling maximaal waardoor daar netto een verlaging van het maaiveld plaatsvindt met een snelheid van ongeveer 4 mm/j. Dit betekent een daling van ruim 8 cm in de afgelopen 21 jaar. Dit gebied is ook visueel zichtbaar vanaf de Oerdblinkert bij laagwater tijdens rustig weer in de vorm van een soort natte vallei waarin een laagje water blijft staan. De vraag of deze mindere opslibbing en vernatting verband houdt met de gaswinning blijft voer voor speculaties. Aangezien de oostpunt van Ameland van nature behoorlijk dynamisch is (Wang, in de Vlas 2017) en daardoor optredende veranderingen effect zullen hebben op de hydrodynamica van het zeewater, lijkt het waarschijnlijker dat de oorzaak gezocht moet worden in het feit dat het een soort toevoer-/afvoergebied is voor water dat rondom de oostpunt over dit plaatgebied trekt naar de monding van de Oerdsloot en het wantij daar.



Figuur 6.31 Beeld van het wad ten zuiden van het Oerd en de Hon tijdens laagwater waarop het stroomgebied vanaf het Pinkegat over de wadplaat naar de Oerdblinkert (linksmidden op de foto nog net zichtbaar) en Oerdsloot (achter camerastandpunt) ingetekend is. De arcering bevindt zich in het gebied waar de afgelopen jaren een netto verlaging heeft plaatsgevonden (zie paragraaf 3.6). Foto 26-4-2017.

6.8 Samenvatting en Conclusies

Ten gevolge van aardgaswinning onder Oost-Ameland vindt sinds 1986 diepe daling plaats in het nabijgelegen deel van de Waddenzee. Het effect van de bodemdaling kan worden gecompenseerd door sedimentatie, maar het kan ook versterkt worden door erosie. Om vast te kunnen stellen hoe veel sedimentatie en/of erosie er in dit gebied optreedt zijn op wadplaten meetstations ingericht. In het gebied ten zuiden van Oost-Ameland wordt de sedimentatie aan het wad oppervlak sinds 2000 gemeten op 17 locaties. In 2006 is een gebied ten zuiden van West-Ameland met 7 meetstations aan het meetprogramma toegevoegd als referentiegebied zonder bodemdaling. In 2014 is als tweede referentiegebied de Piet Scheveplaat toegevoegd met 10 meetstations.

Na een reeks van meetjaren kan een goede indicatie verkregen worden van lokale dynamiek en het effect van diepe daling op de sedimentatie van een groot wadplaatgebied van ongeveer 8 km lengte langs de kust van Oost-Ameland. Daarnaast kunnen de resultaten vergeleken worden met de, zij het kortere, meetreeksen in de beide referentiegebieden.

De berekende daling van de diepe ondergrond (sinds het begin van de gaswinning in 1986) in het onderzoeksgebied Oost-Ameland varieert van ruim 37 cm (ca. 10 mm/j) bij de kustlijn van Het Oerd tot ruim 3 cm (< 1 mm/j) op het wad ten zuiden van Buren. Indien het bodemdalingsgebied Oost-Ameland als geheel wordt genomen is er slechts bij 2 meetstations sprake van enige erosie in de periode 2000-2022 en is er sprake van een gemiddelde sedimentatie van 4,8 mm/jaar. De gemiddelde diepe daling bij deze meetstations bedraagt 3,9 mm/jaar.

In het referentiegebied (geen bodemdaling) bij West-Ameland (2006-2022) wordt een gemiddelde sedimentatie gemeten van 5,2 mm/jaar en in het referentiegebied Piet Scheveplaat (2014-2022) is sprake van 7,5 mm/j sedimentatie.

Slechts in een smalle strook van ongeveer 2,8 km lengte vlak langs de kust bij Het Oerd, waar de bodemdaling maximaal is, is de sedimentatie onvoldoende om de diepe daling volledig te compenseren. De netto maaiveldverlaging bedraagt daar ongeveer 4 mm/j. De oorzaak hiervan is niet met zekerheid aan te geven.

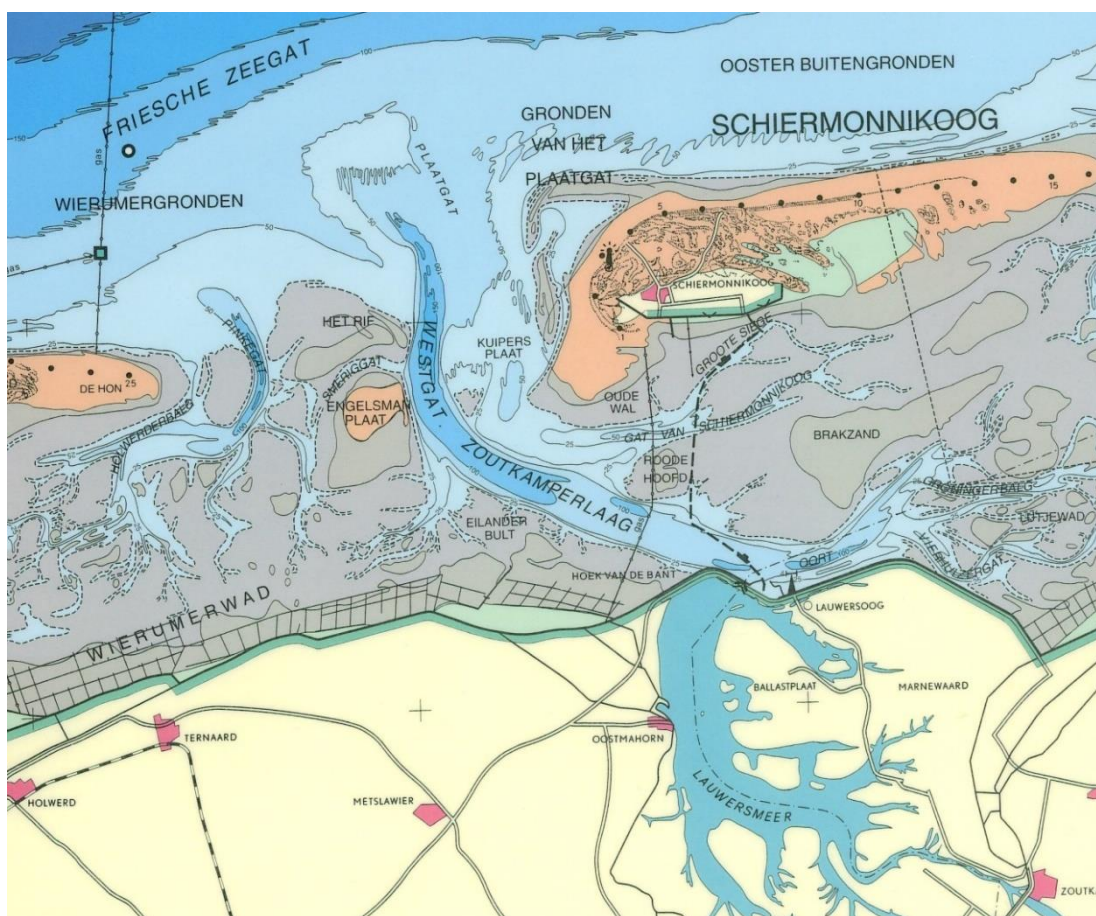
Uit de meetresultaten in de periode 2000-2022 zijn de volgende conclusies getrokken:

- De jaarlijkse opslibbing op het wad ten zuiden van Oost-Ameland (4,8 mm/j) verschilt weinig van de opslibbing bij West-Ameland (5,2 mm/j) en op de Piet Scheveplaat (7,5 mm/j). Dit zou kunnen duiden op een voor dit deel van de Waddenzee geldend sedimentatiemechanisme onafhankelijk van bodemdaling.
- De gemiddelde diepe daling door gaswinning bij Oost-Ameland (3,9 mm/j) wordt op het grootste deel van het wadplaatareaal gecompenseerd door een gemiddelde sedimentatie van 4,8 mm/j. Gemiddeld voor het hele gebied resulteert dit in een netto opslibbing van 0,9 mm/jaar.
- In een beperkt wadplaatgebied van 2,8 km lengte vlak langs de zuidkust bij Oost-Ameland, waar de diepe daling maximaal is en de opslibbing minimaal, ontstaat een netto verlaging van het maaiveld van ongeveer 4 mm/jaar. Een eenduidige oorzaak voor deze verlaging is niet te geven.
- De gekozen methodiek waarbij een ondergronds gefixeerd anker dienst doet als vast punt waarvan de afstand tot de wadbodem gemeten wordt met een dyneema draad werkt uitstekend op een wadplaat met niet te extreme dynamiek

7 Engelsmanplaat

7.1 Inleiding

Tijdens de openbare audit na de 5 jarige rapportage in 2005 is naar voren gekomen dat er behoefte is meer inzicht te krijgen in de ontwikkelingen van het Rif en de Engelsmanplaat (zie Figuur 7.1). De Engelsmanplaat was in de jaren daarvoor aan erosie onderhevig, met als zichtbaar teken daarvan dat het reddingshuisje (Figuur 7.2) dan alleen nog maar via een verlengde trap te bereiken was. De vraag werd gesteld of de bodemdaling in het Pinkegat hierbij een rol had gespeeld. Om deze vraag te beantwoorden werd er een onderzoek naar de morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat uitgevoerd. Het onderzoek is gerapporteerd in Wang (2007), waarvan een uitgebreide samenvatting is gegeven in de 2011 rapportage (de Vlas, 2011) en een kortere samenvatting in de 2017 rapportage (de Vlas, 2017). Hieronder wordt naast een samenvatting van de 2007 studie (Figuur 7.2) ook de recente ontwikkelingen beschouwd (Figuur 7.3).



Figuur 7.1 Het Friesche Zeegat met daarin centraal gelegen de Engelsmanplaat als scheiding tussen de 2 deelsystemen Pinkegat en Zoutkamerlaag.

7.2 Samenvatting van de 2007 studie

Het primaire doel van het onderzoek uitgevoerd in 2007 was vast te stellen of er een verband bestaat tussen de waargenomen veranderingen van het Rif-Engelsmanplaat systeem en de bodemdaling in het Pinkegat. De volgende vragen zijn in het onderzoek meegenomen:

- Heeft de bodemdaling in het Pinkegat de erosie op het Rif en de Engelsmanplaat veroorzaakt of versterkt?
- Als de beschikbaarheid van sediment op het Rif en de Engelsmanplaat afneemt, zal het herstel van de sedimenthonger in het Pinkegat door de bodemdaling worden beïnvloed?

Het onderzoek is uitgevoerd door middel van een literatuuronderzoek en een data-analyse.



Figuur 7.2 Het reddingshuisje op de Engelsmanplaat. Het onderste deel van de trap, met de dunne leuning, is er extra aan gemaakt vanwege de erosie van de plaat.

In het onderzoek worden de mogelijke effecten van de bodemdaling door gaswinning vergeleken met de effecten van een andere belangrijk menselijke ingreep in de omgeving, de afsluiting van de Lauwerszee in 1969.

Kort Samengevat zijn de volgende conclusies m.b.t. de effecten van de bodemdaling getrokken:

- De waargenomen verlaging van Engelsmanplaat is veroorzaakt door erosie en niet door bodemdaling.
- De erosie die de verlaging van Engelsmanplaat heeft veroorzaakt is niet geïnitieerd door de bodemdaling.
- Het is erg onwaarschijnlijk dat de erosie van de Engelsmanplaat en het Rif door de bodemdaling is versterkt.
- De erosie in het gebied rondom de Engelsmanplaat is geen belangrijke bron voor sediment dat nodig is voor de compensatie van de sedimenthonger veroorzaakt door de bodemdaling.

Met betrekking tot de afsluiting van de Lauwerszee zijn de volgende conclusies getrokken:

- De afsluiting van de Lauwerszee heeft waarschijnlijk de erosie van Engelsmanplaat versterkt.
- De afsluiting van de Lauwerszee heeft waarschijnlijk ook invloed gehad op de ontwikkeling van het Smeriggat. Als hypothese kan worden geformuleerd dat dit de aansluiting van het Rif aan de Engelsmanplaat heeft vertraagd.

Als eindconclusie worden de antwoorden op de twee onderzoekvragen hieronder gegeven:

- Heeft de bodemdaling in het Pinkegat de erosie op het Rif en de Engelsmanplaat veroorzaakt of versterkt?

Nee, de erosie is zeker niet veroorzaakt door de bodemdaling. Het is ook zeer onwaarschijnlijk dat de bodemdaling de erosie heeft versterkt.

- Als de beschikbaarheid van sediment op het Rif en de Engelsmanplaat afneemt, zal het herstel van de sedimenthonger in het Pinkegat door de bodemdaling worden beïnvloed?

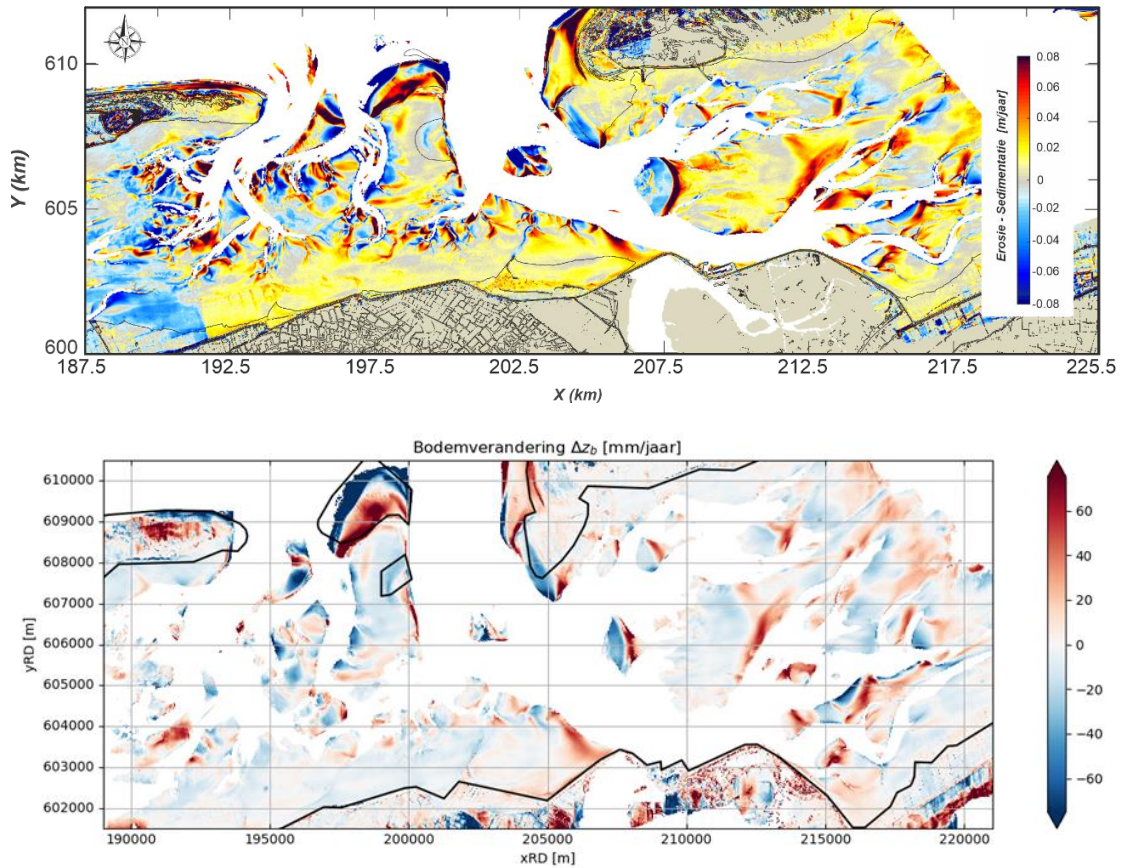
Nee. Het sediment geërodeerd op het Rif en op de Engelsmanplaat is vooral in de directe omgeving afgezet. Dit is dus niet de belangrijke bron geweest voor sediment ter compensatie van de zandhonger. Een verandering hiervan zal daarom het herstel van de bodemdaling niet beïnvloeden.

Naast het beantwoorden van de onderzoekvragen zijn een aantal andere interessante conclusies getrokken, met name over de invloed van de afsluiting van de Lauwerszee:

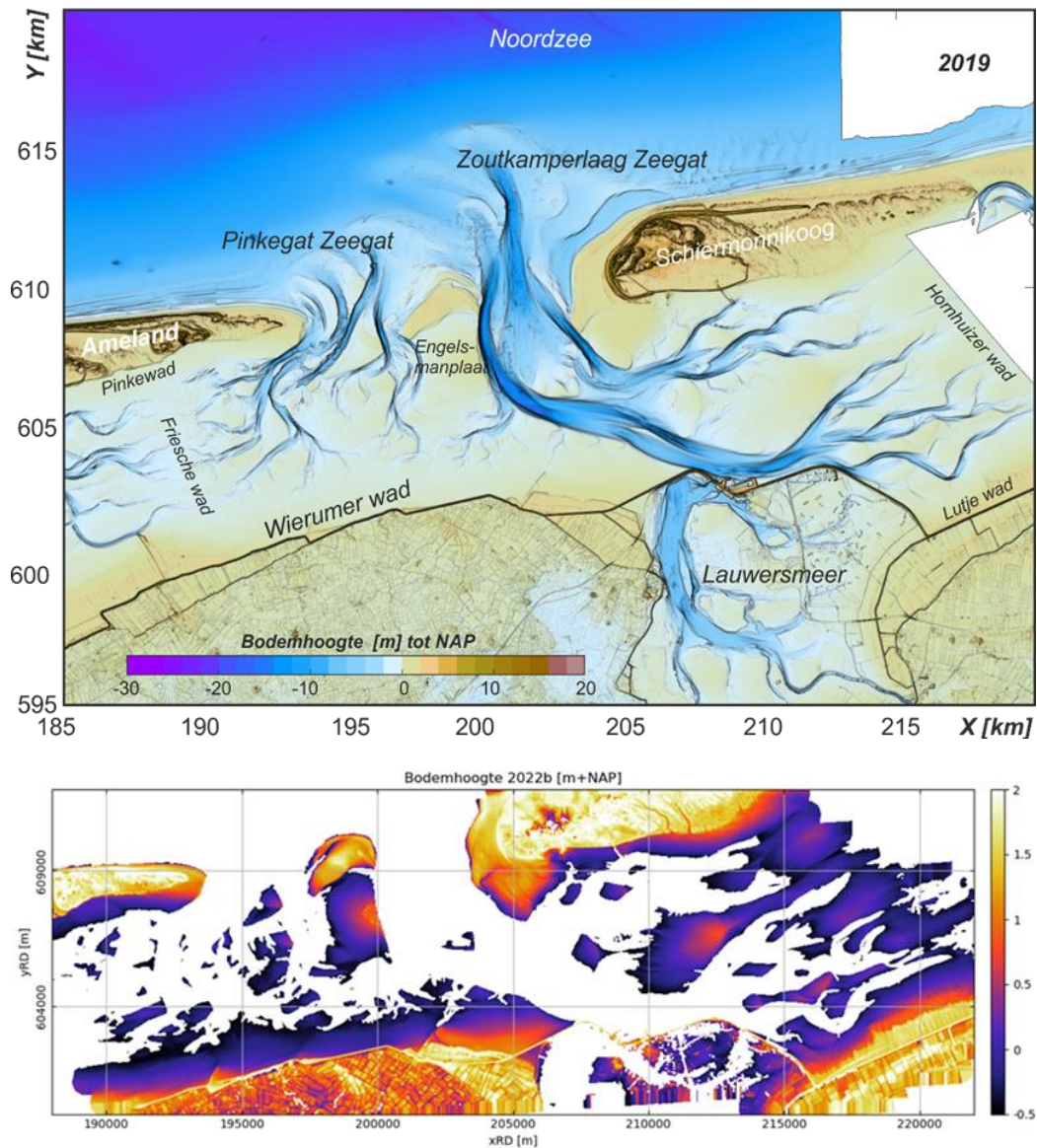
- Als er sprake is van afwijkend gedrag van de Engelsmanplaat en het Rif, dan zijn ze waarschijnlijk veroorzaakt door de Afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Mogelijke afwijkingen van het normale min of meer cyclische gedrag zijn:
 - Vertraagde verdwijning van de kortsluitgeul van het Smeriggat, ofwel aansluiting het Rif en de Engelsmanplaat.
 - Versterking van de erosie op de Engelsmanplaat.
- Het eerder geconstateerde afwijkende gedrag van de hoofdgeulen in het Pinkegat, waardoor de aanval op de Hon eerder is begonnen, is mogelijk ook een gevolg van de afsluiting van de Lauwerszee.
- Het overschot van sediment in de buitendelta van de Zoutkamperlaag, ontstaan na de afsluiting van de Lauwerszee, is een belangrijke bron geweest voor sediment ter compensatie van sedimenthonger in de vloedkommen.

7.3 Recente ontwikkelingen

Zoals voorspeld in de 2007 studie is er sedimentatie in het Smeriggat opgetreden sindsdien (zie Figuur 7.3). Deze geul, die het Rif en de Engelsmanplaat scheidt, is al praktisch afgesloten (Figuur 7.4). De meest recente Lidar-metingen laten zien dat de geul al niet meer doorgaand is op een diepte van NAP-0.5 m. Het Rif is dus al praktisch aangesloten aan de Engelsmanplaat (Elias en Oost, 2021). Met andere woorden er is al bijna sprake van een nieuwe, grotere en hogere Engelsmanplaat, ofwel dat het Rif-Engelsmanplaat systeem is aan het overgaan naar een nieuwe fase in de (pseudo-) cyclische ontwikkeling. In deze cyclische ontwikkeling wordt verwacht dat er in de komende tijd een nieuwe “het Rif” gaat ontstaan.



Figuur 7.3 Boven: Sedimentatie-erosie in gebieden met bodemhoogte hoger dan NAP-1.5 m in de periode 2012-2019, afgeleid uit vaklodingen. Onder: Sedimentatie-erosie in gebieden met bodemhoogte hoger dan NAP-0.5 m in de periode 2010-2022, afgeleid uit lidar-metingen (Gawehn, 2023).



Figuur 7.4 Recente bodemhoogte. Boven: 2019 vaklodingen; onder: 2022 Lidar opname.

8 Ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op oost Ameland

Eeuwenlang is verstuiwing langs de Nederlandse kust tegengegaan door helm te planten en windschermen van rijshout of riet te plaatsen (Reitsma, 1984). Vanaf 1800 zijn ingrepen uitgevoerd op Ameland om de vorm van het eiland te beïnvloeden (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000), terwijl al vanaf de Middeleeuwen dijken zijn aangelegd op de Waddeneilanden (Löffler, 2008). Vanaf ongeveer 1800 heeft men op Ameland geprobeerd om door middel van het aanleggen van stuifdijken en moldijken de vorm van het eiland te beïnvloeden. In de jaren 60 van de 20^e eeuw is de laatste stuifdijk aangelegd (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000). In deze periode heeft stabilisatie de overhand gekregen over destabilisatie, en zijn veel mobiele duinen gefixeerd. Vanaf de tweede helft van de 19e eeuw zijn mobiele duinen structureel vastgelegd in pogingen om duinen vruchtbaarder te maken, en vanaf de tweede helft van de 20^e eeuw is een extreem intensief vastleggingsbeheer gehandhaafd door middel van helmaanplant en het verwerken van organisch materiaal in nieuwe stuifkuilen (Arens, 2009).

Zo plaatste Rijkswaterstaat in de jaren 80 van de vorige eeuw meer dan 35 km windscherm per jaar op Ameland, en plantte men per jaar meer dan een miljoen helmplanten (Figuur 8.1, links). Kale zandplekken in het duin werden namelijk als alarmerend gezien, en moesten onmiddellijk met takken of ander plantaardig materiaal worden bedekt. Soms werd hiervoor op Ameland zelfs stalmest gebruikt. Op verschillende plaatsen werd het duin met bulldozers landinwaarts geschoven om zandverlies aan de zee te verminderen (Nikkels, 2010). Door deze maatregelen zijn de duinen in de Waddeneilanden die tot in het begin van de 20e eeuw veelal mobiel waren (met veel verstuiwing, onder andere door intensieve beweiding), met het oog op kustverdediging vastgelegd (Oost en Lammerts, 2007). Tot 1990 had het onderhoud als doel om een hoge en brede zandbuffer te creëren. Door het planten van helm wordt zand goed vastgelegd, en is het minder gevoelig voor erosie door golven en wind (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000).



Figuur 8.1 Opnamen zeereep bij raai 20.2 in juli 1995 en januari 2006 (Foto's J. Krol, 2006)

In de jaren 80 van de 20^e eeuw vond er een omslag in het denken over duinbeheer plaats. Het besef kwam op dat stuivend zand nodig is voor het behoud van het kustlandschap. Inmiddels was echter de trend van stabilisatie vergevorderd. Het totale oppervlak kaal zand was afgenomen tot minder dan één procent (Arens, 2009). De duinvalleien verdroogden en veel dynamiek was uit de duinen verdwenen. Door de successie van een pionier- naar een climaxvegetatie verouderde het duinsysteem; een proces dat versterkt werd door een toename van de atmosferische stikstofdepositie in de voorbije decennia (Oost en Lammerts, 2007).

In het Nederlandse kustverdedigingsbeleid dat gericht was op het vasthouden van zand in de zeereep, werd verstuiwing van zand vanuit de zeereep naar het binnenduin gezien als een verlies. Dit zand leverde geen bijdrage meer aan het grensprofiel, en het stuivende zand vormde een bedreiging voor de bewoners. Er was namelijk risico op overstuiving van landbouwgrond of van de bebouwing (Arens en Mulder, 2008).

In 1990 werd de 1^e Kustnota (VWS, 1990) ingevoerd, met nieuw beleid voor het kustbeheer. De voornaamste reden was een aantal stormen aan het einde van de jaren 80. De aanname dat de totale som van erosie en sedimentatie op de Nederlandse kust gelijk is aan nul, bleek onjuist. De Nederlandse kust was op verschillende plaatsen onderhevig aan structurele erosie. Er verdween meer zand door kustafslag dan dat er werd aangevoerd. Hierop werd besloten tot het vaststellen van de Basiskustlijn (BKL), die op zijn plaats moet worden gehouden met zandsuppleties. Verlies van duingebieden werd niet langer geaccepteerd. Verdere redenen waren een afname van de onderhoudskosten, en een einde aan het verlies van natuurgebieden (Nikkels, 2010).

De definitie voor 'dynamisch kustbeheer' die in dit onderzoek zal worden gebruikt, is: "het zodanig beheren van de kust dat natuurlijke processen, al dan niet gestimuleerd, zoveel mogelijk ongestoord kunnen verlopen, waarbij de processen zodanig worden beheerd dat de veiligheid van het achterliggende gebied gewaarborgd blijft" (TAW, 2002). Hieruit kan als doel van dynamisch kustbeheer worden afgeleid om "natuurlijke processen in zeereep en bijbehorende habitats te herstellen, met behoud van veiligheid" (Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2003). Of zoals geformuleerd in het streefbeeld dynamisch kustbeheer voor de Friese Waddeneilanden: "een duingebied waar natuurlijke processen vrij spel hebben, binnen bepaalde randvoorwaarden" (Figuur 8.1 rechterfoto). Voorbeelden van natuurlijke processen in de zeereep zijn afslag, de vorming van embryonale duinen vóór de duinvoet, de verstuiwing van zand en het (incidenteel) binnenstromen van de zee (Arens e.a., 2007).

Omdat in de huidige periode kustafslag de overhand heeft over aangroei zijn zandsuppleties essentieel voor de aanvoer van voldoende zand. Natuurlijk kustherstel is namelijk alleen mogelijk als er voldoende zand aanwezig is. Er zijn echter ook tijden met een overvloed van zand in de kustzone (Slim en Löffler, 2007).

In h.e.a.gemeen heeft de natuur van de duinenkust baat bij zandsuppleties; het duinareaal neemt daardoor niet meer af, en men krijgt de mogelijkheid om de natuur zijn gang te laten gaan. Zo is in brede duingebieden de noodzaak om een gesloten, zeeerende zeereep in stand te houden afgenomen. Daarom planten de beheerders op veel plaatsen minder helm en laten ze de verstuiwing van zand toe (Slim en Löffler, 2007).

Bij dynamisch kustbeheer is het vastleggen van zand voor de duinvoet als buffer voor slechtere tijden – zoals vroeger gebeurde – niet meer nodig. Door het suppleren wordt structurele erosie aan de zeezijde tegengegaan. Het bij verstuiwing bewegende zand blijft binnen de waterkeringszone behouden, en draagt daardoor bij aan de waterkeringsfunctie (Arens e.a., 2007; Slim en Löffler, 2008).

In een groot aantal gebieden waar dynamisch duinbeheer is toegepast, is er sprake van een herstel van de natuurlijke dynamiek van de duinen. De zeereep is natuurlijker geworden, de

helmaanplant is gestopt en de aanwezige helm is vitaler geworden. In 2000 heeft het Ministerie van Verkeer & Waterstaat in de '3e Kustnota' besloten dat het beleid van dynamisch handhaven in de toekomst wordt voortgezet. Vanaf 2001 zouden de zandverliezen in dieper water worden gecompenseerd, en het dynamisch beheer van de duinen verder worden uitgebreid (VWS, 2000).

Voor de veiligheid op de langere termijn is de verstarring van de duinen een probleem. Het huidige beleid is erop gericht het hele actieve kuststelsel te laten meegroeien met de zeespiegel. Dit beleid veronderstelt dat in het gehele kustfundament (vanaf -20 m NAP tot aan de binnenduinrand) de natuurlijke zandtransportprocessen hun werk kunnen doen. Voor de duinen betekent dit dat verstuingen in de zeereep nodig zijn om het zandtransport naar het binnenduin mogelijk te maken en het hele duinmassief mee te laten groeien met de zeespiegel (Arens en Mulder, 2008).

Gerapporteerde effecten van dynamisch kustbeheer op duinvorming in de zeereep in de literatuur

Morfologie

De ervaring met traditioneel beheer is dat het fixeren van zand in de zeereep leidt tot een steiler profiel. Dit heeft als gevolg dat de zeereep steeds hoger wordt, zodat bij afslag meer schade ontstaat. Bovendien wordt bij afslag van een hoog duinfront meer zand aan het duinsysteem onttrokken dan bij de afslag van een laag duinfront. Daarom is het gunstiger als het zand verder in de zeereep wordt doorgevoerd (Arens e.a., 2010). Uit het onderzoek van Arens e.a. (2010) blijkt dat dynamisch duinbeheer een gunstig effect op de zeereep heeft, maar dat er genoeg gebieden zijn waar het effect uitblijft. Eén reden hiervoor is dat de zeereep zo dicht begroeid is met helm dat deze helm al het passerende zand invangt; een andere dat door aangroei de aanstuiving steeds verder voor de voormalige zeereep komt te liggen.

Langs de kust is een beperkt aantal gebieden waar dankzij dynamisch kustbeheer een redynamisering van de zeereep optreedt, en waar daadwerkelijk zand tot in de achter de zeereep gelegen duinen kan stuiven. Langs het grootste deel van de kust is er echter sprake van het invangen van zand in de huidige zeereep, waarbij deze in omvang – zeer vaak in hoogte – toeneemt. Het is de vraag of dit de gewenste ontwikkeling is (Arens e.a., 2010).

Het zandtransport vanaf het strand in landwaartse richting wordt sterk geremd door de aanwezigheid van een gesloten zeereep, en nog sterker als er stuifschermen aanwezig zijn aan de voet van deze zeereep. Zandtransport landinwaarts is in zulke gevallen slechts marginaal, en alleen aantoonbaar bij een krachtige, aanlandige wind (Janssen en Van Gelderen, 1993). Een zandige kust biedt kansen voor de natuur en leidt tot een duurzamer kuststelsel. Zo is de aanvoer van zand vanaf het strand essentieel voor een vitale helmbegroeiing (Slim en Löffler, 2007).

Maatregelen

Voor het invoeren van dynamisch duinbeheer kan het noodzakelijk zijn om het werkgebied van de kustbeheerder te vergroten. Bij een groter gebied is het niet noodzakelijk om het hele zandvolume dat nodig is voor de kustbescherming in een smalle zeereep vast te houden. Dit zandvolume kan ook elders 'gereserveerd' worden, en daardoor is het niet meer nodig om een hoge, rechte en met helm ingeplante zanddijk in de zeereep in stand te houden. Het noodzakelijk zandvolume kan daardoor een natuurlijk reliëf, aanzien en begroeiing krijgen. In brede duingebieden is het mogelijk dat dit reliëf zonder menselijk ingrijpen ontstaat (Janssen en Van Gelderen, 1993).

Eén van de mogelijkheden om de dynamiek in de zeereep te vergroten is het niet meer inplanten of lokaal verwijderen van de aanwezige helmbeplanting. Dit biedt kansen voor kleinschalige verschuivingen, met een grotere dynamiek in de zeereep en een rijkere plantengroei. Op microschaal kan dit in korte tijd leiden tot reliëfvorming, in schaalgroottes tot 1 m. Op iets grotere schaal kunnen er verstuingen en stuifkuiltjes (van 1 tot 10 m) ontstaan, in een periode van weken tot maanden. Op een tijdschaal van maanden tot jaren vindt er reliëfvorming op mesoschaal (10 tot 100 m) plaats. En tenslotte kan er op de zeer lange termijn (10 tot 25 jaar) reliëf op macroschaal ontstaan, bijvoorbeeld door het ontstaan van duinen of zelfs duincomplexen (Janssen en Van Gelderen, 1993).

Suppleren

Als sinds de jaren 70 van de vorige eeuw vinden er zandsuppleties plaats langs de Nederlandse kust. Vóór 1990 was dit vooral om opgelopen schade aan de kust te herstellen. Na 1990, sinds de beleidskeuze voor dynamisch handhaven zijn de suppleties in de eerste plaats bedoeld als zandvoorraad (slijtlaag). Eén van de voordelen van zandsuppleties is dat ze relatief goedkoop zijn, bijvoorbeeld in vergelijking met dijken of strandhoofden. Verder passen ze bij het natuurlijke karakter van de kust, en tenslotte is het een flexibele methode om kustachteruitgang te bestrijden (Van Heuvel e.a., 1996).

De keuze voor suppleren als de belangrijkste methode om kustachteruitgang te bestrijden sluit goed aan bij de wensen uit de recreatie en natuursector. Door zandsuppleties blijft de strandbreedte stabiel, of neemt zelfs toe. Recreatie en toerisme profiteren hiervan. Verder schept suppleren ruimte voor de versterking van de natuurlijke processen in het duingebied. In dit kader is een strikte scheiding tussen de verschillende functies in het duingebied ongewenst. Wanneer er namelijk een brede waterkeringszone wordt gedefinieerd, kunnen de verschillende functies in het duingebied beter verweven worden. Een brede waterkeringszone biedt met name mogelijkheden voor een versterking van de natuurlijke dynamiek (Van Heuvel e.a., 1996).

Evaluatie

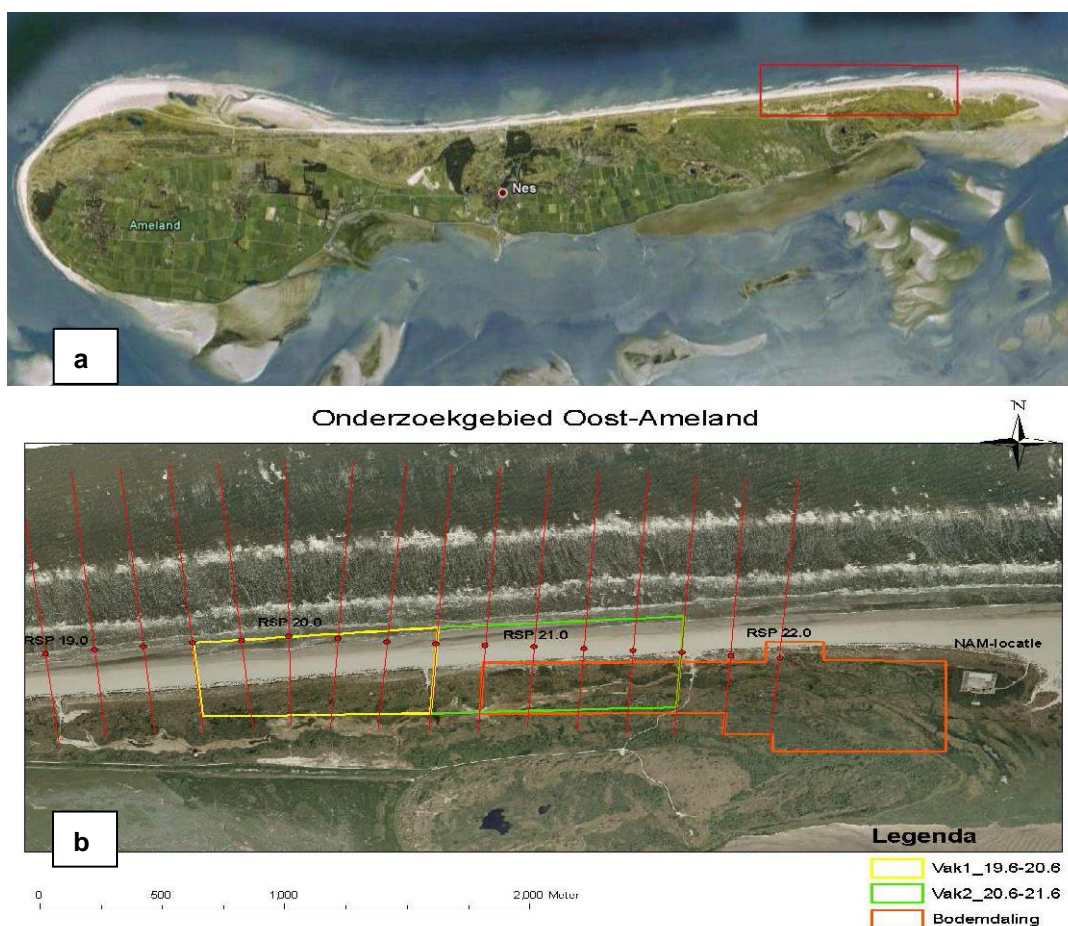
Arens e.a. (2007) trekt onder andere de volgende conclusies over de effecten van dynamisch kustbeheer op de zeewering:

1. Door het handhaven van de kustlijn door suppleties is het mogelijk gebleken om de zeereep meer dynamisch te beheren en het onderhoud te verminderen.
2. Onder de omstandigheden in de onderzochte periode (relatief weinig stormen met extreem hoog water) heeft dynamisch kustbeheer niet tot een bedreiging voor de zeereep geleid.
3. Door het uitvoeren van suppleties vindt minder aanval op de duinvoet plaats, zodat er nauwelijks structurele duinafslag optreedt. Hierdoor kan veel minder onderhoud aan de zeereep worden gepleegd. De duinen die voor de zeereep waren gevormd, hebben een groot deel van de afslag van de storm van 2006 opgevangen.
4. Op veel plaatsen is de zeereep in volume toegenomen. Hij is hoger en breder geworden, en de duinvoet is zeewaarts verplaatst. Op sommige plaatsen is als gevolg van doorstuiving de zeereep ook aan de achterkant verhoogd (Arens e.a., 2007).

Casestudie Oost-Ameland

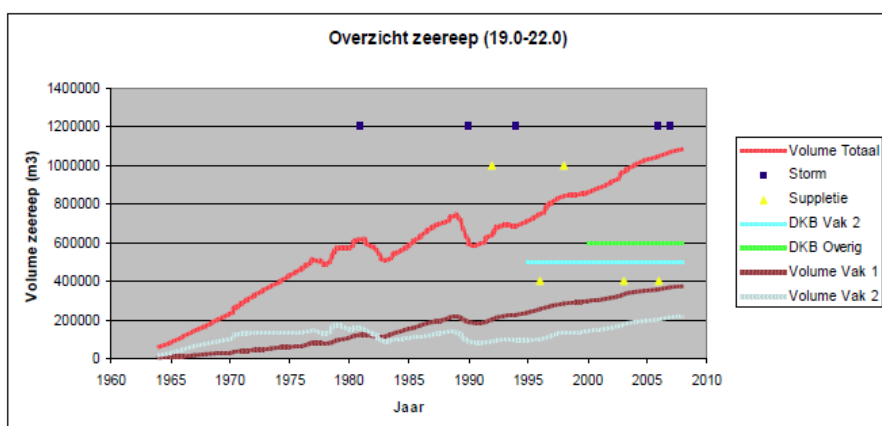
Op Ameland is er – na het invoeren van dynamisch handhaven van de kustlijn door zandsuppleties – een geleidelijke afname van het duinonderhoud geweest. Naar het oosten van het eiland toe, vanaf rijksstrandpaal (RSP) 17.0 (Kooioerdstuifdijk) werd het minste onderhoud gedaan, omdat hier vrijwel alleen natuurbelangen in het geding zijn.

Het onderzoekgebied bestaat uit het kustvak tussen RSP 19.0 en 22.0 op Oost-Ameland (Figuur 8.2). Binnen dit gebied is er bijzondere aandacht voor de twee vakken die gebruikt zijn voor het monitoren van de effecten van dynamisch kustbeheer. Vak 1 ligt tussen RSP 19.6 en 20.6, en heeft tussen 1995 en 1999 als referentiegebied gediend voor Vak 2. Vak 2 sluit hierop aan (RSP 20.6 – 21.6) en is de locatie waar in deze zelfde periode een experiment met dynamisch kustbeheer plaatsvond. In 1995 is het regulier kustbeheer hier stopgezet, waarbij de effecten zijn gemonitord door het Natuurcentrum Ameland (NCA) (Krol, 2006). Tot en met het jaar 1999 is het referentiegebied (Vak 1: RSP 19.6 – 20.6) onderzocht, alwaar toen nog het normale onderhoud werd uitgevoerd. Vanaf het jaar 1999 is ook hier het reguliere onderhoud achterwege gebleven, en is het gehele gebied tussen de strandpalen 19.6 en 21.6 gelijk behandeld door Rijkswaterstaat. Tussen 1995 en 2002 zijn deze gebieden jaarlijks gemonitord door het NCA (Krol, 2006). Het vak 'Bodemdaling' geeft het vak aan dat gekarteerd wordt in het kader van de 'Monitoring effecten bodemdaling op Ameland-Oost' (Slim e.a., 2005). Op Ameland-Oost wordt sinds 1986 aardgas gewonnen door de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM). De locatie van deze aardgaswinning is aangegeven met 'NAM-locatie' op de kaart. Door deze aardgaswinning treedt bodemdaling op de in het gebied, waarvan de effecten sinds 1988 gemonitord worden (BCA, 2008; Eysink, 2005; NAM, 2010). De zeereep die in dit onderzoek geanalyseerd wordt sluit aan op het gebied van onderzoek naar de ecologische effecten van de bodemdaling (Slim e.a., 2005).



Figuur 8.2 a Locatie van onderzoekgebied op Ameland (www.maps.google.com); *b* Onderzoekgebied Oost-Ameland. Weergegeven zijn de rijksstrandpalen (RSP) 19.0 tot en met 22.0 (rode stippen om de 200 m), de JARKUS-transecten (rode lijnen), de twee Vakken en het gebied dat gemonitord wordt in het kader van het project 'Monitoring effecten van bodemdaling op Oost-Ameland'

Voor de analyse is gebruik gemaakt van hoogte gegevens (JARKUS data) over een periode van 1964 en 2010 en meer specifiek van het kustbeheer, de JARKUS data, hoogwaterstanden, luchtfoto's, en veldgegevens over de vegetatie over de periode 1994 - 2010.



Figuur 8.3 Ontwikkeling volume zeereep (19.0522.0) met hoogwatergebeurtenissen (storm), zandsuppleties, het beheer (DKB = invoering dynamisch kustbeheer), en volumes van Vak 1 en Vak 2. Voor suppleties is er onderscheid tussen suppleties binnen de onderzochte zeereep (bovenste symbolen) en suppleties ten westen hiervan (onderste symbolen)

Het beeld wat uit deze gedetailleerde analyse naar boven komt is dat de zeereep zich gedurende de tijd in een lineaire trend opbouwt, maar dat deze trend (meestal) meerdere malen onderbroken wordt door een trendbreuk (Figuur 8.3). Deze trendbreuk hangt samen met een hoogwatergebeurtenis (storm), en leidt tot een (tijdelijke) afname in het duinvolume. Vervolgens neemt het volume zand in de zeereep weer verder toe. Hierbij moet worden aangetekend dat de zandvoorraad in dit kustvak in voldoende mate aanwezig is om een optimaal sediment transport richting het duin te garanderen.

In de periode sinds de invoer van het dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland, is er vooralsnog sprake geweest van een redelijk continue toename in zandvolume zonder trendbreuk. Deze periode loopt echter al vanaf 1990, en er is dus geen verandering opgetreden in de ontwikkeling van het zandvolume na het invoeren van dynamisch kustbeheer. De verschillen in kustvakken laten zich eerder verklaren door andere factoren als de 'wash over' in het ene kustvak, en externe factoren als suppleties en stormen. Het invoeren van het dynamisch kustbeheer lijkt wel te hebben geleid tot de vorming van een meer natuurlijke duinvoet. In delen van de zeereep vormt zich een nieuw voorduin, en is er sprake van het ontstaan van primaire duintjes op het strand vlak voor het voorduin. Dit bevestigt het beeld wat er in de literatuur over dynamisch kustbeheer naar voren komt namelijk dat dynamisch kustbeheer leidt tot een meer natuurlijke en gevarieerde zeereep, dat na invoering van dynamisch kustbeheer het volume van de zeereep is gegroeid, en dat dynamisch kustbeheer derhalve geen bedreiging vormt voor de kustveiligheid.

De periode van het onderzoek is echter te kort om de toekomstige ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer te kunnen voorspellen. Met name het effect van hoogwater events op de zeereep onder dynamisch duinbeheer is nog onzeker. De twee hoogwater events die in de onderzoeksperiode plaats vonden, hadden geen zichtbaar effect op de duinontwikkeling. Dat is in eerste instantie positief te noemen. Maar of dit ook geldt voor alle stormen is moeilijk te zeggen op basis van dit onderzoek.

9 Panoramafoto's

9.1 Inleiding

Naast chemische en fysieke metingen aan bijvoorbeeld grondwater en wadplaten en het tellen van bijvoorbeeld planten of vogels bestaat er sinds lang behoefte aan een beeldmonitoring van Oost-Ameland. Wellicht onder het motto: "één beeld zegt meer dan duizend woorden" wordt er sinds 2004 een digitale beeldmonitoring uitgevoerd op de Hon en het Oerd waarvan in dit rapport verslag wordt gedaan. Aanleiding was ook dat er een aantal locaties in het gebied waren waar de Bodemdalingscommissie specifiek onderzoek naar heeft gedaan waarvan zowel de terreinbeheerder It Fryske Gea, de Bodemdalingscommissie en de onderzoekers vonden dat beelden van die locatie verduidelijkend zouden kunnen zijn. Interessante locaties waren en zijn bijvoorbeeld een vallei in het Oerd waar meidoornsterfte optrad, een stormvloedgeul ten westen van het baken waar mogelijk sterke erosie zou kunnen optreden en locaties langs de zuidrand van de Hon om daar de vegetatieontwikkeling en mogelijke aanwas of erosie van de kwelderrand vast te leggen. De 5 locaties die in dit rapport worden behandeld zijn zichtbaar op (Figuur 9.1).

Teneinde de landschappelijke en biotische veranderingen in de loop van de tijd vast te leggen en voor iedereen zichtbaar te maken zijn jaarlijks rond 1 juni op deze vaste standpunten 360 graden panoramafoto's gemaakt



Figuur 9.1 Kaart met de standpunten van de opnames. De namen verwijzen naar tabel 9.1.

9.2 Methodiek

De standpunten in deze rapportage betreft 5 locaties. In de vorige rapportage (de Vlas 2017) betrof het 6 locaties, maar een locatie in een meidoornvallei nabij het huidige standpunt 4 (Tabel 9.1, Figuur 9.1) is na 2016 niet meer opgenomen omdat het zicht door groei van met name wilgen volledig weggenomen werd. De vallei is inmiddels 'dichtgegroeid'. Standpunt 4 (Meidoornvallei buiten) is wel voortgezet na 2016 en laat een overzicht zien over deze meidoornvallei waar enkele decennia geleden zorg over sterfte was.

Standpunt 5 (vallei NC02) wordt sinds 2006 opgenomen. Deze vallei ligt direct ten westen van de AME-1 locatie. De vallei wordt door de Bodemdalingscommissie onderzocht in het kader van inundaties met zeewater en de invloed op de vegetatie en hierover wordt elders in de integrale rapportage 2023 gepubliceerd. Dit standpunt is juist gekozen om deze vallei en de vegetatie in beeld te brengen.

Standpunt 1 (Baken) ligt op een duintje tussen de AME-1 locatie en het Baken op de Hon in. In noordelijke richting ligt een stormvloedgeul waardoor met forse stormen zeewater van de Noordzee naar de Hon stroomde. De verwachting was dat door de diepe bodemdaling door de gaswinning, die hier maximaal is, deze geul zou 'groeien' in breedte en diepte en er mogelijk een soort doorbraak ten oosten van de AME-1 locatie zou ontstaan. In zuidelijke richting ontstaat een overzicht over de Hon direct ten oosten van de Oerderduinen.

Standpunt 3 (Hon paal 27,2) ligt op de zuidkant van de Hon niet ver ten oosten van de duinen van het Oerd. Bij deze paal 27,2 ligt een kleine verhoging vanwaar rondom de kweldervegetatie zichtbaar is. Tevens is zichtbaar dat het gebied als broedgebied voor de grote meeuwen (Zilvermeeuw en Kleine mantelmeeuw) dient en in sommige jaren broedt er ook een klein aantal (<10) paar lepelaars waarvan de nesten op sommige foto's zichtbaar zijn.

Op de wadrand van de Hon, ver naar het oosten, ligt standpunt 2 (Hon paal 25,8). Deze locatie is van belang om de ontwikkeling van de kwelderrand op de overgang van kwelder naar wad in beeld te brengen en de dynamiek daar vast te leggen.

Tabel 9.1 Plaatsdata van de opnamestandpunten van de panoramafoto's.

Nummer	Plaats	X	Y
1	Baken	190685	608706
2	Hon paal 25,8	192086	608330
3	Hon paal 27,2	190604	608177
4	Meidoornvallei buiten	189897	608169
5	Vallei NC02	190193	608939

Tabel 9.2 Opname data van alle jaren.

Jaar	Datum	Jaar	Datum
2004	27-mei	2014	28-mei
2005	26-mei	2015	31-mei
2006	30-mei	2016	1-jun
2007	18-jun	2017	1-jun
2008	28-mei	2018	31-mei
2009	3-jun	2019	3-jun
2010	27-mei	2020	2-jun
2011	8-jun	2021	1-jun
2012	5-jun	2022	31-mei
2013	31-mei		

Steeds rond 1 juni (Tabel 9.2) zijn vanaf de vijf standpunten foto's rondom gemaakt met enige overlap zodat er later 360 graden panorama's van gemaakt kunnen worden. In 2004 zijn de foto's gemaakt met een Canon EOS 10D camera die foto's van 3072x2048 pixels genereert. In de jaren 2005 t/m 2010 is gebruik gemaakt van een Canon EOS 1D Mark II camera die foto's van 3504x2336 pixels maakt en in 2011 t/m 2019 is een Canon EOS 1D Mark IV camera gebruikt die foto's van 4896x3264 pixels produceert. In 2020 t/m 2021 is een Canon EOS 5DSR camera gebruikt die foto's van 8688x5792 maakt en in 2022 betrof het een Canon EOS R5 camera die foto's van 8192x5464 pixels maakt.

Voor deze rapportage zijn de beelden aan elkaar 'gestitcht' met het programma Photoshop tot een 360 graden panorama.

De panorama's worden in (Bijlage B.1 t/m B.5) getoond. Gezien de beeldverhouding van ongeveer 40:2 levert dat op een eventueel op A4 geprint document slechts smalle streepjes beeld op die lastig zijn te beoordelen. Het is beter om de panorama's op een beeldscherm te bekijken waarop ingezoomd kan worden.

9.3 Resultaten

Bij standpunt 1 (Bijlage B.1, Baken) is duidelijk sprake van een forse successie van zowel de morfologie als de biotiek. Het strand op de achtergrond wat in 2004 nog zichtbaar is, is in 2022 vervangen door een metershoog duingebied en de zee is niet meer zichtbaar. Daardoor is ook de dynamiek uit de stormvloedgeul verdwenen en deze is door vegetatievorming vastgelegd. Ook de duinen aan beide kant van de geul zijn volledig begroeid geraakt en vastgelegd, met name door Duindoorn (*Hippophae rhamnoides*).

Bij standpunt 2 (Bijlage B.2, Hon paal 25,8) op de rand van kwelder en wad is een uitbreiding van de kweldervegetatie op het wad te zien. Ook is zichtbaar dat de kale plekken op de rand van de kwelder vastgelegd worden door vegetatie. Op dit deel van de Hon vindt dus een uitbreiding van de kwelder op het wad plaats en er blijft een vloeiende overgang van wad naar kwelder bestaan.

Bij standpunt 3 (Bijlage B.3, Hon paal 27,2) blijft de vrij hoge grazige vegetatie sinds 2004 in stand. Er is geen erosie zichtbaar en ook geen successie in de richting van struweelvorming. Dit deel van de kwelder raakt iedere winter een of enkele malen overstroomd door zeewater waardoor struweelvorming uitblijft. De grote meeuwen en enkele lepelaars blijven het gebied sinds 2004 jaarlijks gebruiken als broedgebied.

Bij standpunt 4 (Bijlage B.4, meidoornvallei buiten) blijven de meidoornstruwelen in stand en er vindt zelfs uitbreiding plaats. Op de beelden midden-onder is te zien dat de meidoorns uit de vallei naar links en rechts oprukken. Ook blijven ze goed vitaal en rijkelijk bloeien.

In de vallei van standpunt 5 (vallei NC02) is in 2006 nog sprake van een vegetatie die gedomineerd wordt door korte grassen, voornamelijk Fiorin (*Agrostis stolonifera*). De vallei wordt 's winters meermaals gevuld met zeewater wat lang boven het maaiveld blijft staan. Hierover wordt elders gerapporteerd in deze integrale verslaglegging 2023. In het voorjaar van 2007 volgde een langdurige droogte waarna de vegetatie in de vallei grotendeels afstierf door een zoutkorst en sinds 2007 is daar een meer zoutminnende vegetatie voor teruggekomen. Met name Heen (*Bolboschoenus maritimus*) is op veel delen gaan domineren.

Op een aantal standpunten kan het interessant zijn om niet de gehele 360 graden in beeld te brengen maar de blik in een bepaalde richting te wenden. Als voorbeeld is dit gedaan in (Bijlage B.6) waarbij vanuit standpunt 1 bij het Baken de blik naar het noorden gericht is en uit het panorama alleen het dynamische terrein van een stormvloedgeul in de loop van de tijd wordt

gevolgd. Dan wordt duidelijk de successie van de vegetatie in de geul en het gebied er omheen zichtbaar in de periode van 2004 t/m 2022. Dit duidt op een afnemende dynamiek (wind en water) waardoor het kale zand vastgelegd raakt. Op de achtergrond is in 2004 het vrijwel kale strand zichtbaar met lage (<1 m) embryonale duintjes. Deze duintjes bouwen op in de zomer en werden bij een winterstorm weer vlak geveegd door overstromend zeewater. Deze situatie heeft zich voorgedaan tot 2007. Daarna zijn de duintjes ineens sterk gaan groeien en zijn ook in de wintermaanden doorgegroeid en zijn nu vele meters hoog. Tussen de AME-1 locatie (paal 23) en paal 24 en tegenwoordig zelfs nog oostelijker is een nieuw duingebied ontstaan. De angst voor een sterke erosie en een soort doorbraak van de kwelder tussen de AME-1 locatie en het baken blijkt ongegrond.

In de foto's zit voldoende informatie om met een fotobewerkingsprogramma een uitsnede te maken en dit als een soort vergroting te gebruiken voor een nadere analyse in de loop van de tijd. Als voorbeeld is dit in (Bijlage B.7) gedaan voor een detail uit de achtergrond van de in (Bijlage B.1 en B.6) getoonde stormvloedgeul. Dan wordt duidelijk de enorme groei van de embryonale duintjes op het strand zichtbaar die ook de afnemende dynamiek in de stormvloedgeul verklaren. Ook de duinen rond de vloedgeul zijn vastgelegd door vegetatiesuccessie. Met name Duindoorn heeft de duinen aan beide zijden gefixeerd.

Gezien het feit dat steeds binnen enkele dagen rond 1 juni de panorama opnames gemaakt zijn (uitgezonderd 18 juni in 2007) kunnen de beelden ook gebruikt worden om de variatie in groeiseizoenen tussen de jaren te illustreren. De bloei van Vlier en Meidoorn op opnamestandpunt 4 (meidoornvallei buiten) is daarvan een voorbeeld. En de vegetatiesuccessie kan gezien worden, zeker als foto's uit de beginjaren met de laatste jaren vergeleken worden.

In (Bijlage B.7) wordt een luchtbeeld uit 1993 vergeleken met 2022. Beide foto's zijn gemaakt door Jaap de Vlas met een camera aan een vlieger. Ook hierop is te zien dat met name de hogere duinen waar ook het baken in staat begroeid zijn geraakt met Duindoorn en dat met name het strand ten noorden daarvan (links op de foto's) opgehoogd is en begroeid is geraakt.

10 Overige relevante abiotische factoren

10.1 Algemeen

Naast de bodemdaling spelen nog een aantal abiotische factoren een rol in de morfologische en/of ecologische ontwikkelingen in en rond de Waddenzee. Dit zijn onder andere:

- de waterstanden;
- regenval en verdamping,
- de grondwaterstand in de duinen;
- de grondwaterkwaliteit in de duinen.

Daarom zijn ook gegevens van deze grootheden verzameld en bewerkt sinds het begin van het monitoringsprogramma. De gegevens van de waterstanden en van de regenval en verdamping worden in de volgende paragrafen behandeld. De gegevens van de grondwaterstanden en de grondwaterkwaliteit worden elders in het verslag besproken.

Vanaf 2010 worden de veranderingen van de wadplaten gemeten met LIDAR (zie Hoofdstuk 5). Om de veranderingen van de wadplaten te verklaren worden ook windgegevens verzameld en geanalyseerd. Deze relevante windparameters worden in deze rapportage toegevoegd. Verder worden er vanaf 2019 ook golven bij Nes gemeten. Fysisch gezien zijn golven nog een directer proces dan wind dat de veranderingen van wadplaten beïnvloeden. De relevante golfparameters afgeleid uit de verzamelde golvenmetingen worden samen met de windparameters gerapporteerd.

10.2 Waterstanden

Waterstanden en waterstandsvariaties spelen een belangrijke rol in de morfologie en de ecologie in en om de Waddenzee. In een vorige rapportage (Eysink e.a., 2000) is een uitgebreid overzicht gegeven van de oorzaken van de waterstandsvariatie, i.e.:

- astronomisch getij;
- op- en afwaaiing door wind;
- lange-termijn veranderingen in het gemiddeld zeeniveau door klimaatsverandering.

10.2.1 Representatieve waterstanden en stormvloedgegevens

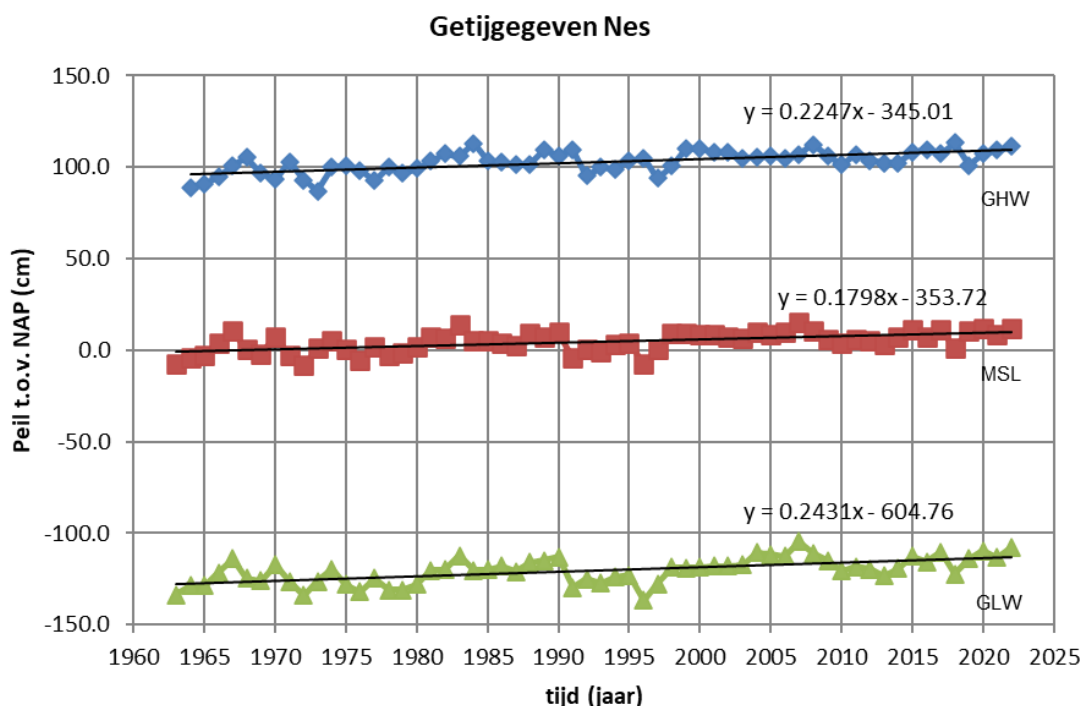
Uit de bestudering van verschillende getijstations in de Waddenzee is gebleken dat het station Nes bij de pier voor de veerboot het meest representatief is voor de kwelders Nieuwlandsreid en in iets mindere mate voor De Hon op Ameland-oost (zie Eysink e.a., 1995, 2000).

De kwelder op De Hon en de lage duinvalleien ten westen van de NAM-locatie worden tijdens een storm overspoeld door zeewater via de stormvloedgeulen door de duinen ten oosten van de NAM-locatie en via de lage kant aan de Waddenzeezijde. Het water via de stormvloedgeulen dringt als gevolg van waterstandsverhoging aan de Noordzezijde door opwaaiing en/of door golfopzet rond het verhoogde hoogwater binnen. De capaciteit van de smalle stormvloedgeulen met een relatief hoge drempel is echter beperkt. Verwacht wordt dat het meeste water iets later via de wadzijde binnenstroomt nadat het hoogwater om de oostpunt is getrokken. Het niveau van het hoogwater zal bij De Hon nog niet zover zijn opgeslingerd en gemiddeld iets lager zijn dan bij het Neerlandsreid (orde 0,05 – 0,1 m). Door verschil in opwaaiing kan dit verschil onder stormomstandigheden nog wat groter of iets kleiner zijn. Al met al geeft ook hier het station Nes een redelijke indicatie voor de kans op overstromen van De Hon.

Dit station wordt gebruikt voor het verzamelen van de jaarlijkse waarden van gemiddeld hoogwater (GHW), gemiddeld zeeniveau (MSL), halfcij i.e. $(GHW+GLW)/2$, gemiddeld laagwater (GLW) en de hoogwater-overschrijdingsfrequentie. Het blijkt dat het jaargemiddelde halfcij lager

ligt dan het jaargemiddelde MSL. Het verschil is vrijwel constant (± 1 à 2 cm), maar per station verschillend. Via die relatie zijn de waarden voor MSL herleid voor die jaren waarin geen MSL was bepaald.

Met name fluctuaties in het jaarlijkse GHW en in het aantal extreme hoogwaters, waarbij de kwelders en de lage duinvalleien overstromen, zijn van belang voor het verklaren van de ontwikkelingen in de vegetatie in deze gebieden. Daarom is het verloop van GHW, MSL en GLW van het station Nes vanaf het begin van de waarnemingen in 1963 gegeven in (Figuur 10.1) en zijn de jaarlijkse hoogwater-overschrijdingsgegevens samengevat in (Tabel 10.1).

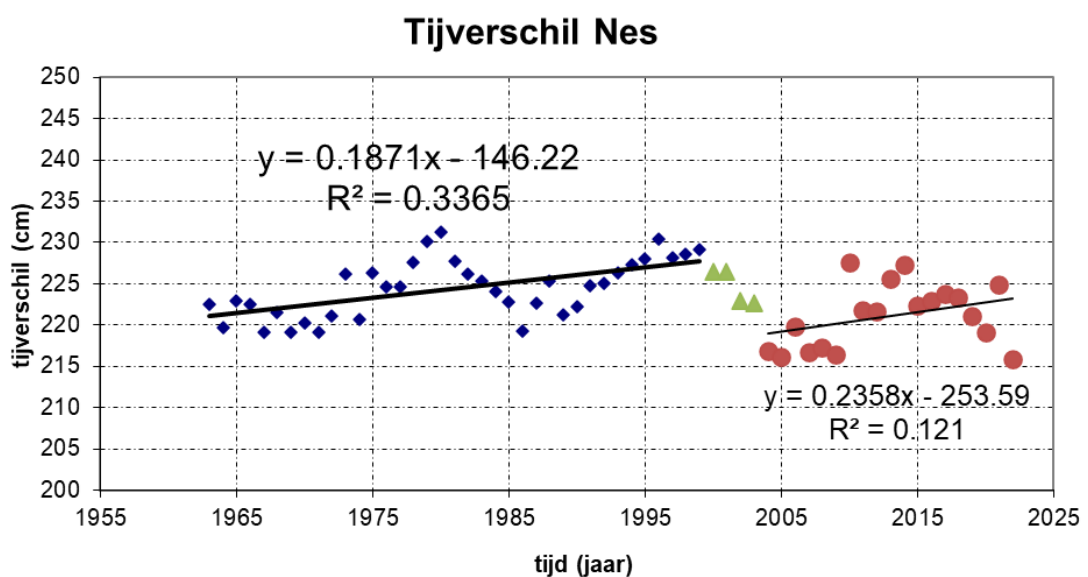


Figuur 10.1 Verloop gemiddeld hoogwater, gemiddeld zeeniveau en gemiddeld laagwater Nes

Het tijverschil in Nes schommelt tussen circa 2,16 m en 2,31 m (Figuur 10.2) en toont duidelijk het effect van de astronomische getijcomponent met een cyclus van 18,6 jaar en een amplitude in de orde van 6 à 7 cm. Het gemiddelde tijverschil over de hele periode is 223 cm. In de voorgaande rapportages was er geconcludeerd dat dit langjarige gemiddelde in de beschouwde periode geen trend tot verandering vertoonde. En dat het tijverschil bij Nes in de komende decennia waarschijnlijk niet significant zou veranderen. Met de toevoeging van de gegevens uit de afgelopen 7 jaar (2016 t/m 2022) is er echter een ander beeld te zien. De veranderingen in de tijd kunnen veel beter worden verklaard als er een plotseling verandering rondom 2000 in beschouwing wordt genomen. De perioden vóór en na deze sprong tonen dezelfde trend van het tijverschil, namelijk een lichte stijging in de tijd. Voor de trendanalyse zijn 4 tussenjaren (2000 t/m 2003, groene driehoekjes) weggelaten, waardoor de periode ervoor 37 jaar en de periode erna 19 jaar worden, dus respectievelijk ongeveer 2 en 1 keer de 18.6 jarige cyclus. Interessant is dat er sinds 2000 de sedimentatie in de vaargeul tussen Nes en Holwerd enorm is toegenomen, wat verband kan hebben met deze verandering van het getij. Maar het is nu niet duidelijk wat deze sprong in het getijverschil heeft veroorzaakt. De oorzaak moet worden gezocht in de veranderingen in Ameland-zeegat waarin het station Nes zich bevindt.

In de voorgaande rapportage zijn de overschrijdingsgegevens van 1981-2015 gepresenteerd samen met langjarig gemiddelde overschrijdingen. In dit verslag zijn deze gegevens aangevuld tot 2022. (Tabel 10.1) laat een aantal extreme stormvloed en in de periode 2016-2022 zien. Het niveau van NAP+2,5 m werd in Nes in deze periode gemiddelde tweemaal per jaar overschreden, eenmaal in 2016, vijfmaal in 2017, tweemaal in 2019, en driemaal in 2020 en 2022. Het niveau NAP+3,0 m werd in totaal tweemaal overschreden, eenmaal in 2019 en eenmaal in 2022. In 2019 werd zelfs de waterstand van NAP + 3,5 overschreden. Extreme waterstanden zijn in de afgelopen 7 jaar ongeveer even vaak voorgekomen dan de 5 jaar periode daarvoor.

Het niveau van NAP+2,0 m werd in deze periode (2016-2022), behalve in 2015, boven het gemiddelde aantal overschreden. Dit geldt ook voor het niveau van NAP+1,5 m, waarbij de lagere delen van de kwelders onderlopen. Het betekent dat de kwelders iets meer frequent werden overstroomd en dat gemiddeld het overstroomde oppervlak en de waterdiepte per overstroming groter waren dan gemiddeld. Hierdoor kan de jaarlijkse opslibbing op de kwelders in deze periode hoger zijn geweest dan gemiddeld.

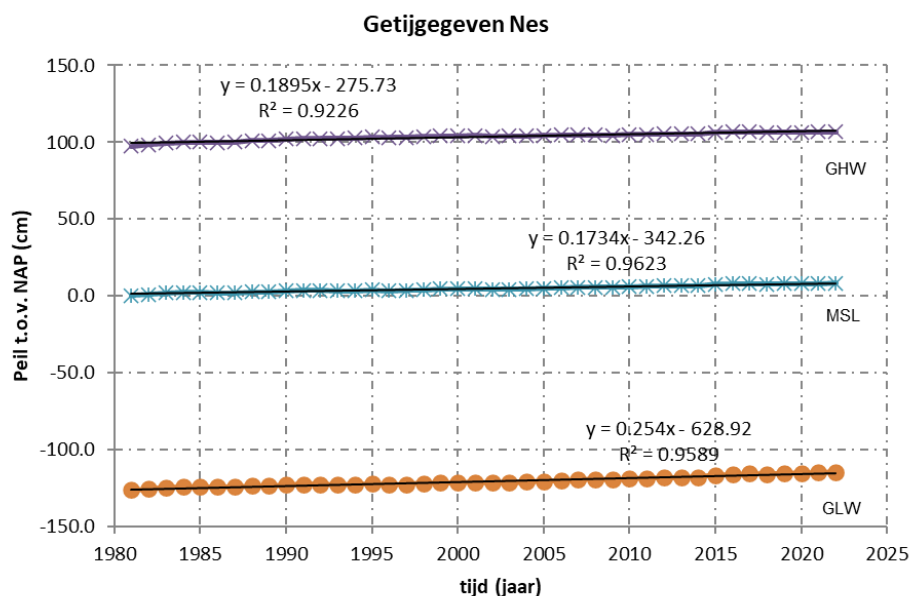


Figuur 10.2 Verloop gemiddeld tijverschil Nes

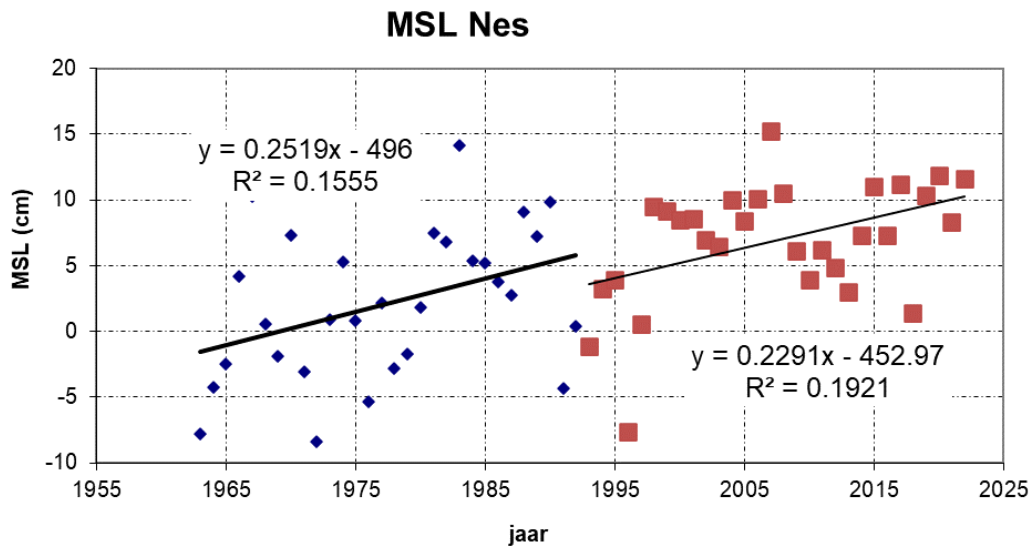
10.2.2 Zeespiegelstijging

Voor de analyse van zeespiegelstijging zijn de trendmatige veranderingen van de kenmerkende waterniveaus (GLW, MSL, GHW, zie Figuur 10.1) lokaal gemeten bij Nes beschouwd. In (Figuur 10.1) zijn de trends afgeleid door lineaire regressieanalyse van de waarnemingen vermeld: GLW, MSL en GHW verhogen respectievelijk ongeveer 24, 18 en 22 cm/eeuw, iets anders dan in de vorige rapportage toen de gegevens tot 2015 waren geanalyseerd (23, 19 en 22 cm/eeuw). Omdat de waterstanden een duidelijk 18.6 jarige variatie vertonen, zijn de zo bepaalde trends gevoelig voor de exacte lengte van de meegenomen periode. Daarom wordt de 'moving-average' van de gemeten waterstanden bepaald met een middellingsperiode van 19 jaar bepaald, en dan de bijbehorende trend bepaald, zie (Figuur 10.3). De verlopen van GLW, MSL en GHW zijn nu veel gladder en vertonen een duidelijk lineaire trend. Middelen over 19 jaar is blijkbaar effectief, niet alleen om de 18.6 jaar-cyclische variatie weg te filteren, maar ook de stochastische variaties door veranderingen van de weeromstandigheden. De zo bepaalde snelheden van stijging zijn ongeveer 19 cm/eeuw, 17 cm/eeuw en 25 cm/eeuw voor respectievelijk GLW, MSL en GHW.

In de voorgaande rapportages was er steeds geconcludeerd dat de meetgegevens bij NES geen verandering van de zeespiegelstijging toont, met als reden dat de tijdserie van de metingen te kort is. Verschillende studies in de afgelopen jaren hebben geconcludeerd dat de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust aan het versnellen is, met als knippunt rondom 1993 (Steffbauer e.a., 2022; Deltares, 2023). De zeespiegelstijging na 1993 is duidelijk sneller dan daarvoor. Deze studies zijn allemaal gebaseerd op de metingen op de hoofdstations (Vlissingen, Hoek van Holland, Maassluis, IJmuiden, Den Helder, Harlingen, Delfzijl) langs de Nederlandse kust. Op basis van de metingen van 1900 tot 2015 concludeerde Steffbauer e.a. (2022) dat de snelheid van zeespiegelstijging vóór en na 1993 respectievelijk 1,7 en 2,7 mm/jaar is. Met de data tot 2021 berekende Deltares (2023) de snelheid na 1993 als 2,9 mm/jaar. De vraag is nu of wij dezelfde trendverandering kunnen constateren in de gegevens voor het station Nes. Daarom is de trendanalyse voor MSL opnieuw gedaan, maar nu voor de perioden vóór en na 1993 apart. De resultaten van de analyse (Figuur 10.4) kunnen de bevindingen van de hierboven genoemde twee studies niet bevestigen. Volgens de resultaten van de analyse is de stijging van MSL bij Nes na 1993 niet sneller dan daarvoor.



Figuur 10.3 Verloop moving-average (over de voorgaande 19 jaar) van gemiddeld hoogwater, gemiddeld zeeniveau en gemiddeld laagwater Nes



Figuur 10.4 Trendanalyse van gemeten gemiddeld zeeniveau bij NES, met onderscheid van vóór en vanaf 1993.

10.3 Neerslag en verdamping

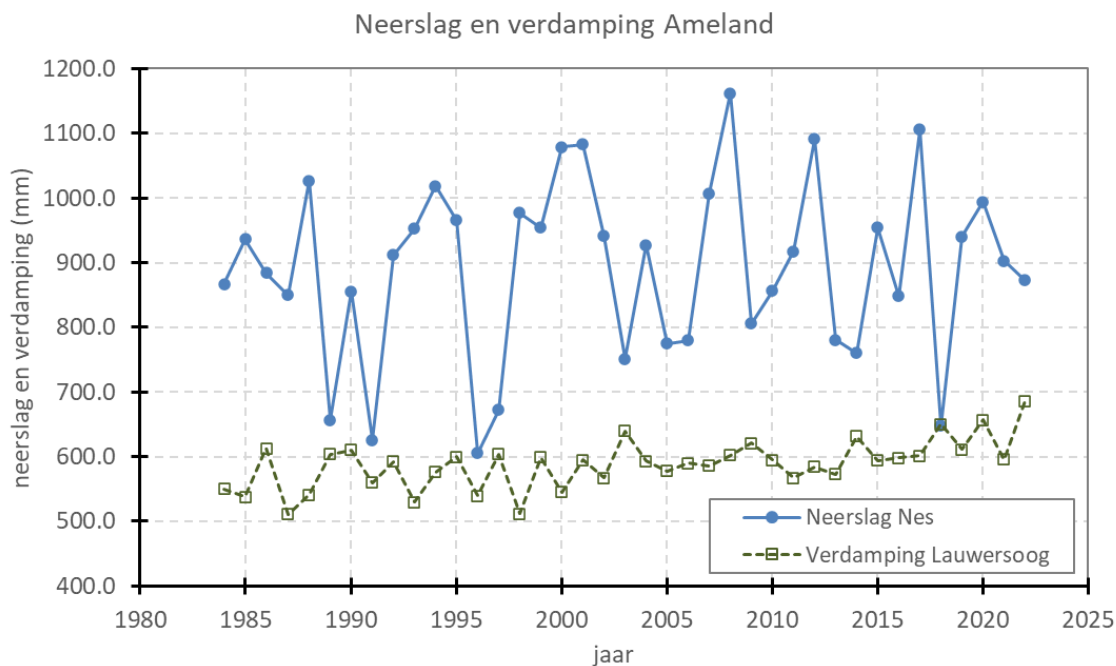
In de voorgaande rapportages zijn de gegevens van 1984-2015 gepresenteerd. In deze rapportage worden de gegevens van 2015-2022 gepresenteerd als aanvulling van het totale gegevensbestand. De verzamelde gegevens van de neerslag in Nes op Ameland en de verdampingscijfers voor Ameland volgens de methode Makkink voor de jaren 2010 t/m 2015 zijn gegeven aan het eind van deze paragraaf. De gegevens tonen decadicijfers, maandcijfers en jaartotalen.

10.3.1 Neerslag

De gemiddelde neerslag in Nes in de periode 1984-2010 bedroeg 885,7 mm/jaar en was daarmee 91,8 mm hoger dan het lange termijngemiddelde van 1951-1980. Gemiddeld over de periode 2016-2022 is de neerslag nog hoger, met 901,8 mm/jaar, ongeveer gelijk aan de 5 jaar (2011-2015) daarvóór (met 900,9 mm/jaar). Over de gehele periode 1951-2022 is er dus een toenemende trend te zien in het lange termijngemiddelde van de jaarlijkse regenval in Nes (zie Figuur 10.5). Opvallend is verder het extreem droge jaar 2018 waarin de neerslag (648,1 mm) net lager is dan de verdamping (650,2 mm), zie (Figuur 10.5).

10.3.2 Verdamping

De door het KNMI verstrekte verdampingscijfers voor Ameland betreft allemaal gewasverdampingscijfers volgens Makkink voor de locatie Lauwersoog. De locatie is representatief voor de verdamping op Ameland. De gemiddelde verdamping over de periode 1984-2022 bedroeg 588,0 mm, wat iets hoger is dan het gemiddelde van 579,0 mm in Den Helder over de periode 1965-1985. De verdamping op Ameland in de periode 2016-2022 is duidelijk hoger dan de gemiddelde verdamping, 628,5 mm/jaar. In het extreem droge jaar 2018 was ook de verdamping met een waarde van 648,1 mm extreem. 2018 is het eerste jaar sinds de metingen met een neerslagtekort (zie Figuur 10.5).

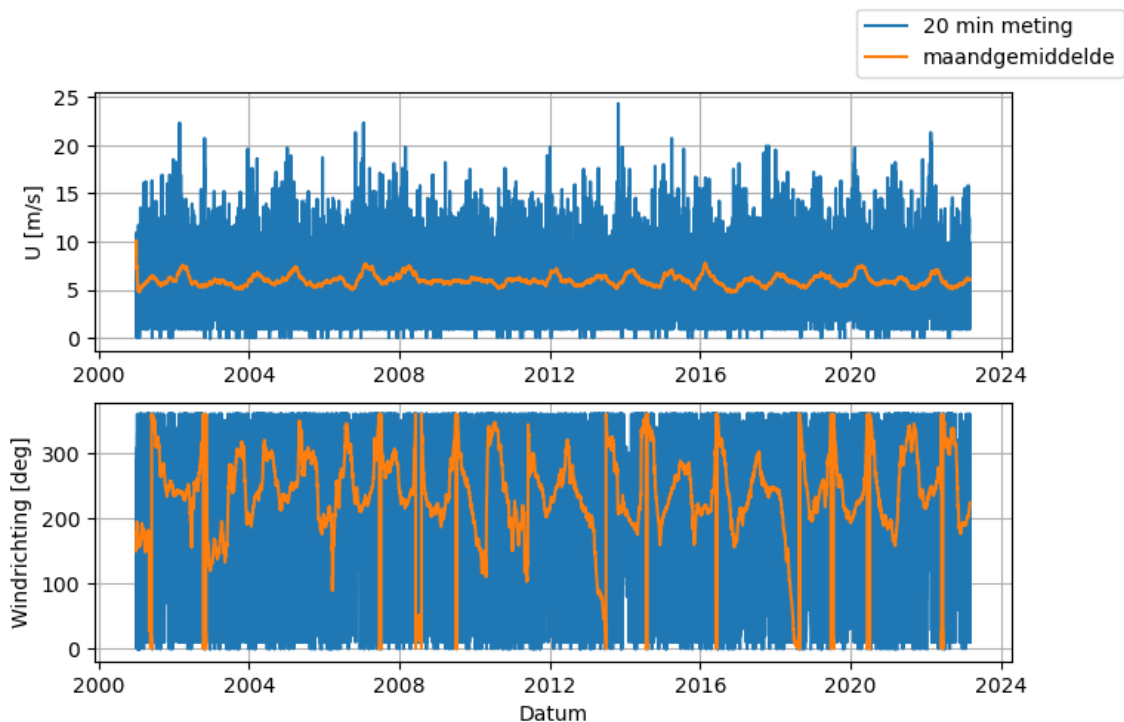


Figuur 10.5 Jaarlijkse neerslag en verdamping te Nes

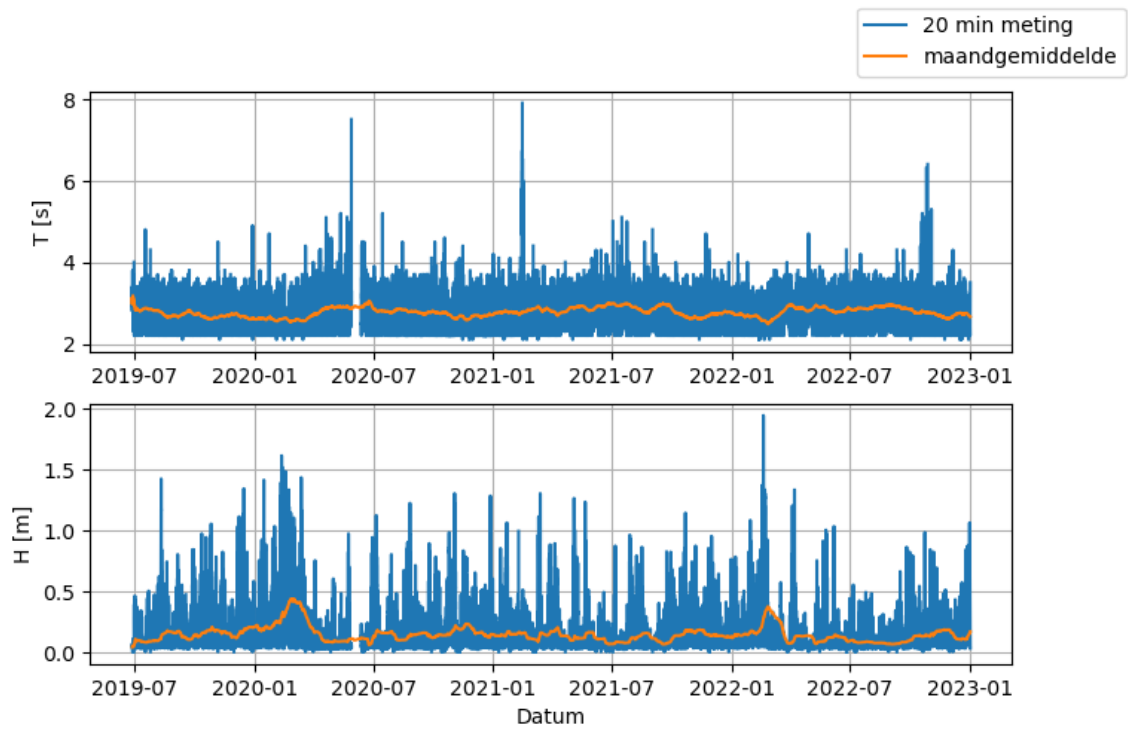
10.4 Wind en golven

(Figuur 10.6) laat de tijdseries van windsnelheid en -richting samen met de afgeleide maandgemiddelden zien. Op basis van de maandgemiddelde waarden van beide parameters is er een seizoenvariatie te zien, maar er is geen trendmatige veranderingen te constateren.

Vanaf 2019 worden ook golven bij Nes gemeten. De gegevens hiervan zijn weergegeven in (Figuur 10.7) De tijdserie is nog te kort om iets te zeggen over bijvoorbeeld trendmatige veranderingen conclusies te trekken.



Figuur 10.6 Tijdseries van windsnelheid (boven) en windrichting (onder).



Figuur 10.7 Tijdsreeën van golfperiode (boven) en golfhoogte (onder).

Neerslag- en verdampinggegevens Ameland 2010-2015

2010 Neerslag (mm)				maand	2011 (neerslag) (mm)			
decade 1	decade 2	decade 3	maand		decade 1	decade 2	decade 3	maand
19.6	9.8	19.7	49.1	Jan	14.2	19.6	5.2	39.0
31.7	5.3	25.7	62.7	Feb	9.9	18.8	16.2	44.9
23.8	10.9	8.1	42.8	Mar	1.3	1.3	2.6	5.2
30.5	0.0	1.8	32.3	Apr	4.7	4.5	0.0	9.2
38.2	15.1	9.6	62.9	May	0.3	8.7	23.7	32.7
27.6	18.2	0.9	46.7	Jun	8.6	51.6	35.2	95.4
4.9	40.2	11.1	56.2	Jul	8.9	77.4	63.6	149.9
39.6	48.4	89.0	177.0	Aug	33.3	33.3	84.8	151.4
3.4	61.1	29.4	93.9	Sep	79.5	14.2	4.9	98.6
10.5	38.6	49.6	98.7	Oct	59.2	53.3	9.2	121.7
32.3	28.2	22.8	83.3	Nov	1.9	1.3	7.5	10.7
20.2	24.6	6.2	51.0	Dec	75.2	46.2	37.3	158.7
totaal				jaar	totaal			
					917.4			

2010 Verdamping (mm)				maand	2011 Verdamping(mm)			
decade 1	decade 2	decade 3	maand		decade 1	decade 2	decade 3	maand
1.7	1.4	2.8	5.9	Jan	2.2	2.1	3.4	7.7
2.6	3.8	3.8	10.2	Feb	3.7	4.9	3.1	11.7
10.2	8.6	16.3	35.1	Mar	9.4	11.3	17.2	37.9
17.7	26.1	29.5	73.3	Apr	19.5	27.4	32.8	79.7
19.4	31.8	33.6	84.8	May	33.4	28.0	30.7	92.1
32.9	28.7	44.0	105.6	Jun	36.8	27.9	31.8	96.5
44.4	35.8	35.6	115.8	Jul	26.4	24.1	22.9	73.4
26.9	26.1	21.9	74.9	Aug	27.2	21.8	22.0	71.0
20.0	12.8	13.6	46.4	Sep	18.3	14.7	18.4	51.4
13.5	9.3	5.7	28.5	Oct	11.5	10.5	7.3	29.3
3.6	2.4	2.8	8.8	Nov	4.2	3.6	2.9	10.7
2.1	1.8	1.8	5.7	Dec	2.1	1.9	1.9	5.9
totaal				jaar	totaal			
					567.3			

2012 Neerslag (mm)				maand	2013 Neerslag (mm)			
decade 1	decade 2	decade 3	maand		decade 1	decade 2	decade 3	maand
49.9	10.5	23.3	83.7	Jan	19.8	6.1	34.2	60.1
0.8	13.5	4.0	18.3	Feb	23.0	5.3	1.6	29.9
18.2	2.1	0.0	20.3	Mar	12.1	15.4	4.9	32.4
22.6	6.1	35.9	64.6	Apr	5.7	12.2	3.4	21.3
15.3	35.5	7.3	58.1	May	2.7	34.6	18.0	55.3
26.8	19.4	40.9	87.1	Jun	0.0	16.4	62.3	78.7
28.9	78.4	35.9	143.2	Jul	3.6	0.2	26.9	30.7
35.4	5.6	94.5	135.5	Aug	10.6	32.3	0.3	43.2
0.3	45.9	77.2	123.4	Sep	39.1	71.9	1.5	112.5
48.3	42.1	50.4	140.8	Oct	10.2	47.6	39.1	96.9
36.9	7.7	27.2	71.8	Nov	72.9	18.9	31.7	123.5
55.3	30.4	58.9	144.6	Dec	28.0	20.9	47.6	96.5
totaal				jaar	totaal			
					781.0			

2012 Verdamping (mm)				periode	2013 Verdamping (mm)			
2.3	3.3	3.6	9.2	Jan	1.6	2.8	2.9	7.3
4.7	5.3	5.5	15.5	Feb	5.1	3.5	3.3	11.9
7.0	11.4	22.4	40.8	Mar	7.1	8.6	15.4	31.1
12.9	21.6	20.0	54.5	Apr	19.0	18.6	24.9	62.5
21.3	27.1	41.8	90.2	May	31.4	15.6	30.2	77.2
24.3	33.5	29.2	87.0	Jun	32.2	28.2	22.6	83.0
28.2	25.8	39.2	93.2	Jul	35.4	37.1	37.5	110.0
39.2	35.0	24.5	98.7	Aug	35.0	26.3	32.9	94.2
23.9	16.4	13.5	53.8	Sep	16.8	16.1	16.2	49.1
11.2	7.1	6.9	25.2	Oct	13.6	6.4	8.5	28.5
3.7	4.0	2.9	10.6	Nov	4.8	3.7	2.6	11.1
2.0	1.4	1.9	5.3	Dec	2.0	2.7	2.0	6.7
totaal				jaar	totaal			
					572.6			
584.0								

2014 Neerslag (mm)				periode	2015 Neerslag (mm)			
decade 1	decade 2	decade 3	maand		decade 1	decade 2	decade 3	maand
22.6	23.2	32.6	78.4	Jan	28.4	54.2	33.1	115.7
27.5	17.1	11.5	56.1	Feb	11.8	7.0	28.0	46.8
2.6	4.4	14.1	21.1	Mar	17.3	0.0	50.2	67.5
27.9	8.1	2.8	38.8	Apr	14.1	2.5	14.9	31.5
21.8	15.0	40.2	77.0	May	17.8	8.7	12.4	38.9
34.8	1.9	25.4	62.1	Jun	15.6	10.2	17.6	43.4
12.0	0.3	7.4	19.7	Jul	49.4	17.0	73.9	140.3
12.1	81.7	57.8	151.6	Aug	10.7	25.7	46.3	82.7
1.5	0.8	37.3	39.6	Sep	54.5	21.0	17.7	93.2
18.0	26.1	25.8	69.9	Oct	5.4	37.6	6.3	49.3
9.8	23.0	16.9	49.7	Nov	28.4	72.7	71.0	172.1
21.5	52.6	22.0	96.1	Dec	21.9	30.9	20.3	73.1
totaal				jaar	totaal			
					954.5			
760.1								

2014 Verdamping (mm)				periode	2015 Verdamping (mm)			
decade 1	decade 2	decade 3	maand		decade 1	decade 2	decade 3	maand
2.6	2.1	2.8	7.5	Jan	2.1	2.0	4.0	8.1
4.2	6.5	6.7	17.4	Feb	4.4	5.9	6.8	17.1
13.1	15.0	19.1	47.2	Mar	11.6	13.8	11.7	37.1
14.7	24.9	21.7	61.3	Apr	19.9	26.5	22.0	68.4
18.7	35.7	34.1	88.5	May	26.3	25.6	31.1	83.0
36.5	35.2	33.3	105.0	Jun	36.4	31.5	30.9	98.8
34.6	40.2	39.8	114.6	Jul	40.6	27.3	29.5	97.4
30.5	25.9	27.9	84.3	Aug	35.8	23.6	28.9	88.3
22.6	24.2	12.7	59.5	Sep	20.8	14.9	15.8	51.5
11.6	8.6	6.1	26.3	Oct	13.5	6.6	6.4	26.5
6.3	4.3	2.9	13.5	Nov	4.3	3.6	2.7	10.6
1.8	2.1	2.6	6.5	Dec	2.8	2.1	2.7	7.6
totaal				jaar	totaal			
					594.4			
631.6								

2016 Neerslag			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
18.7	33.6	25.9	78.2
28.2	7.9	20.8	56.9
33.6	0.8	24.9	59.3
21.3	9.0	34.5	64.8
2.7	8.1	29.2	40.0
0.3	46.0	63.3	109.6
28.1	5.4	28.0	61.5
22.7	28.8	29.6	81.1
55.4	1.2	9.5	66.1
28.5	37.1	34.1	99.7
44.5	29.5	13.3	87.3
8.8	27.3	7.9	44.0
totaal			848.5

2017 Neerslag			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
21.0	25.6	13.9	60.5
13.1	3.1	37.2	53.4
25.7	24.8	5.6	56.1
1.8	23.3	15.7	40.8
2.4	13.3	4.4	20.1
49.4	1.6	53.9	104.9
16.0	25.9	66.0	107.9
25.6	35.1	66.7	127.4
53.6	114.9	17.9	186.4
42.1	5.5	62.1	109.7
16.8	44.3	48.7	109.8
47.9	41.4	39.6	128.9
totaal			1105.9

2016 Verdamping			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
1.6	2.6	3.6	7.8
4.1	6.4	8.1	18.6
9.5	11.7	13.3	34.5
16.8	20.9	21.9	59.6
40.1	32.2	27.3	99.6
36.0	22.1	26.6	84.7
29.6	35.3	31.5	96.4
28.4	28.0	30.0	86.4
25.1	22.3	17.5	64.9
12.5	8.2	6.9	27.6
4.7	3.4	3.7	11.8
2.8	1.6	1.9	6.3
totaal			598.2

2017 Verdamping			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
2.0	2.8	3.5	8.3
2.8	5.8	5.0	13.6
7.9	12.1	22.7	42.7
21.4	21.1	25.6	68.1
22.1	28.5	43.1	93.7
30.1	41.0	27.0	98.1
36.5	31.3	33.7	101.5
29.0	25.2	30.8	85.0
20.2	14.1	13.5	47.8
9.4	9.6	7.3	26.3
5.1	3.0	3.0	11.1
1.7	1.6	1.7	5.0
totaal			601.2

2018 Neerslag			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
42.6	47.2	33.1	122.9
16.8	8.5	7.6	32.9
12.6	12.4	14.8	39.8
37.4	8.2	37.3	82.9
7.4	9.5	6.7	23.6
8.4	4.4	8.8	21.6
0.5	0.0	7.1	7.6
39.6	31.9	46.0	117.5
6.5	8.1	15.6	30.2
12.5	0.1	31.4	44.0
11.0	8.8	8.4	28.2
54.5	9.0	33.4	96.9
totaal			648.1

2019 Neerslag			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
11.7	22.4	26.7	60.8
23.7	11.9	0.7	36.3
52.0	64.1	3.2	119.3
2.5	3.6	38.0	44.1
10.7	2.1	14.9	27.7
44.2	28.6	0.4	73.2
1.6	31.1	5.4	38.1
42.9	66.1	3.3	112.3
54.0	8.5	59.0	121.5
38.5	80.5	24.5	143.5
37.4	38.6	18.1	94.1
30.6	26.4	12.9	69.9
totaal			940.8

2018 Verdamping			
decade 1	decade 2	decade 3	maand

2019 Verdamping			
decade 1	decade 2	decade 3	maand

decade 1	decade 2	decade 3	maand
2.3	1.9	2.6	6.8
4.8	7.0	6.3	18.1
8.3	12.0	11.5	31.8
17.0	25.0	20.3	62.3
36.2	31.1	45.5	112.8
30.6	27.8	36.0	94.4
42.4	42.2	44.3	128.9
38.3	21.8	25.5	85.6
22.8	17.1	15.4	55.3
14.5	14.2	7.3	36.0
6.2	4.5	2.3	13.0
2.1	1.4	1.7	5.2
totaal			650.2

decade 1	decade 2	decade 3	maand
2.3	2.4	2.7	7.4
3.3	8.3	8.2	19.8
7.6	9.2	18.2	35.0
20.1	27.4	24.2	71.7
21.9	30.0	34.5	86.4
32.0	30.1	42.6	104.7
31.5	24.2	47.0	102.7
26.4	23.3	37.1	86.8
20.1	18.1	13.3	51.5
10.9	7.0	8.7	26.6
4.7	3.3	2.8	10.8
2.8	2.6	2.6	8.0
totaal			611.4

2020 Neerslag			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
21.9	30.6	21.7	74.2
35.7	42.4	83.3	161.4
24.9	8.0	0.1	33.0
2.2	0.3	9.5	12.0
13.3	6.0	5.8	25.1
19.8	23.2	22.4	65.4
53.6	5.2	23.8	82.6
5.9	53.8	83.2	142.9
24.2	0.0	24.1	48.3
68.3	43.3	53.3	164.9
11.7	24.0	4.1	39.8
34.7	11.5	98.0	144.2
totaal			993.8

2021 Neerslag			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
28.9	38.6	32.2	99.7
21.9	27.4	0.7	50.0
9.4	42.6	5.9	57.9
16.8	10.6	0.4	27.8
59.2	9.7	38.1	107.0
12.7	52.2	16.0	80.9
16.1	1.1	75.8	93.0
62.3	18.2	16.2	96.7
0.0	3.8	26.1	29.9
42.7	22.3	47.4	112.4
31.9	11.2	40.8	83.9
29.0	8.6	25.9	63.5
totaal			902.7

2020 Verdamping			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
1.6	2.5	2.8	6.9
4.6	4.7	4.8	14.1
8.7	13.2	24.1	46.0
25.1	29.5	28.0	82.6
33.6	32.1	43.0	108.7
32.0	29.6	41.3	102.9
24.4	36.9	35.4	96.7
40.7	32.0	24.3	97.0
21.1	24.8	14.6	60.5
8.4	7.4	6.3	22.1
6.6	3.6	3.0	13.2
1.9	2.0	1.9	5.8
totaal			656.5

2021 Verdamping			
decade 1	decade 2	decade 3	maand
2.2	2.1	4.0	8.3
2.5	6.4	8.1	17.0
7.3	11.2	18.4	36.9
14.1	27.5	25.5	67.1
21.6	26.6	26.0	74.2
40.9	40.4	26.2	107.5
34.5	32.3	36.5	103.3
30.7	24.8	24.3	79.8
22.4	19.8	13.4	55.6
12.5	8.1	8.0	28.6
5.1	3.4	3.1	11.6
2.1	1.9	2.1	6.1
totaal			596.0

2022 Neerslag	

decade 1	decade 2	decade 3	maand
47.9	5.1	13.7	66.7
42.6	55.6	36.5	134.7
2.5	2.6	1.5	6.6
45.2	0.0	0.0	45.2
4.1	16.6	36.8	57.5
74.0	5.6	22.6	102.2
34.1	1.6	54.8	90.5
19.2	18.3	3.4	40.9
20.8	30.3	30.0	81.1
44.1	9.4	10.4	63.9
54.2	30.3	20.1	104.6
24.8	10.2	43.8	78.8
totaal			872.7

2022 Verdamping			maand
decade 1	decade 2	decade 3	
3.0	2.4	3.1	8.5
3.8	5.5	8.0	17.3
14.3	16.4	19.4	50.1
16.7	28.9	28.4	74.0
30.5	33.0	30.8	94.3
30.4	41.0	38.7	110.1
31.8	39.9	31.6	103.3
40.1	36.2	34.8	111.1
26.1	20.2	17.0	63.3
16.2	9.7	9.1	35.0
5.8	3.6	2.8	12.2
1.8	2.4	2.7	6.9
totaal			686.1

11 Samenvatting en Conclusies

11.1 Samenvatting

In de voorgaande paragrafen zijn de verschillende aspecten van de morfologische ontwikkelingen in het studiegebied behandeld. Hier wordt eerst een samenvatting gegeven van de bevindingen per aspect, voordat de resumerende conclusies met betrekking tot de effecten van de bodemdaling door gaswinning worden getrokken in volgende paragraaf.

Grootschalig morfologische ontwikkelingen

De waargenomen dynamiek van de lokale sedimentatie-erosiesnelheid is minstens een factor 10 groter dan de snelheid van bodemdaling (orde 1 cm/jaar). Dit verklaart waarom er geen zichtbaar effect van bodemdaling op de morfologische ontwikkeling van het gebied is geconstateerd. Dit neemt echter niet weg dat het totale volumeverlies van ongeveer 20 miljoen m³ door gaswinning ten opzichte van de natuurlijke volumeveranderingen niet te verwaarlozen is t.o.v. de opgetreden morfologische veranderingen.

Noordzeekust en kustsuppletie

De eerder getrokken conclusie blijft gerechtvaardigd dat de bodemdaling door gaswinning geen merkbare negatieve invloed op de ontwikkeling van de Noordzeekust heeft gehad. Dit wordt verklaard door het overheidsbeleid tot handhaving van de basiskustlijn sinds begin jaren 90 met zandsuppleties, waarmee het volume zand in de kustzone op peil is gehouden.

De daadwerkelijk uitgevoerde kustsuppleties op Ameland vertonen een afwijkend verloop dan met het kustlijnmodel uit 1987 werd verwacht. Sinds 1990 is er gemiddeld 0,5 miljoen m³ gesuppleerd, i.p.v. de 0,2625 miljoen m³ per jaar in het model, mede als gevolg van bodemdaling door gaswinning.

De resultaten van het kustlijnmodel wijken steeds meer af van de werkelijke ontwikkelingen. Drie verschillende verklaringen kunnen worden gegeven voor de afwijkingen: (1) er werd gerekend met verkeerde suppletiehoeveelheden in het model; (2) de onvoorspelbare aanlanding van platen op Ameland vanaf het Bornrif; (3) de eerder dan verwachte omslag van groei naar afslag van de oostpunt van Ameland. Een herijking van het model is echter niet nodig omdat (1) de handhaving van de BKL het voorspellen van de kustlijnontwikkeling overbodig maakt, en (2) het effect van de bodemdaling simpelweg in volumeverlies binnen het kustfundament kan worden uitgedrukt.

Zeegat en de Hon

Op basis van de Vakloding uit 2012 was er in de vorige rapportage geconstateerd dat het zeegat weer naar een enkel-geul systeem lijkt te ontwikkelen. Maar de Vakloding uit 2019 laat zien dat de meer-geulen karakteristiek lijkt zich te behouden. Bij een enkel-geul zeegat is het gunstiger voor de groei van het oostpunt van Ameland dan bij een meer-geulen zeegat. De oostpunt van Ameland is iets gegroeid sinds 2015, maar door de fluctuaties in de ontwikkeling moet er worden geconcludeerd dat vanaf 2013 er sprake van een periode van stabilisatie is.

Waddenzee bekken

De laatst beschikbare Vakloding voor het gebied stamt uit 2019. Aan de hand daarvan is de totale toename van hoeveelheid sediment in de vloedkom van Pinkegat ten op zicht van 2012 bepaald op 3,26 miljoen m³, ondanks de bodemdaling voor de periode 2012-2019 van 0,93 miljoen m³. Dit komt overeen met een stijging van bijna 6 cm gemiddeld over het bekken, hetgeen nog steeds binnen de onbetrouwbaarheidsmarge van het loden ligt.

Tevens zijn er Lidar metingen uitgevoerd sinds 2010 om de veranderingen van de wadplaten in het Friesche Zeegat te monitoren. Deze dataserie is nog te kort om conclusies uit de verkregen gegevens te trekken, gezien de onzekerheden in de data. Vooral voor de lagere delen van de wadplaten zijn de gemeten bodemhoogtes onzeker en afhankelijk van de weeromstandigheden tijdens de metingen. De Lidar metingen zijn niet goed geschikt voor het bepalen van bijvoorbeeld veranderingen in bodemhoogtes in een jaar.

Wadplaat sedimentatie

De jaarlijkse sedimentatie op het wad ten zuiden van Oost-Ameland (4,8 mm/j) verschilt weinig van de sedimentatie bij West-Ameland (5,2 mm/j) en op de Piet Scheveplaat (7,5 mm/j). De gemiddelde diepe daling door gaswinning bij Oost-Ameland (3,9 mm/j) wordt op het grootste deel van het wadplaatareaal gecompenseerd door een gemiddelde sedimentatie van 4,8 mm/j. Gemiddeld voor het hele gebied resulteert dit in een netto opslibbing van 0,9 mm/jaar.

In een beperkt wadplaatgebied van 3 km lengte vlak langs de zuidkust bij Oost-Ameland, waar de diepe daling maximaal is en de sedimentatie minimaal, ontstaat een netto verlaging van het maaiveld van ongeveer 4 mm/jaar.

De erosie op de Engelsmanplaat

De erosie van de Engelsmanplaat is zeker niet veroorzaakt door de bodemdaling. Het is ook zeer onwaarschijnlijk dat bodemdaling de erosie heeft versterkt. De waargenomen erosie past binnen de (pseudo-) cyclische ontwikkeling van het plaatcomplex het Rif en de Engelsmanplaat. Verder heeft de afsluiting van de Lauwerszee de erosie op de Engelsmanplaat beïnvloed. Door de afsluiting is er sedimenthonger in de Zoutkamperlaag ontstaan waardoor de erosie van de Engelsmanplaat is versterkt. Zoals voorspeld (Wang, 2007) is er sedimentatie in het Smeriggat, de geul die het Rif en de Engelsmanplaat scheidt, opgetreden. Het Rif is nu praktisch aangesloten op de Engelsmanplaat.

Ontwikkeling van zeereep op Oost-Ameland

De zeereep op Oost-Ameland heeft zich in de periode 1964-2010 volgens een lineaire trend opgebouwd qua volume, maar deze trend wordt een aantal malen onderbroken door hoogwatergebeurtenissen. De invoering van dynamisch duinbeheer (geen onderhoud meer aan het duin middels planten van helm en stuifschermen) heeft weinig invloed gehad op dit algemene beeld van de ontwikkeling. Dynamisch duinbeheer heeft wel geleid tot een meer natuurlijke duinvoet en meer variatie in de vegetatie en typen bodembedekking op de zeereep.

Panoramafoto's

Sinds 2004 zijn er vanuit 6 locaties op Oost Ameland panoramafoto's opgenomen. De foto's zijn elk jaar rondom 1 juni genomen, zodat ze een goed beeld van de ontwikkelingen van de vegetatie in het groeiseizoen door de jaren geven. En ze laten de morfologische ontwikkeling rondom het standpunt zien. De foto's laten op zich geen negatieve effecten zien, wel vegetatiesuccessie en sedimentatie (duinvorming).

Waterstanden

Twee bevindingen uit de analyse van de waterstanden gemeten bij Nes zijn relevant:

- Er is een plotseling afname van de getijslag rondom 2000 geconstateerd. De getijslag heeft verder een toenemende trend in tijd in de perioden zowel vóór als na deze plotseling verandering.
- De in andere recente studies gevonden versnelling van zeespiegelstijging kan niet worden bevestigd door analyse van de gegevens van het station Nes.

11.2 Conclusies m.b.t. effecten bodemdaling

- Conform de voorgaande rapportages is er geen merkbare effect geconstateerd op de ontwikkelingen van de kustlijn, de oostpunt van Ameland, de geulen en platen in het Waddenzeebekken.
- Zoals in de vorige rapportage is geconstateerd is het werkelijke zandsuppletievolume voor het onderhoud van de Noordzeekust van Ameland hoger geweest dan in 1987 in het kustlijnmodel was uitgegaan, namelijk ongeveer 0,6 miljoen m³/jaar i.p.v. 0,2625 m³/jaar, mede als gevolg van bodemdaling door gaswinning. Dat is dus ongeveer twee keer zoveel. De kustsuppleties hebben ervoor gezorgd dat de bodemdaling geen effect op de ontwikkeling van de kustlijn heeft gehad, in tegenstelling tot wat de modelresultaten suggereerden.
- De bodemdaling is verwaarloosbaar t.o.v. de lokale morfodynamische veranderingen, maar het totale volume van de bodemdaling is niet verwaarloosbaar t.o.v. de ontwikkeling van het sedimentvolume van het gebied.

12 Referenties

- Arens, B., 2007. Duurzame verstuiving in de Hollandse duinen: kans, droom of nachtmerrie: eindrapport fase1. ARENS-BSDO, [S.I.].
- Arens, S.M., 2009. Preadvies duin- en kustlandschap. Rapport DK; nr. 2009/dk113-O. Directie Kennis, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Ede.
- Arens, S.M., Bakker, T.W.M. en Ten Haaf, C., 2005. Natuurontwikkeling Ameland. Arens Bureau voor Strand en Duinonderzoek, Amsterdam.
- Arens, S.M., Löffler, M.A.M. en Nuijen, E.M., 2007. Evaluatie Dynamisch Kustbeheer Friese Waddeneilanden. Arens, S.M. en Mulder, J.P.M., 2008. Dynamisch kustbeheer goed voor veiligheid en natuur, Land + Water, pp. 3.
- Arens, S.M., van Puijvelde, S.P. en Brière, C., 2010. Effecten van suppleties op duinontwikkeling: Rapportage geomorfologie, Bosschap, bedrijfschap voor bos en natuur.
- Arentz, L., & Vroom, J., 2014. *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2013). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1209136-000. Schrijvershof, R. (2017). Memo n.a.v. aandachtspunten rapport Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2016).*
- BCA, 2008. Bodemdaling Ameland. <http://www.waddenzee.nl/Home.bodemdaling.0.html>. Bodemdalingscommissie Ameland.
- Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2005. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, evaluatie na 18 jaar gaswinning.
- Biegel, E.R.J., 1993. Morphological changes due to sea-level rise in tidal basins in the Dutch Wadden Sea versus concepts morphological response model MORRES. Rijksuniversiteit Utrecht IMAU rapport IMAU 93-14.
- Cheung, K. F., F. Gerritsen, et al., 2007. Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, The Netherlands. *Journal of Coastal Research* 23(1): 106-118.
- Cleveringa, J., C.G. Israël & D.W. Dunsbergen, 2005. De westkust van Ameland; Resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005. Rijkswaterstaat RIKZ Rapport RIKZ/2005.029.
- Cronin, K., & Wang, Z. B., 2012. *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1204654-000.*
- De La Barra, P., Aarts, G., Bijleveld, A., 2024. The effects of gas extraction under intertidal mudflats on sediment and macrozoobenthic communities. *Journal of Applied Ecology*, 61:390–405. DOI: 10.1111/1365-2664.14530.
- Deltares, 2023. Zeespiegelmonitor 2022.
- De Vlas, J., 2005. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Evaluatie na 18 jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland. Assen, 2005.

- De Vlas, J., 2011. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Evaluatie na 23 jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland. Assen, 2011.
- De Vlas, J., 2017. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Evaluatie na 30 jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland. Assen, 2017.
- De Vriend, H.J. 1991. Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour, part 1: physical processes. J. Hydraul. Res. 29, 727–740.
- Elias, E., Bruens, A., 2013. *Beheerbibliotheek Ameland. Feiten & cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004.*
- Elias, E., Wang, Z. B., & Cronin, K., 2013. *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2012). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1206958-000.*
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. Marine Geology 415.
- Elias, E.P.L., en Oost, A.P., 2021. Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Een conceptueel model. Deltares, rapport 11205236-003, Delft, 130p.
- Elias, E., 2022. Aanlandingsbanken Schiermonnikoog. Rapport 8035-004-ZKS-0002, Deltares, Delft, 45 p.
- Eysink, W.D., 1987. Gaswinning op Ameland-oost. Effecten van de bodemdaling. Waterloopkundig laboratorium rapport H 114.
- Eysink, W.D., N. Dankers, K.S. Dijkema, H.F. van Dobben, C.J. Smit, en J. de Vlas, 1995. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, Eerste evaluatie na 8 jaar gaswinning, WL / DLO-IBN, Interimrapport H841, januari 1995.
- Eysink, W.D., K.S. Dijkema, H.F. van Dobben, P.A. Slim, C.J. Smit, J. de Vlas, M.E. Sanders, J. Wiertz en E.P.A.G. Schouwenberg, 2000. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, Eerste evaluatie na 13 jaar gaswinning, WL. | Delft Hydraulics / Alterra, Rapport H841, maart 2000.
- Eysink, W.D., N. Dankers, K.S. Dijkema, H.F. van Dobben, C.J. Smit & J. de Vlas. 2000. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Evaluatie na 13 jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland. Assen, 2000.
- Eysink, W.D., 2005. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost, WL | Delft Hydraulics.
- Gawehn, M., 2023. "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2022)". Deltares rapport 11206685-000-ZKS-0005. Delft, Nederland.
- Hoeksema, H.J., H.P.J. Mulder, M.C. Rommel, J.G. de Ronde & J. de Vlas. 2004. Bodemdalingstudie Waddenzee 2004. Rapport RIKZ/2004.025. Haren 2004.
- Israël, C.G., 1998, Morfologische ontwikkeling Ameland Zeegat. Werkdocument RIKZ/OS-98.147x, Rijkswaterstaat RIKZ (Den Haag).
- Israël, C.G. en D.W. Dunsbergen, 1999, Cyclic morphological development of the Ameland Inlet, proceedings of the I.A.H.R Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, Italy, p. 705-714.

- Janssen, M. en Van Gelderen, N., 1993. Dynamisch kustbeheer: een verkennende studie naar de mogelijkheden voor herstel van natuurlijke processen in de zeeoep. Duinbehoud, Leiden.
- Ketelaar, G. W. van der Veen, D. Doornhof, 2011, Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost 2005-2010 – Hoofdstuk 1-Bodemdaling. Rapportage Begeleidingscommissie bodemdaling (bron: http://www.waddenzee.nl/Rapportage_2011.2785.0.html)
- Krol, J., 2006. Monitoring Dynamisch Kustbeheer Ameland-Oost, Natuurcentrum Ameland.
- Löffler, M.A.M., 2008. Eilanden natuurlijk: natuurlijke ontwikkeling en veerkracht op de Waddeneilanden. Het Tij Geleerd, [S.I.].
- NAM, 2010. Gaswinning Waddenzee. Nederlandse Aardolie Maatschappij.
- NAM et al., 2017. Monitoring effecten bodemdaling op Ameland-Oost
- Nikkels, M., 2010. Changes in Coastal Defense Visions and Policies at the Dutch Wadden Islands over the Last 60 Years, Wageningen University, Wageningen.
- Oost, A.P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet; a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas and drainage basins. PhD-Thesis, Utrecht, Geologica Ultraiectina, 126, 518 pp.
- Oost, A. en Lammerts, E.J., 2007. Het tij geleerd: achtergrondrapport. Alterra [etc.], Wageningen.
- Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000. Dynamisch kustbeheer: kustzone midden en oost Ameland: een advies over het beheer van de zandige kustzone op Ameland van km 7 tot km 23. Provinciaal Overlegorgaan Kust Fryslân, Projectgroep midden en oost Ameland, [S.I.].
- Reitsma, D.T., 1984. Waterstaatkundige historie Ameland, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. In: Nikkels (2010).
- RIKZ, 2003. Traditie, trends en toekomst: het vervolg: tweede voortgangsrapportage over de uitvoering en ontwikkeling van het kustbeleid. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Water, [Den Haag]. Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- Schrijvershof, R. A., Nederhoff, C. M., Haag, A., & Piening, H., 2017. *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2016). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 11200469-000.*
- Schrijvershof, R. A., & Vroom, J., 2016. *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2015). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1221249-000.*
- Schrijvershof, R.A., Van den Boogaard, H., & Visser, M., 2018. *Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2017) – Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport 11202013-000.*
- Slim, P.A., Heuvelink, G.B.M., Kuipers, H., Dirkse, G.M. en Van Dobben, H.F., 2005. Vegetatiemonitoring en geostatistische vegetatiekartering duinvaleien Ameland-Oost.
- Slim, P.A. en Löffler, M.A.M., 2007. Kustveiligheid en natuur: een overzicht van kennis en kansen. Alterra-rapport; 1485. Alterra, Wageningen.
- Steffelbauer, David B, Riccardo E M Riva, Jos S Timmermans, Jan H Kwakkel, and Mark Bakker. 2022. "Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea." *Environmental Research Letters* 17.

- TAW, 2002. Leidraad Zandige Kust. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- Van der Lugt, M.A., Visser, M., & Van den Boogaard, H., 2019. Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2018). Deltares rapport 11203620-002-ZKS-0003.
- Van der Lugt, M.A., Visser, M., & Ketelaar, G., 2020. Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019). Rapport 11203620-002-ZKS-0007.
- Van der Lugt, M., Cleveringa, J., Wang, Z.B., 2020b. "Integrale analyse morfologische effecten bodemdaling door gaswinning Ameland-Oost". Deltares rapport 11203910-002-ZKS-0006. Delft, Nederland.
- Van der Vegt, H., van der Lugt, M., 2021. "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021)". Deltares rapport 11206685-000-ZKS-0004. Delft, Nederland.
- Van der Vegt, H., van der Lugt, M., 2022. "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021)". Deltares rapport 11206685-000-ZKS-0004. Delft, Nederland.
- Van der Spek, A.J.F., en H.H.S. Noorbergen, 1992, Morphodynamica van intergetijdegebieden. Rapport Beleidscommissie Remote Sensing, Delft.
- Van Heuvel, T.A.J., De Kruik, H. en Ebbing, H., 1996. Dynamisch handhaven van de kustlijn: van kustmeting tot zandsuppletie. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RIKZ, Den Haag.
- Vroom, J., & Beekhuizen, J., 2015. *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2014). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1210543-000.*
- VWS, 1990. 1e Kustnota: Kustverdediging na 1990. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- VWS, 2000. 3e Kustnota: Traditie, trends en toekomst, [S.l.]. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Wang, Z.B., 2007, *Morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat, Analyse naar de mogelijke invloed van bodemdaling, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z3973.*
- Wang, Z. B., Cronin, K., & Ormondt, M. (2010). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1202285-000.*

A Bijlagen Spijkermetingen

A.1 Meetdata Oost-Ameland

DATUM	gemiddelde verschillen mm																
	S00	S10	S20	S30	S40	S50	S60	S70	S80	S110	S120	S130	S140	S150	S160	S170	S180
jul-00	0,00																
aug-00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,33												
sep-00	0,65	0,10	2,10	0,05	0,38												
nov-00	0,03	0,00	0,50	0,85													
dec-00	0,17	0,07	2,80	0,93	0,95												
jan-01	0,48	0,55	1,53	0,65	0,85												
rrt-01	0,66	3,05	0,02	0,65	0,85												
aug-01	1,30			1,78	0,70	0,00											
okt-01	1,35	3,25		1,96	1,90	0,80											
nov-01	1,26	0,90	0,28														
jan-02	0,70		-1,34	1,64	2,38	0,64											
rrt-02	0,19	3,28	1,16	1,64	4,41	1,14	0,00										
jun-02	1,88	4,08	0,62	3,07	2,15	1,59	0,83	0,00	0,00	1,70							
aug-02	1,59	2,83	0,13	3,39	2,78	2,25	4,13	2,61	0,50	0,45							
okt-02	1,15	2,60	0,19	3,50	3,25	2,50	4,77	3,01	1,09	3,33							
nov-02	-0,21	2,24	0,41	3,53	2,41	2,61	3,03	2,76	1,10	2,16							
jan-03	1,26	2,03	0,21	4,14	2,36	2,74	3,15	2,61	0,64	2,76							
rrt-03	0,95	4,29	0,13	4,11		5,39	3,92	2,66	0,19	0,32	0,00	0,00					
jun-03	2,24	6,65	0,45	4,23	3,65	7,40	3,92	3,48	2,74	2,35	1,43	1,96					
okt-03	1,81	6,20	2,01	3,90	3,93	8,60	4,70	5,34	2,41	2,68	1,88	2,54					
nov-03	1,86	6,29	1,80	4,77	4,08	7,61	4,52	5,70	4,03	4,08	0,25	3,05					
dec-03	1,79	6,45	1,11	5,24	4,19	7,69	4,18	5,75	3,94	5,44	1,39	3,13					
rrt-04	2,01																
mei-04	1,80	2,85	0,03	6,87	6,11	3,46	5,15	5,09	3,75	0,24	2,53	2,64	0,40	0,74			
aug-04	2,61	7,66	0,58	8,24	6,89	5,59	4,83	5,15	2,80	3,76	3,00	5,59	1,21	1,64			
okt-04	3,40	9,56	1,21	11,39	8,16	6,71	5,17	6,49	4,06	4,40	4,99	6,58	1,63	2,96			
dec-04	3,64	13,41	0,83	10,27	8,54	7,79	6,82	7,59	4,62	4,74	5,19	8,26	5,50	3,78			
jan-05	3,74	13,46	1,36	11,27	9,99	5,54	5,68	6,09	4,28	1,69	5,29	6,46	2,05	3,66			
feb-05	3,14	10,69	1,45	10,46	9,73	4,58	4,78	4,74	3,48	1,33	4,63	6,04	2,58	4,04			
apr-05	3,86	12,90	1,61	12,35	9,31		5,23	5,71	4,26	1,51	4,45	6,36	2,75	4,51			
jun-05	5,21	11,98	3,63	11,81	10,59	6,80	9,77	6,00	5,04	2,10	5,89	7,98	3,05	5,36			
aug-05	9,41	12,51	2,64	12,60	11,10	7,20	9,00	7,15	5,28	1,04	6,20	8,65	4,50	7,06			
okt-05	8,60	12,91	1,61	13,33	12,78	8,65	9,02	7,35	6,30	0,90	6,31	7,98	4,10	7,31			
dec-05	7,78	13,09	3,13	12,80	11,11	7,50	8,15	6,59	5,73	1,01	6,28	7,41	4,08	7,05			
rrt-06	6,63	13,38	2,88	12,51	11,09	7,25	7,83	9,23	5,63	3,85	6,56	7,29	4,30	7,36			
apr-06	8,21	14,01	3,76	13,09	11,30	8,41	8,50	7,35	6,65	4,38	7,09	8,36	5,85	7,40			
jun-06	9,71	14,81	8,21	13,87	12,59	9,16	9,38	7,06	6,65	0,44	7,18	9,26	5,50	8,78			
aug-06	6,60	14,98	5,74	13,37	11,55	9,01	7,25	8,06	5,64	0,66	6,83	8,34	5,74	8,31			
okt-06	4,90	14,36	5,26	13,53	11,44	8,78	6,30	7,63	6,04	0,60	7,11	8,39	5,48	8,90			
dec-06	6,63	15,12	6,81	14,10	12,71	9,38	7,01	8,11	6,69	1,10	7,44	8,23	6,39	11,31			
feb-07	6,38	14,44	1,98	13,53	12,01	8,70	6,05	7,48	5,21	1,73	7,64	8,19	5,00	9,80			
apr-07	5,94	14,89	0,51	14,16	12,48	9,58	2,62	6,46	5,00	-1,61	7,94	6,63	5,40	10,29			
jun-07	5,95	15,40	2,44	14,27	13,73	10,56	2,92	6,56	2,53	6,00	10,40	6,94	5,81	9,89			
aug-07	6,60	15,75	2,29	13,40	12,71	9,00	1,92	5,91	4,08	3,73	7,79	6,80	3,14	9,91			
okt-07	7,00	15,84	2,56	13,94	12,39	9,55	1,90	6,10	4,79	3,00	7,53	7,59	2,30	10,11			
dec-07	7,53	15,91	0,71	14,10	12,31	9,80	1,68	7,23	4,60	-2,49	8,34	7,21	3,50	10,44			
feb-08	7,05	15,46	0,21	14,87	12,59	9,16	1,17	6,76	4,51	1,17	8,76	8,18	3,18	11,63			
apr-08	8,44	15,88	0,26	16,07	12,45	10,69	0,82	7,08	4,90	0,10	7,89	6,71	2,14	11,09			
jun-08	9,11	15,39	0,64	15,80	12,48	10,95	1,23	6,40	5,03	0,85	7,48	6,54	2,01	11,09			
aug-08	9,35	15,95	0,99	16,23	13,90	10,63	2,00	6,56	4,31	1,10	8,03	6,53	2,10	13,31			
okt-08	9,14	15,51	1,33	14,14	12,35	10,75	1,95	5,88	3,81	0,91	7,61	5,63	0,40	11,01			
dec-08	8,99	15,55	0,39	14,49	12,19	10,64	1,08	5,45	3,38	0,65	7,60	5,66	0,29	11,05			
feb-09	8,48	15,79	2,10	16,10	14,65	10,81	3,30	5,08	5,70	2,56	11,84	8,74	0,09	14,88			
apr-09	8,99	15,55	0,33	15,29	12,09	11,33	1,02	6,19	4,15	1,69	7,58	6,28	0,18	12,28			
jun-09	8,09	16,14	0,88	15,60	12,08	11,31	0,23	8,25	4,59	2,00	8,33	5,66	0,14	12,24			
aug-09	7,11	17,45	1,09	15,77	12,20	10,69	1,93	8,46	3,98	-1,69	8,84	6,03	-0,65	13,20			
okt-09	7,14	18,30	2,93	17,70	12,89	9,24	2,39	8,95	4,43	5,34	6,54	8,11	0,37	15,96			
dec-09	7,03	18,01	2,36	18,78	13,24	10,39	2,68	7,35	3,68	0,31	10,44	10,31	0,49	14,73			
feb-10	7,66	19,10	2,34	18,51	13,20	10,10	2,72	9,76	3,61	-1,53	10,29	9,54	0,57	14,33			
apr-10	7,00	19,40	2,44	18,73	13,73	10,56	2,92	8,56	2,53	6,00	10,40	6,94	5,81	9,89			
jun-10	7,40	20,54	2,35	18,61	14,48	10,86	2,98	10,38	3,59	-1,86	11,73	9,11	0,59	15,13			
aug-10	6,81	18,64	1,75	18,60	14,50	10,23	2,52	10,20	5,18	5,51	11,46	8,80	0,51	15,09			
okt-10	6,13	17,24	0,88	17,24	13,90	10,38	0,10	8,19	4,60	1,50	10,40	6,94	5,81	9,89			
dec-10	6,24	17,90	2,15	17,26	14,11	10,47	0,77	8,70	5,11	1,63	10,87	8,60	0,16	15,06			
feb-11	6,50	18,01	2,00	17,13	13,98	10,45	0,97	8,11	4,56	2,80	11,13	8,18	0,10	13,73			
apr-11	6,50	17,99	2,10	18,10	14,65	10,81	3,30	5,08	5,70	2,56	11,84	8,74	0,09	14,88			
jun-11	4,88	17,74	1,89	17,70	14,54	10,56	-3,68	8,25	4,91	3,89	11,51	7,99	0,31	14,40			
aug-11	4,93	17,06	1,95	19,79	15,85	9,02	-4,22	9,64	4,83	2,78	11,99	7,70	0,78	15,76			
okt-11	5,50	17,70	1,95	19,06	15,09	8,71	-5,48	8,25	3,98	4,55	11,36	8,09	0,60	15,40			
dec-11	5,10	17,94	1,46	19,20	15,81	8,35	-5,40	8,95	4,43	5,16	12,00	8,33	1,11	15,37	0,00		0,00
feb-12	5,69	16,75	1,51	19,00	15,18	9,55	-6,90	8,89	5,29	1,64	11,49	7,54	0,89	13,71	0,45	0,00	0,55
apr-12	5,93	16,93	1,33	19,20	15,41	8,84	-3,90	9,05	3,84	1,21	12,16	6,90	0,66	13,46	1,45	0,07	0,90
jun-12	4,76	16,93	1,46	19,00	15,41	8,84	-3,90	9,05	3,84	1,21	12,16	6,90	0,66	13,46	1,45	0,07	0,90
aug-12	5,21	17,01	2,48	16,53	16,10	8,55	-6,30	10,55	5,56	3,51	12,81	7,56	1,31	13,76	2,15	1,45	2,73
okt-12	5,34	16,60	2,38	15,71	15,65	8,65	-6,45	9,75	5,49	2,21	12,36	8,15	0,67	14,01	2,35	1,30	1,05
dec-12	5,66	16,95	1,15	15,63	14,79	9,28	-6,23	9,14	5,03	1,11	12,23	8,15	0,99	13,96	2,23	1,03	0,23
feb-13	5,90	15,80	2,90	15,66	14,76	8,15	-5,47	10,64	4,60	1,68	11,76	5,76	0,88	14,95	1,35	1,33	2,83
apr-13	6,33	16,28	2,44	15,78	15,26	8,26	-6,97	9,38	4,56	1,04	11,89	6,41	0,83	15,33	2,40	1,25	2,93
jun-13	5,84	16,40	1,61	16,25	15,26	8,31	-9,03	9,91	4,31	1,03	11,99	7,25	0,65	15,33	3,25	2,23	2,40
aug-13	6,01	15,95	1,48	16,51	15,61	8,31	-8,20	10,55	5,15	0,95	12,56	7,29	0,59	16,76	3,59	2,48	1,45
okt-13	6,28	15,74	1,23	16,45	15,51	9,27	-8,75	11,59	5,14	0,55	12,56	7,20	0,09	16,76	3,28	3,10	1,53
dec-13	6,58	16,24	1,58	16,25	14,86	9,12	-8,93	11,61	6,08								

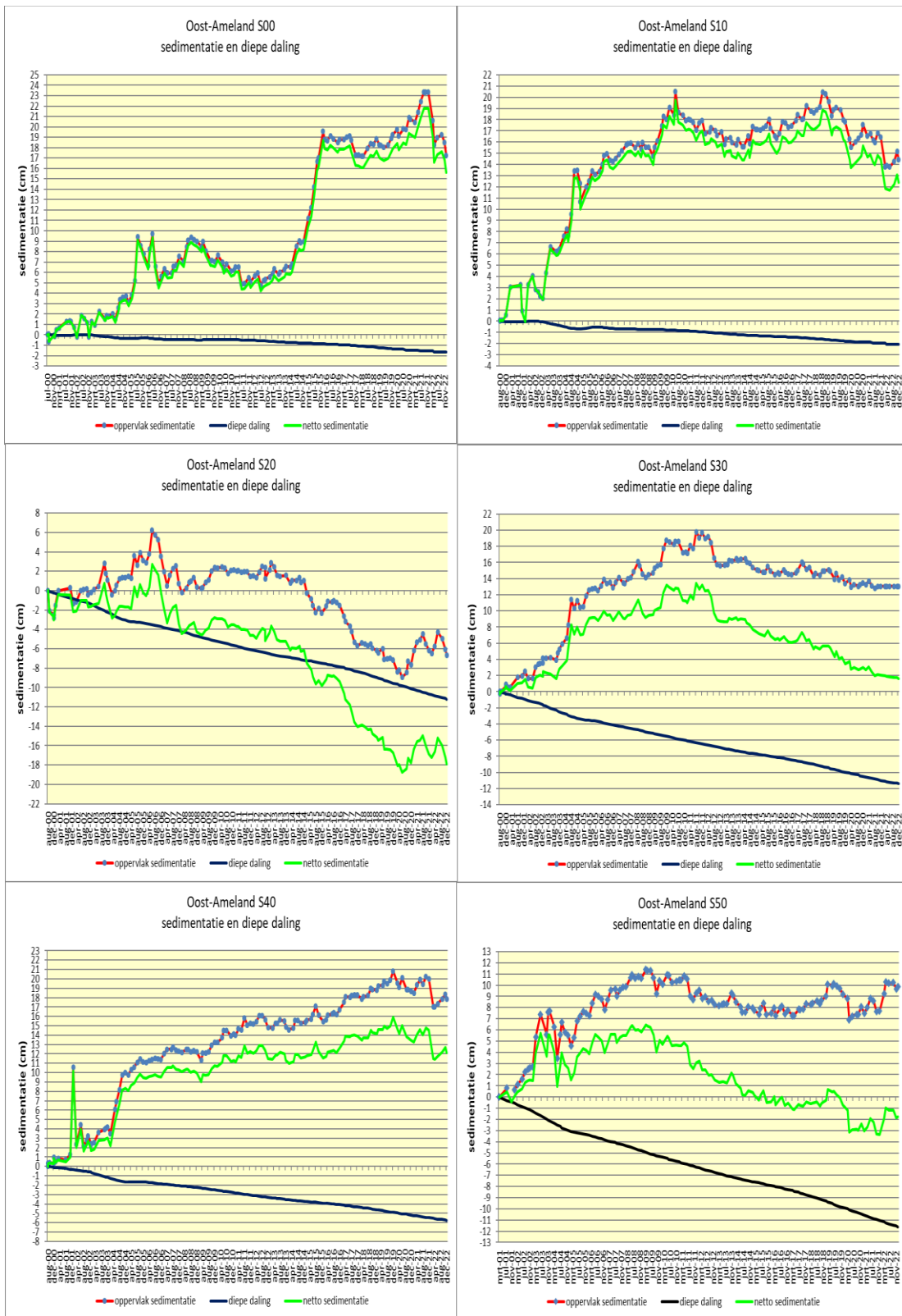
A.2 Meetdata West-Ameland.

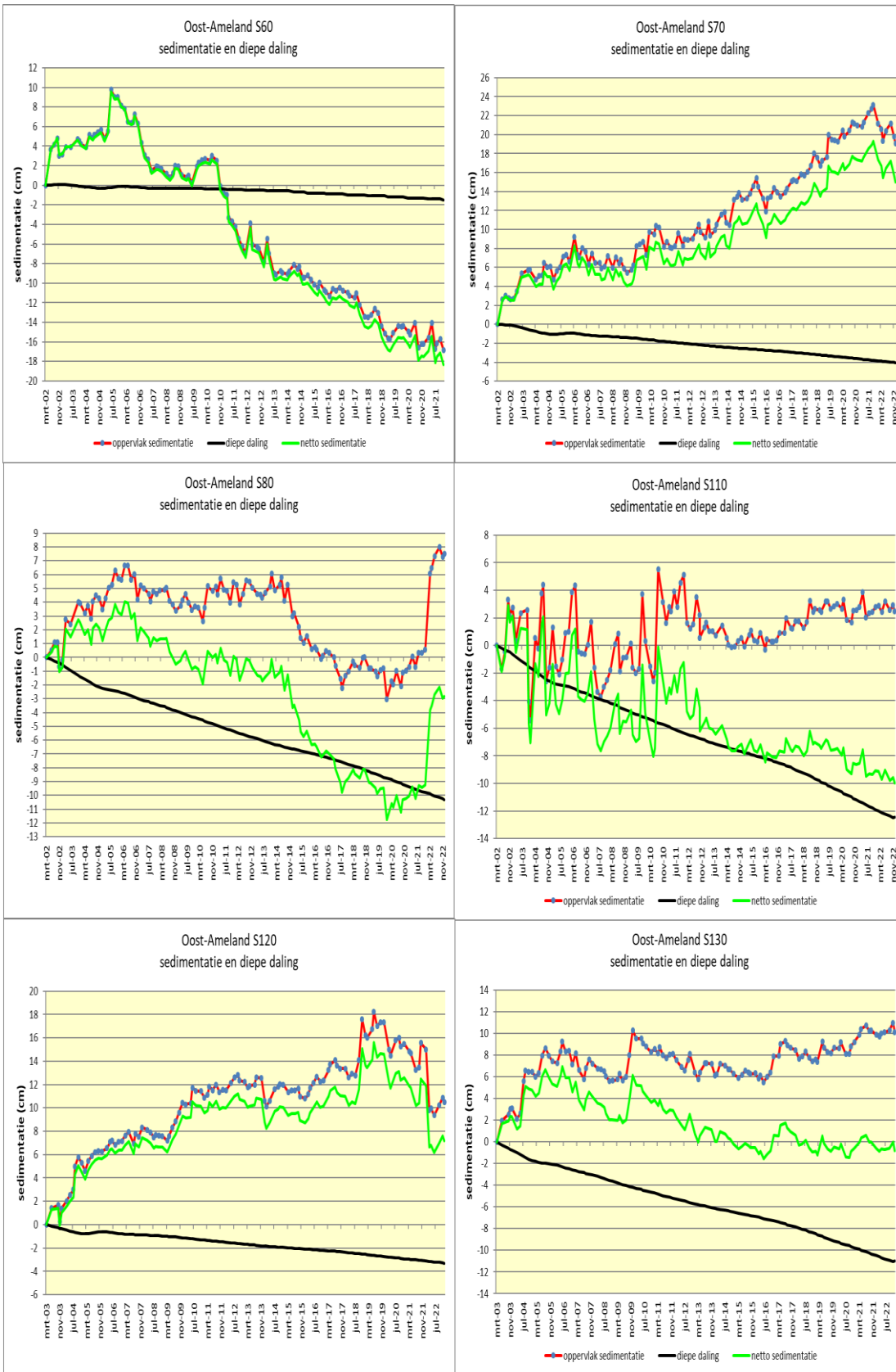
	gemiddelde verschilmetingen						
	H10	H20	H30	H40	H50	H60	H70
30-10-2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
22-12-2006	-0,15	1,48	0,52	0,73	1,48	-1,00	
28-2-2007	1,13	3,03	2,45	1,70	-0,03	-0,78	
24-4-2007	1,93	4,25	1,78	2,58	-0,10	0,28	
4-7-2007	2,70	4,30	1,40	2,23	-0,50	-0,82	
9-9-2007	2,88	4,78	0,35	3,35	0,30	-0,32	
26-10-2007	2,85	5,08	1,43	3,08	0,20	0,82	
22-12-2007	2,18	5,35	2,13	3,13	0,22	0,75	
7-3-2008	1,88	5,95	2,75	2,73	0,75	1,13	
11-5-2008	1,85	7,80	3,50	4,55	1,68	1,85	
5-7-2008	1,78	8,00	3,73	5,10	0,78	0,73	
29-8-2008	3,00	7,95	5,03	3,78	1,03	1,78	
12-11-2008	0,83	6,08	4,80	3,80	0,12	2,38	
10-12-2008	2,63	8,78	4,63	3,83	0,30	3,10	
9-3-2009	1,80	7,85	4,08	3,40	-0,90	2,48	
28-4-2009	2,60	9,03	4,40	4,33	-0,20	3,18	
6-7-2009	2,35	8,23	4,40	3,50	-0,82	2,45	
10-9-2009	3,93	8,65	4,93	4,78	0,05	3,28	
3-11-2009	1,30	7,45	3,40	4,25	-0,53	2,13	
16-12-2009	1,78	8,78	4,85	4,63	0,55	2,40	
3-3-2010	2,45	9,98	5,78	5,35	0,42	2,88	
6-5-2010	2,00	10,30	5,28	5,35	1,00	3,93	
9-7-2010	3,30	10,18	5,88	5,88	0,80	3,50	
30-8-2010	1,80	8,70	5,33	6,25	-0,43	3,75	
3-11-2010	0,13	8,38	3,30	6,00	-0,30	2,90	
5-1-2011	0,18	8,33	3,53	5,75	-1,98	2,28	
24-2-2011	0,65	8,90	4,50	6,35	-0,55	2,50	
26-4-2011	0,70	10,05	5,40	7,53	0,82	2,75	
27-6-2011	0,58	9,15	4,98	6,88	0,20	1,18	
2-9-2011	-0,90	9,53	5,38	6,88	0,12	3,30	
3-11-2011	1,60	9,35		6,55	-0,18	3,15	
22-12-2011	1,80	9,73		6,80	-0,52	2,88	
28-2-2012	1,10	10,33		7,98	-0,23	2,75	
7-5-2012	1,43	9,83		7,50	-0,23	3,48	0,00
3-7-2012	2,08	10,70	5,50	8,95	-0,08	3,08	0,45
4-9-2012	1,25	10,58	5,80	8,78	-0,55	3,03	-0,40
30-10-2012	0,13	10,53	5,43	8,03	-0,20	2,98	0,03
4-1-2013	1,00	10,83	5,60	7,03	-1,28	3,00	-0,07
3-3-2013	0,93	10,95	6,35	8,45	-0,07	2,83	0,03
6-5-2013	1,20	9,88	5,00	8,10	-1,38	3,70	0,53
2-7-2013	1,05	10,75	5,03	7,90	-1,55	2,68	-0,15
22-8-2013	0,95	10,50	5,93	8,58	-0,95	2,95	0,93
23-10-2013	0,63	9,95	5,20	8,78	-0,50	3,08	0,50
9-12-2013	-0,42	12,38	6,43	13,13	3,03	0,50	1,20
4-3-2014	0,68	12,15	6,83	13,48	5,20	0,80	1,35
2-5-2014	0,58	12,00	6,63	13,00	5,08	0,50	-0,07
30-6-2014	1,10	11,43	6,43	12,25	5,10	1,45	0,10
9-9-2014	0,25	11,85	6,55	13,75	5,33	0,45	-0,20
15-11-2014	-0,15	11,95	6,28	12,35	5,75	0,05	-0,22
31-12-2014	0,58	11,45	7,28	12,78	3,73	0,87	-1,38
25-2-2015	1,40	11,00	7,70	12,70	5,13	0,50	-0,97
29-4-2015	1,63	11,43	7,43	13,00	6,33	0,05	-1,53
3-7-2015	1,68	12,15	7,50	13,78	5,85	-0,73	-0,77
1-9-2015	1,25	11,65	7,45	13,43	5,35	-1,23	-1,60
29-10-2015	1,48	10,95	7,13	14,10	6,30	-0,13	-1,23
21-12-2015	1,58	11,53	8,50	12,10	5,48	-0,62	-1,10
24-2-2016	0,93	11,73	11,03	13,70	8,05	0,40	0,23
28-4-2016	0,93	11,63	11,58	14,08	13,83	-0,43	0,50
1-7-2016	1,28	11,18	11,03	13,80	13,18	-0,60	0,20
25-8-2016	1,00	12,25	11,95	14,03	12,30	0,10	-0,40
25-10-2016	0,75	11,73	11,38	13,78	11,45	0,30	-0,22
23-12-2016	0,65	11,43	12,48	14,33	8,85	0,48	0,48
23-2-2017	0,88	11,70	11,50	14,13	7,90	0,78	0,23
1-5-2017	1,68	11,95	12,43	14,85	7,58	1,25	1,08
30-6-2017	0,70	11,48	11,63	13,48	7,23	1,03	0,58
26-8-2017	0,43	11,05	12,10	12,83	6,23	1,23	0,35
25-10-2017	-1,13	11,20	9,83	14,55	5,98	0,03	0,28
28-12-2017	0,25	11,08	10,10	14,93	5,78	0,35	0,73
12-3-2018	-0,12	10,88	10,48	15,08	8,18	1,63	0,33
3-5-2018	0,18	11,65	10,55	15,93	7,55	1,83	0,68
4-7-2018	0,05	11,73	11,88	16,28	8,13	2,00	0,43
6-9-2018	-0,20	11,83	11,23	15,70	7,90	2,10	0,88
22-10-2018	-0,22	11,80	10,15	14,38	8,05	2,43	1,13
23-1-2019	0,08	11,23	9,75	15,18	7,48	1,88	1,10
25-2-2019	0,90	11,68	10,28	15,43	11,93	2,48	1,55
29-4-2019	1,65	11,48	10,23	15,58	11,73	1,55	2,48
24-6-2019	2,23	11,35	10,25	15,58	11,05	1,35	2,60
3-9-2019	1,88	11,28	10,03	14,80	6,58	2,00	1,15
30-10-2019	2,60	11,40	10,10	14,58	7,63	3,78	1,78
17-12-2019	3,75	11,78	10,10	15,40	5,95	6,25	2,23
26-2-2020	1,25	14,18	9,60	16,68	9,40	3,20	1,68
1-5-2020	0,58	13,55	8,50	17,00	9,03	2,60	1,48
30-6-2020	0,90	13,28	8,90	16,90	9,23	2,55	1,70
4-9-2020	1,10	13,60	9,18	16,55	8,95	2,50	1,80
28-10-2020	-0,12	13,63	8,68	16,35	5,78	2,33	1,53
21-12-2020	1,63	14,05	9,50	17,23	6,00	3,05	1,70
3-3-2021	0,55	14,00	8,95	17,68	4,93	3,13	1,60
30-4-2021	0,70	14,30	9,63	17,38	8,83	3,13	2,10
29-6-2021	1,73	14,53	8,93	19,48	8,13	3,90	1,98
31-8-2021	0,70	14,08	8,03	19,30	7,90	3,48	2,08
29-10-2021	0,25	14,18	8,63	18,33	6,68	3,78	1,63
20-12-2021	0,80	14,33	8,65	18,00	5,93	3,45	1,98
9-3-2022	-4,93	13,65	9,63	17,93	10,05	-2,48	2,58
6-5-2022	-1,63	15,30	11,73	22,43	11,85	-0,68	3,93
5-7-2022	-0,80	15,18	11,13	22,28	11,33	-1,90	3,00
14-9-2022	-0,42	15,20	11,35	22,08	11,38	-1,88	2,13
11-11-2022	-1,80	15,00	9,40	21,50	10,50	-2,25	2,35
21-12-2022	-1,08	15,18	9,90	21,53	10,55	-1,63	2,90
Cumulatie cm	-1,08	15,18	9,90	21,53	10,55	-1,63	2,90
meetduur maand	193	193	193	193	193	193	132
snelheid mm/j	-0,7	9,4	6,2	13,4	6,6	-1,0	2,6

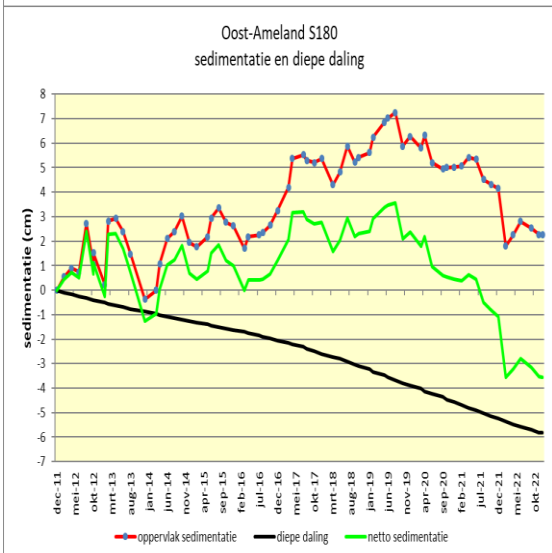
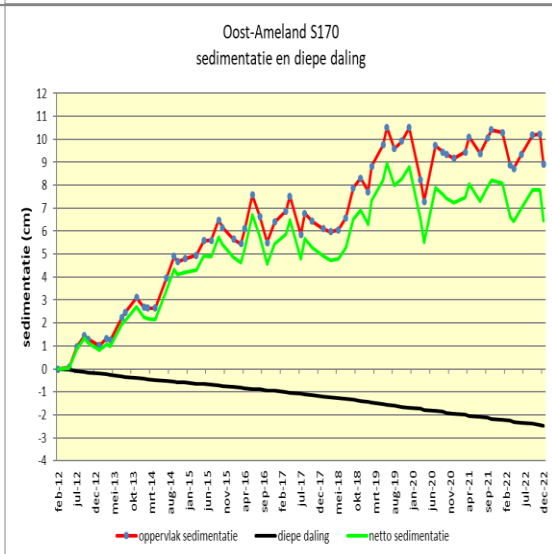
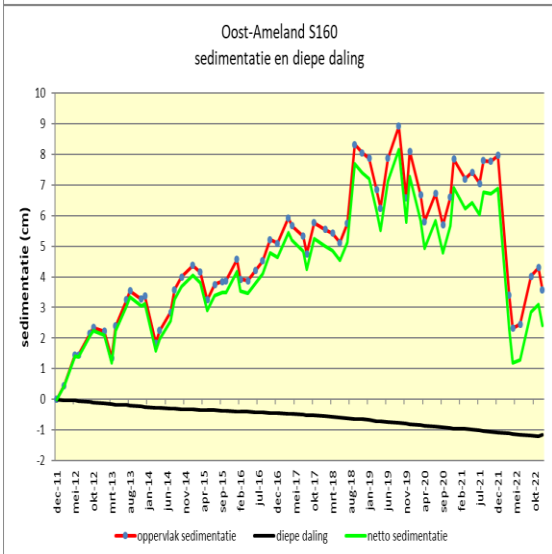
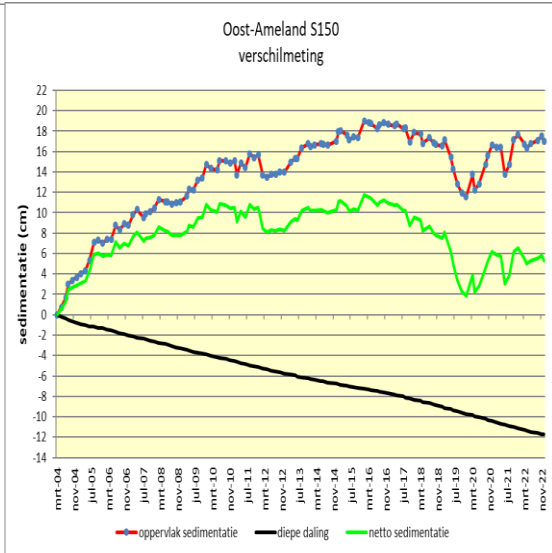
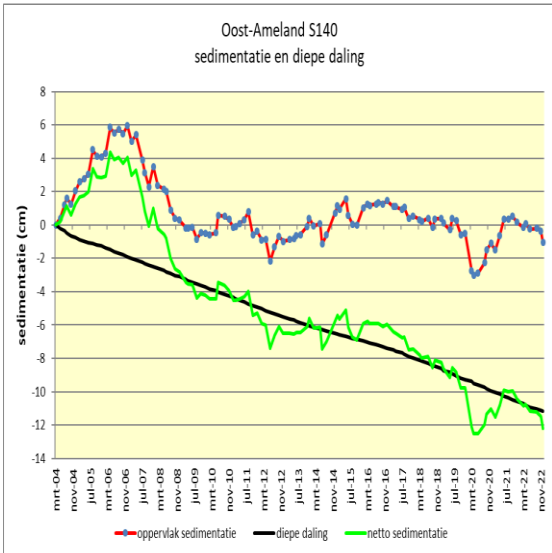
A.3 Meetdata Piet Scheveplaat.

	PSP90	PSP100	PSP110	PSP120	PSP130	PSP140	PSP150	PSP160	PSP170	PSP180
nov-14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
dec-14	-0,45	-1,78	0,58	0,40	-0,17	-0,05	-0,07	-1,40	2,78	0,00
mrt-15	-2,55	-4,18	0,68	0,03	-0,05	-0,35	-0,40	-2,10	4,45	0,32
mei-15	-4,93	-6,23	1,48	0,55	0,50	0,70	-0,85	-2,45	7,33	0,35
jul-15	0,93	-5,40	1,38	1,55	1,08	1,33	1,35	-2,50	9,15	0,20
sep-15	-0,87	-3,40	2,20	0,90	0,05	1,53	1,13	-0,95	11,90	-1,00
nov-15	-2,33	-4,30	2,80	1,08	1,05	1,53	0,75	-1,05	11,70	-0,45
jan-16	-5,48	-7,38	3,18	1,88	1,98	1,98	0,60	-4,33	14,53	0,00
mrt-16	-5,83	-7,98	2,80	3,20	1,00	1,25	-1,33	-4,05	15,83	0,32
mei-16	-5,70	-6,93	3,13	3,30	1,08	2,73	-0,32	-3,68	16,95	-1,75
jul-16	-2,40	-4,80	4,88	3,88	0,63	3,23	0,30	-2,80	17,25	-1,75
aug-16	0,73	-3,68	6,53	4,60	0,53	3,18	0,93	-2,55	18,20	-0,18
okt-16	-1,00	-2,65	6,80	4,68	0,55	3,33	1,40	-1,85	16,83	0,07
jan-17	-3,35	-4,20	8,68	5,98	1,93	4,30	2,45	-2,23	15,90	1,28
mrt-17	-4,10	-4,18	8,70	5,43	1,80	3,90	2,35	-1,98	16,20	0,70
mei-17	-3,30	-3,23	9,85	6,10	2,20	5,23	2,93	-1,90	16,30	1,43
jul-17	-1,45	-3,58	13,28	7,98	1,98	5,80	3,95	-0,18	15,50	2,68
aug-17	2,35	-2,73	12,80	7,05	2,08	5,23	3,65	-0,60	16,10	1,43
okt-17	-1,78	-5,90	12,53	8,43	3,23	6,15	3,98	-0,27	14,68	1,75
jan-18	-3,00	-7,73	13,33	8,03	3,53	7,15	3,15	-1,40	13,03	2,13
mrt-18	-0,90	-6,40	12,90	8,40	3,10	6,60	2,53	-3,40	13,10	1,70
mei-18	-0,75	-7,70	13,33	8,30	3,33	7,53	3,40	-1,88	13,10	2,05
jul-18	-0,70	-7,03	13,68	8,13	3,85	7,58	4,00	-1,53	13,38	2,03
sep-18	-0,18	-7,40	11,50	7,18	3,70	8,20	3,40	-1,08	13,05	2,08
nov-18	-0,95	-7,70	13,03	7,75	4,30	8,58	3,33	-1,25	12,48	2,43
jan-19	-1,03	-8,08	14,53	7,75	4,83	9,53	3,53	-1,63	13,05	2,68
mrt-19	-1,00	-8,80	13,83	7,75	4,78	9,15	2,73	-1,48	12,93	2,53
mei-19	-0,90	-8,80	14,73	8,73	5,08	10,03	1,90	-1,78	13,40	2,00
jul-19	-1,28	-9,93	13,63	7,63	4,70	9,85	0,15	-2,85	12,58	1,10
sep-19	0,28	-10,23	15,10	9,05	5,85	10,48	1,75	-2,95	15,08	2,48
okt-19	0,33	-9,00	15,85	9,35	6,28	10,40	2,53	-2,38	14,88	3,90
dec-19	-0,07	-10,03	16,63	10,18	7,03	10,93	2,35	-5,08	15,15	3,95
mrt-20	-3,10	-11,25	18,15	10,63	7,08	13,58	1,80	-5,35	13,45	3,33
mei-20	-4,05	-9,95	19,28	13,83	6,50	14,28	1,68	-9,80	12,83	2,40
jul-20	-3,55	-9,83	20,05	14,03	6,43	14,10	1,65	-7,50	13,50	2,93
sep-20	-3,28	-9,90	21,28	13,40	6,53	15,08	1,55	-6,75	14,80	3,48
nov-20	-2,28	-8,98	20,98	13,35	7,58	15,83	2,33	-6,50	15,00	4,00
dec-20	-1,80	-9,33	20,80	14,15	7,60	16,18	2,28	-7,20	14,28	4,03
mrt-21	-0,47	-8,88	19,90	13,50	7,73	16,20	1,95	-5,93	14,18	3,63
mei-21	-2,28	-10,03	23,23	14,40	9,50	14,88	0,70	-7,78	13,90	2,85
jul-21	-2,95	-7,48	23,60	13,95	8,80	13,15	-0,12	-7,18	12,58	0,67
aug-21	-2,15	-8,30	24,33	15,15	9,40	14,05	0,28	-8,28	13,58	2,68
nov-21	-2,13	-8,83	24,10	16,05	10,48	16,23	1,38	-8,53	13,20	4,25
dec-21	-2,30	-8,33	24,05	15,58	10,43	16,50	0,85	-8,38	12,65	4,63
mrt-22	-9,85	-14,85	24,73	21,90	10,95	14,38	2,28	0,80	7,23	-0,10
mei-22	-11,65	-15,45	26,23	22,13	10,88	12,60	1,55	2,00	6,83	-1,95
jul-22	-11,83	-16,35	24,68	21,98	10,88	12,33	0,30	-1,10	6,88	-1,60
sep-22	-9,28	-16,30	25,55	23,43	12,78	16,23	1,75	-1,95	8,50	1,20
nov-22	-9,55	-16,25	25,65	23,03	11,38	15,05	1,10	-2,73	8,08	0,00
dec-22	-9,18	-14,73	25,58	22,53	12,18	15,35	0,65	0,30	8,08	0,05
totaal	-9,18	-14,73	25,58	22,53	12,18	15,35	0,65	0,30	8,08	0,05
maanden	97	97	97	97	97	97	97	97	97	95
snelheid mm/j	-11,4	-18,2	31,6	27,9	15,1	19,0	0,8	0,4	10,0	0,1

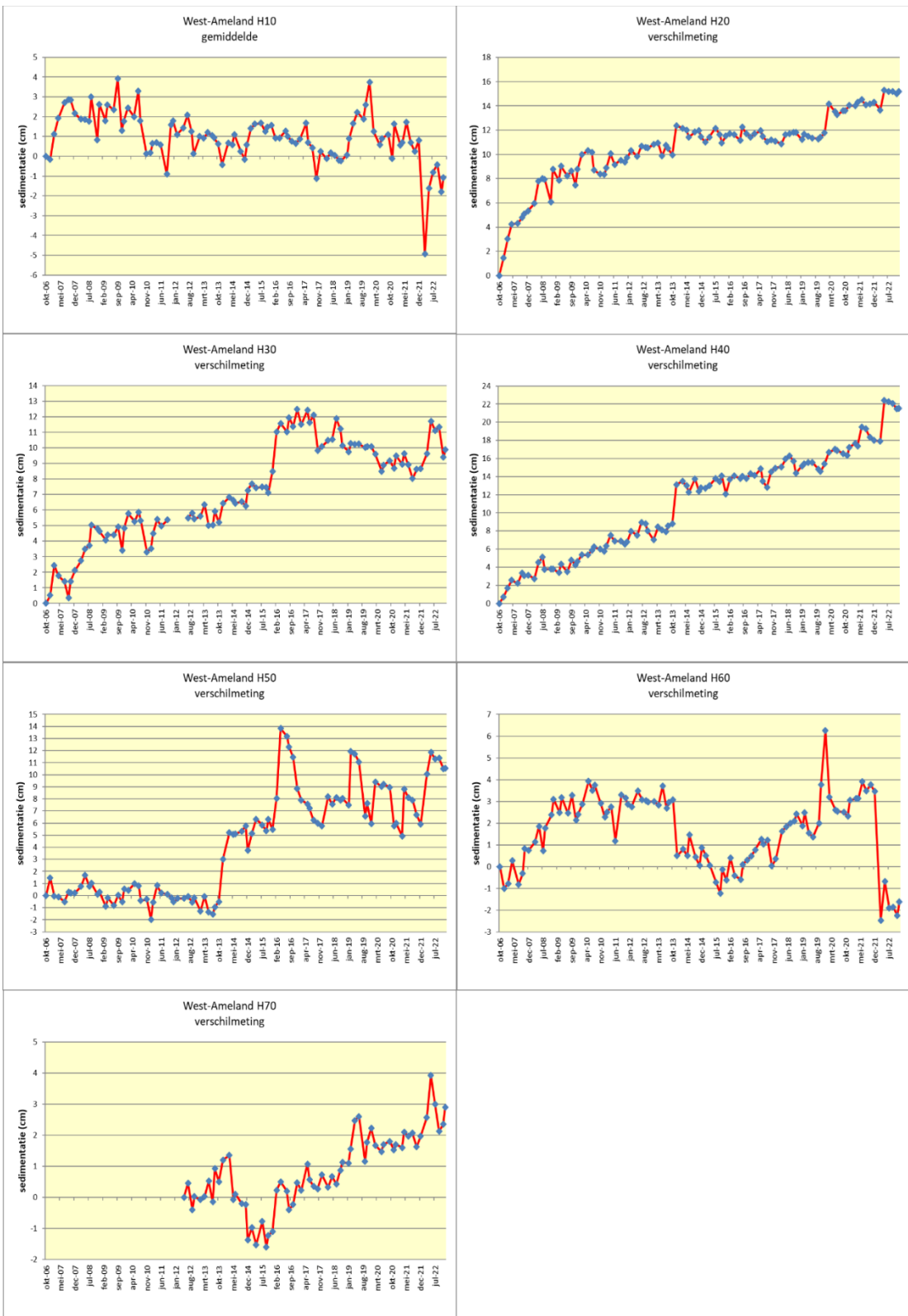
A.4 Grafieken meetstations Oost-Ameland



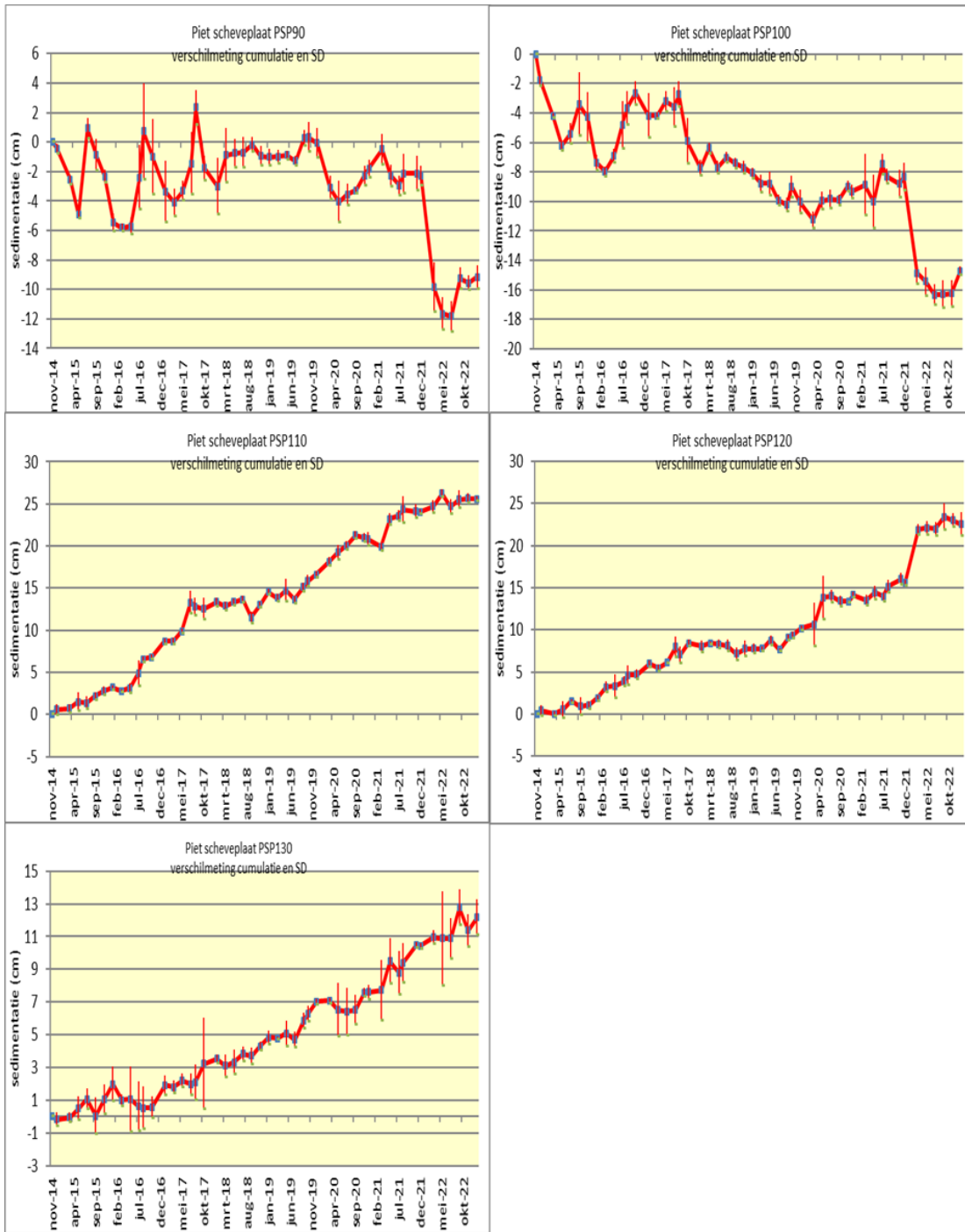


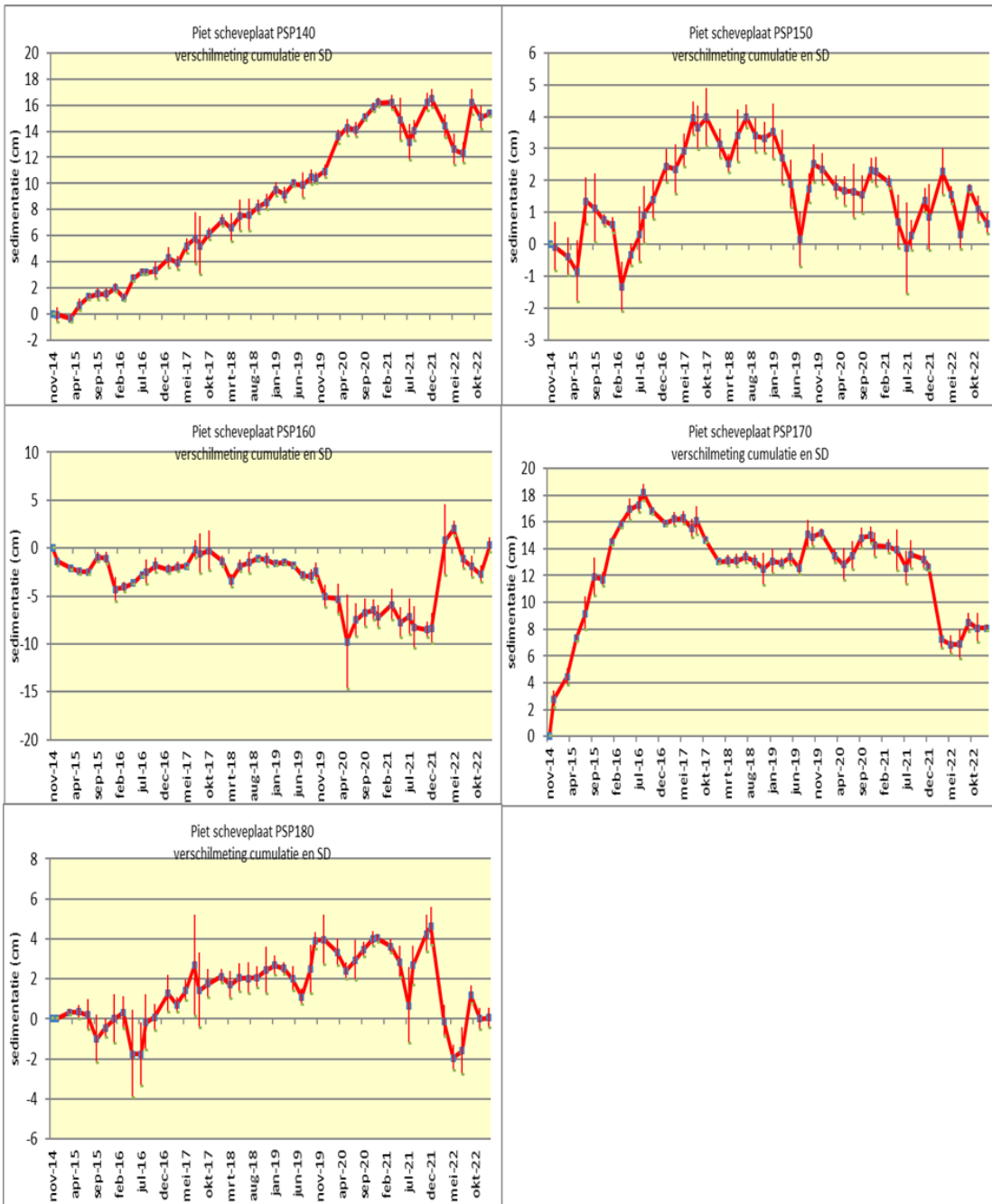


A.5 Grafieken meetstations West-Ameland.



A.6 Grafieken meetstations Piet Scheveplaat.





B Panoramafoto's

B.1 Panoramafoto's Baken



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2017



2018



2019



2020



2021



2022

B.2 Panoramafoto's Hon paal 25,8



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2017



2018



2019



2020



2021



2022

B.3 Panoramafoto's Hon paal 27,2



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2017



2018



2019



2020



2021



2022

B.4 Panoramafoto's Meidoornvallei buiten



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2017



2018



2019



2020



2021



2022

B.5 Panoramafoto's Vallei NC02



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2017



2018



2019



2020



2021



2022

B.6 Stormvloedgeul bij Baken 2004-2022

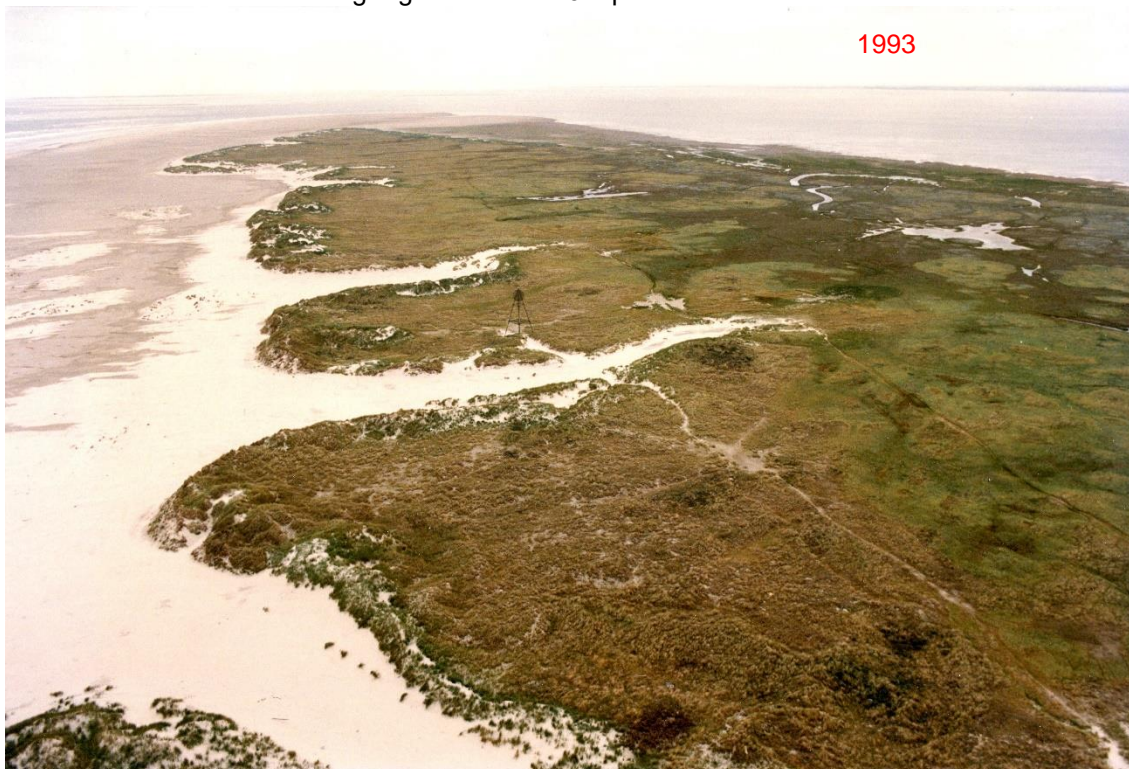


B.7 Detail in stormvloedgeul bij Baken



B.8 Luchtfoto Hon 1993 en 2022

Beide luchtfoto's met een vlieger gemaakt door Jaap de Vlas.



Bodemsamenstelling

Zheng Bing Wang (Deltares) en Jelmer Cleveringa (Arcadis)

Inleiding

De vraag of (diepe) bodemdaling door gaswinning de bodemsamenstelling in de Waddenzee kan beïnvloeden was gesteld tijdens de MER studie (zie Wang en Eysink, 2005), omdat vooral het slibgehalte in de bodem belangrijk is voor bodemdieren. Op basis van hydrodynamische modellering was er toen geconcludeerd dat er geen significante invloed van bodemdaling op de bodemsamenstelling wordt verwacht omdat de bodemschuifspanning weinig wordt beïnvloed door bodemdaling. Daarom is er tot nu toe weinige aandacht besteed aan de ontwikkeling van de bodemsamenstelling in de monitoring effect bodemdaling door gaswinning.

Het onderwerp is onlangs in de belangstelling gekomen na de publicatie van de paper door de la Barra e.a. (2024) en de media-aandacht eromheen. Daarom worden de bevindingen uit de studie van de la Barra e.a. (2024) samengevat, gevolgd door discussies om te concluderen of de conclusie m.b.t. invloed van bodemdaling op bodemsamenstelling uit eerdere studies aangepast moet worden.

De studie van de la Barra e.a. (2024)

De studie maakt gebruik van de SIBES dataset en analyseert de ontwikkelingen van bodemsamenstelling en bodemdieren (macrozoobenthos) in de Waddenzee, waarbij “het bodemdalingsgebied” in het Friesche Zeegat en de rest van de (NL) Waddenzee met elkaar worden vergeleken.

Voor bodemsamenstelling wordt naast het slibgehalte ook de mediane korrelgrootte (D50) gebruikt als indicator, en de bevindingen zijn:

- Het slibgehalte in het bodemdalingsgebied is hoger dan in de rest van de Waddenzee. Het verschil is 3% en blijft constant in de beschouwde periode (2008-2020).
- Binnen het bodemdalingsgebied vertoont de D50 een afnemende trend in de tijd van 1 micrometer per jaar, terwijl in de rest van de Waddenzee er geen duidelijke trend is gevonden.

M.b.t. macrozoobenthos werden de totale biomassa en de samenstelling van diersoorten beschouwd, en de bevindingen zijn:

- Er is geen verschil gevonden qua totale biomassa tussen het bodemdalingsgebied en de rest van de Waddenzee. De iets hogere slibfractie en gemiddelde afname van de korrelgrootte heeft volgens het onderzoek geen effect op de totale biomassa van macrozoöbenthos.
- Qua samenstelling van diersoorten is er gevonden dat de biomassa van soorten die diepere gebieden gebruiken is toegenomen en die van soorten die ondiepere gebieden gebruiken afgenomen.

Na nadere beschouwing, o.a. door gebruik te maken van de zogenaamde nep bodemdalingsgebieden is er geconcludeerd dat:

- de gevonden verschillen m.b.t. macrozoobenthos niet aan effecten van bodemdaling kunnen worden toegeschreven, omdat het een gevolg van natuurlijke variatie in de ruimte kan zijn.
- er mogelijk een causaal verband is tussen bodemdaling en de gevonden verschillen in bodemsamenstelling, maar het is niet aangetoond wegens gebrek aan voldoende gegevens.

Discussies

De gevonden verschillen m.b.t. macrozoobenthos hebben betrekking tot verschuiving tussen soorten die andere diepten prefereren. In de paper is er al geconcludeerd dat de verschillen door natuurlijke variaties zijn veroorzaakt. Bovendien kan bodemdaling theoretisch niet de oorzaak zijn van zo een verschuiving omdat er in het bodemdalingsgebied geen verdieping heeft opgetreden doordat bodemdaling is gecompenseerd door sedimentatie.

De vergelijking tussen het bodemdalingsgebied en de rest van de Waddenzee m.b.t. de ontwikkeling van bodemsamenstelling is in de paper van de la Barra e.a. (2024) gepresenteerd met de uitkomst van een “mixed-effects model” voor de gemiddelde waarden van D50 en het slibgehalte per gebied (binnen of buiten het bodemdalingsgebied). In de paper worden de onderliggende velddata niet gepresenteerd. Daarnaast is er niet besproken waar en welke veranderingen hebben plaatsgevonden die de verschillen veroorzaken. Er is wel gesuggereerd dat de gevonden afnemende trend van D50 in het bodemdalingsgebied waarschijnlijk door sedimentatie van fijner zand is veroorzaakt, omdat het slibgehalte constant in de tijd blijft, zowel in als buiten het bodemdalingsgebied. Verder wordt er geredeneerd dat het plausibel is dat het sediment fijner wordt als er sedimentatie ter compensatie van bodemdaling optreedt. Maar er kunnen verschillende argumenten worden aangedragen die deze redenering tegenspreken:

- Er is inderdaad sedimentatie opgetreden in het beschouwde bodemdalingsgebied, maar het is niet het gebied met de hoogste sedimentatiesnelheid binnen de Nederlandse Waddenzee. Sedimentatie in het gebied wordt beperkt door sedimentvraag en die is relatief lager dan in bijvoorbeeld het westelijke deel van de Waddenzee waar de sedimentvraag door de afsluiting van de Zuiderzee nog zeer hoog is. Verder wordt opgemerkt dat de netto sedimentatie in dit gebied, maar ook elders in de Waddenzee, veel kleiner is dan de bruto veranderingen van het bodemniveau door sedimentatie en erosie.
- Het beschouwde bodemdalingsgebied bevat praktisch het hele bekken van Pinkegat en een deel van Zoutkamperlaag. In het Pinkegat wordt de sedimentvraag vooral veroorzaakt door bodemdaling en zeespiegelstijging, beide in de orde van 2 mm/jaar. In het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag is er nog de resterende sedimentvraag door de afsluiting van de Lauwerszee. Recente studies tonen bijvoorbeeld aan dat de Zoutkamperlaag nog steeds sterk sedimenteert. Diepe bodemdaling is dus slechts een (klein) deel van de sedimentvraag die de sedimentatie in het gebied veroorzaakt. Sedimentatie en de mogelijk samenhangende verfijning van het bodemsediment in het gebied zou dus hoogst waarschijnlijk ook zijn opgetreden zonder bodemdaling.

- Het klopt dat binnen eenzelfde systeem een sedimentatiegebied fijner sediment kan bevatten dan een erosiegebied door selectief transport, i.e. fijnere fractie van het sediment wordt makkelijker getransporteerd dan grovere fractie. Maar verfijning van sedimentatiegebied gebeurt meestal samen met toename van slibgehalte. Als het inderdaad zo is (wat dient te worden geverifieerd door de velddata nader te analyseren) dat alleen de zandfractie in de bodem fijner is geworden dan is de oorzaak van de relatieve verfijning waarschijnlijk bij de bron van het zand.

Een andere argument in de paper om het aannemelijk te maken dat bodemdaling de verschillende ontwikkeling van bodemsamenstelling in het bodemdalingsgebied heeft veroorzaakt, is dat de nep-bodemdalingsgebieden de gevonden verfijning van sediment in de tijd niet vertonen. Dit kan echter ook te maken hebben met de manier waarop de nep-bodemdalingsgebieden zijn gedefinieerd. Het is bijvoorbeeld niet duidelijk waarom een gebied tussen Vlie en Ameland er zeegat buiten de nep-bodemdalingsgebieden is gehouden.

In de paper is er onvoldoende gekeken naar andere mogelijke oorzaken, waaronder de gevolgen van andere menselijke ingrepen rondom het bodemdalingsgebied, voor de gevonden verschillen. Een Voorbeeld van ingrepen die invloed kunnen hebben op de bodemsamenstelling is baggeren en storten voor de verbetering en onderhoud van de vaargeul tussen Holwerd en Nes.

Conclusie

Anders dan de indruk die wordt opgewekt in de media is er in de paper van de la Barra e.a. (2024) geen causaal verband aangetoond tussen de bodemdaling door gaswinning en de gevonden verschillen tussen het bodemdalingsgebied en de rest van de Waddenzee. Dit geldt voor de ontwikkelingen van zowel de bodemsamenstelling als de macrozoobenthos.

Een mogelijk causaal verband tussen bodemdaling en de gevonden afwijking van het bodemdalingsgebied t.o.v. de rest van de Waddenzee m.b.t. bodemsamenstelling is niet zo plausibel als in de paper van de la Barra e.a. (2024) is gesuggereerd.

De studieresultaten van de la Barra e.a. (2024) geven geen voldoende aanleiding om de conclusies m.b.t. invloed van bodemdaling op verandering van bodemsamenstelling getrokken in de eerdere studies te herzien.

De door de la Barra e.a. (2024) uitgevoerde analyse laat zien dat de korrelgrootte data van de Waddenzee een schat aan informatie bevat die gekoppeld kan worden aan de abiotische en biotische condities in de Waddenzee. Verdere analyse en duiding van deze gegevens in samenhang met de andere gegevens die beschikbaar zijn voor de hele Waddenzee en de nog grotere dataset van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag, kan nieuwe inzichten opleveren in dynamiek van de wadplaten. Het is ook interessant om te beschouwen hoe de ontwikkelingen in de toekomst zullen voortzetten.

Referenties

De La Barra, P., Aarts, G., Bijleveld, A., 2024. The effects of gas extraction under intertidal mudflats on sediment and macrozoobenthic communities. *Journal of Applied Ecology*, 61:390–405. DOI: 10.1111/1365-2664.14530.

Wang en Eysink, 2005. Abiotische effecten van bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee – Vloedkom van het Friesche Zeegat, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z3995.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl