



2 Morfologie



Zheng Bing Wang¹, Johan Krol², Loek Kuiters³, Daisy de Vries³, Ruut Wegman³ & Pieter Slim³
B. de Jong, P.A. Slim, M. Riksen en J. Krol, 2011

¹Deltares

²Natuurcentrum Ameland

³Wageningen Environmental Research





Inhoudsopgave

2	Morfologie	26
2.1	Inleiding	30
2.2	Grootschalig morfologische veranderingen	31
2.2.1	Morfologisch systeem rondom het eiland Ameland	31
2.2.2	Grootschalige veranderingen op kaart	35
2.2.3	Relatie tot bodemdaling	37
2.3	Noordzeekust	38
2.4	Friesche Zeegat en De Hon	42
2.5	Waddenzee	46
2.6	Wadplaat sedimentatie bij Ameland 2000-2016	56
2.6.1	Inleiding	56
2.6.2	Materiaal en methode	57
2.6.3	Onderzoeksgebieden en meetstations	60
2.6.3.1	Oost-Ameland	60
2.6.3.2	West-Ameland	61
2.6.4	Resultaten Oost-Ameland	62
2.6.4.1	Uitwerking per meetstation	62
2.6.4.2	Bodemdaling wadplaten Oost-Ameland	63
2.6.4.3	Sedimentatie op wadplaat Oost-Ameland.	64
2.6.4.4	Plaatsedimentatie in relatie tot de tijd	66
2.6.4.5	Wadplaatsedimentatie in relatie tot hoogteligging.	68
2.6.4.6	Wadplaatsedimentatie in relatie tot bodemdaling	69
2.6.5	Resultaten West-Ameland	71
2.6.5.1	Uitwerking per meetstation	71
2.6.5.2	Sedimentatie alle meetstations West-Ameland	72
2.6.5.3	Plaatsedimentatie in relatie tot tijd	72
2.6.5.4	Plaatsedimentatie in relatie tot hoogteligging.	73
2.6.6	Discussie	74
2.6.7	Conclusies (2000-2016)	75
2.7	Engelsmanplaat	76
2.8	Ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland	78
2.8.1	Inleiding	78
2.8.2	Gerapporteerde effecten van dynamisch kustbeheer op duinvorming in de zeereep in de literatuur	80
2.8.2.1	Morfologie	80
2.8.2.2	Maatregelen	81
2.8.2.3	Suppleren	81
2.8.2.4	Evaluatie	81
2.8.2.5	Casestudie Oost-Ameland	81
2.9	Panoramafoto's 2004-2016	83
2.9.1	Inleiding	83
2.9.1.1	Aanleiding onderzoek.	83
2.9.1.2	Welke opnamelocaties	84
2.9.2	Materiaal en methode	85
2.9.3	Panoramafoto's	86
2.9.3.1	Baken	86
2.9.3.2	Hon paal 25,8	87
2.9.3.3	Hon paal 27,2	88
2.9.3.4	Meidoornvallei binnen	89
2.9.3.5	Meidoornvallei buiten	91
2.9.3.6	Vallei NC02	92
2.9.3.7	Stormvloedgeul bij Baken 2004-2016	93
2.9.3.8	Detail in stormvloedgeul bij Baken	94
2.10	Morfologie kwelderrand Oerderduinen	95



2.10.1	Inleiding	95
2.10.2	Aanleiding en doel	95
2.10.3	Kwelderrand Oerderduinen	96
2.10.4	Luchtfoto-interpretatie	98
2.10.5	Resultaten morfologische dynamiek kwelderrand	99
2.10.6	Conclusies en discussie	100
2.11	Overige relevante abiotische factoren	101
2.11.1.1	Algemeen	101
2.11.1.2	Waterstanden	101
2.11.1.3	Representatieve waterstanden en stormvloedgegevens	102
2.11.1.4	Zeespiegelstijging	104
2.11.1.5	Neerslag en verdamping	107
2.12	Conclusies	108
2.12.1	Grootschalig morfologische ontwikkelingen	108
2.12.2	Noordzeekust en kustsuppletie	108
2.12.3	Zeegat en de Hon	109
2.12.4	Waddenzee bekken	109
2.12.5	Wadplaat sedimentatie	109
2.12.6	De erosie op de Engelsmanplaat	109
2.12.7	Ontwikkeling van zeereep op Oost-Ameland	109
2.12.8	Panoramafoto's	110
2.12.9	Conclusies m.b.t. effecten bodemdaling	110
2.12.10	Literatuur	110



2.1 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 et al, 1987), waarna eind 1988 is begonnen met de monitoring. De eerste vier rapportages van de monitoring zijn gebaseerd op gegevens tot 1994, 1999, 2004 en 2010 en beschrijven de effecten over een periode van respectievelijk 8 jaar, 13 jaar, 18 jaar en 24 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 et al., 1995 en 2000, en NAM et al., 2005, 2011). De huidige rapportage is de vijfde sinds het begin van de monitoring van de effecten van de bodemdaling door de gaswinning op Ameland-oost en is een aanvulling op de uitgebreide rapportages van 2000, 2005 en 2011. Voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar die evaluatierapporten.

In dit hoofdstuk 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:

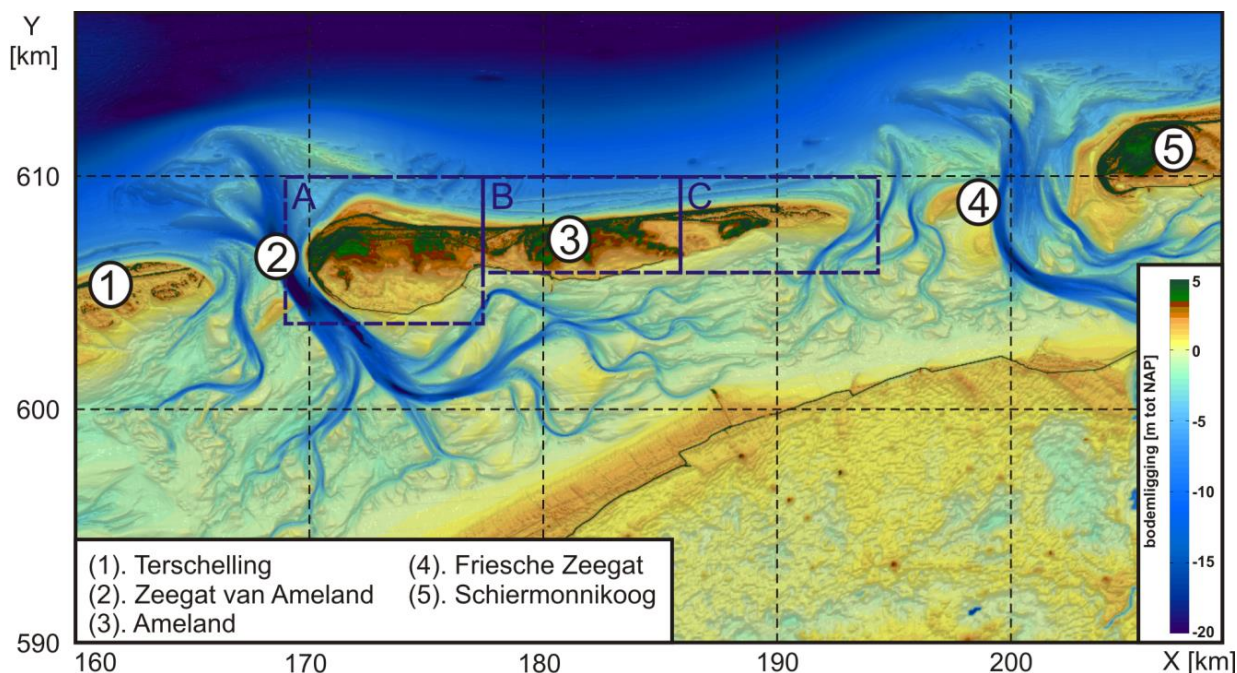
- Grootschalig morfologische ontwikkeling rondom Ameland (2.2, Deltares)
- Ontwikkeling van de Noordzeekust van Ameland en de kustsuppleties (2.3, Deltares)
- Ontwikkeling van het Friesche Zeegat en de Hon (2.4, Deltares)
- Ontwikkeling van het Waddenzeebekken Pinkegat (2.5, Deltares)
- Wadplaatsedimentatie bij Ameland (2.6, NCA)
- Ontwikkeling van de Engelsmanplaat (2.7, Deltares)
- Morfologische ontwikkeling van de zeereep op Oost-Ameland (2.8, NCA)
- Panoramafoto's Oost Ameland (2.9, NCA)
- Ontwikkeling van de morfologie van de kwelderrand (2.10, Alterra)
- Overige relevante abiotische factoren (2.11, Deltares)

De belangrijkste bevindingen van de studie worden samengevat in paragraaf 2.12.

2.2 Grootschalig morfologische veranderingen

2.2.1 Morfologisch systeem rondom het eiland Ameland

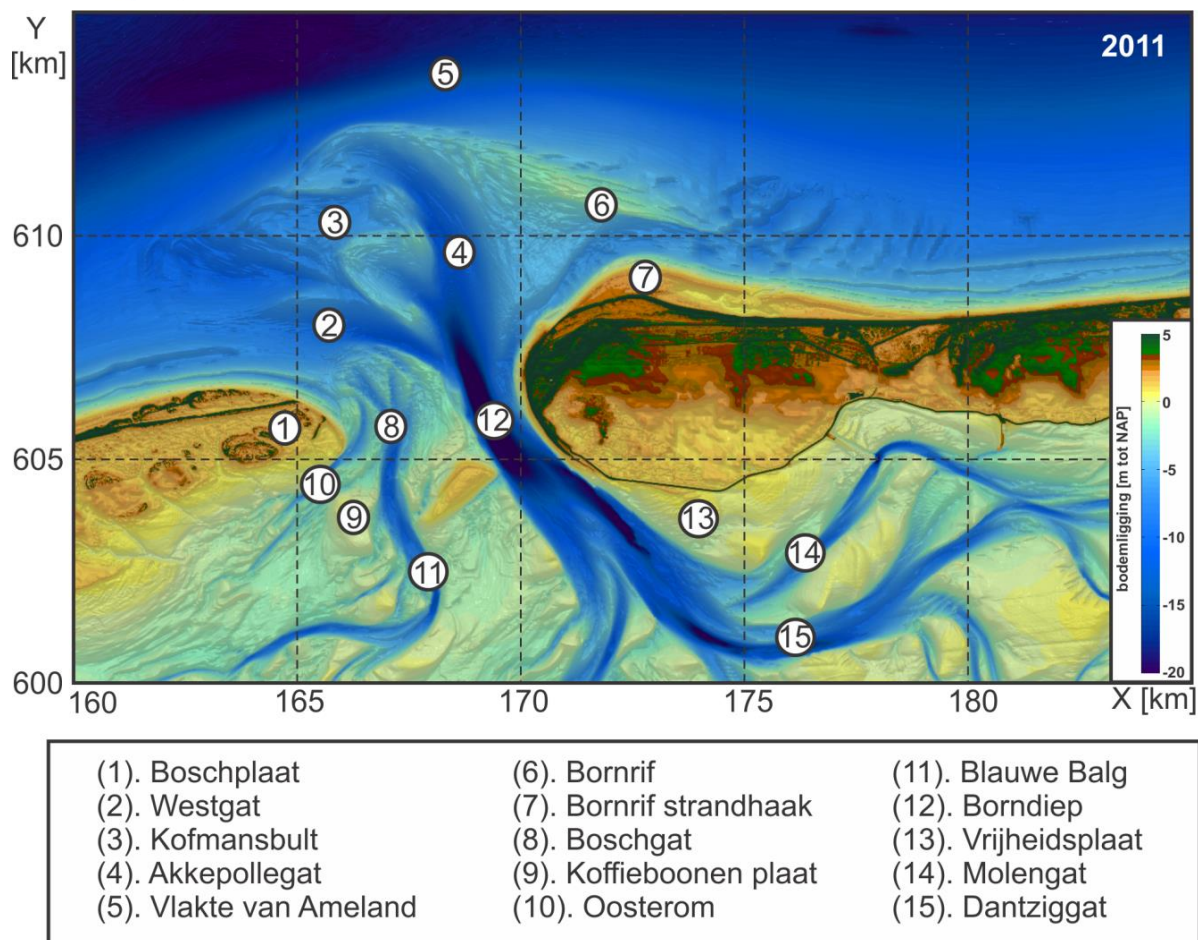
Ameland is centraal gelegen in de rij van Nederlandse Waddeneilanden. Het voornamelijk uit zandduinen bestaande eiland is ongeveer 25 km lang met een maximale breedte van 4,5 km. Het totale oppervlak beslaat zo'n 60 km². Het oostelijke gedeelte van het eiland (de laatste 10 km) is onbewoond en herbergt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



Figuur 2.1 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.

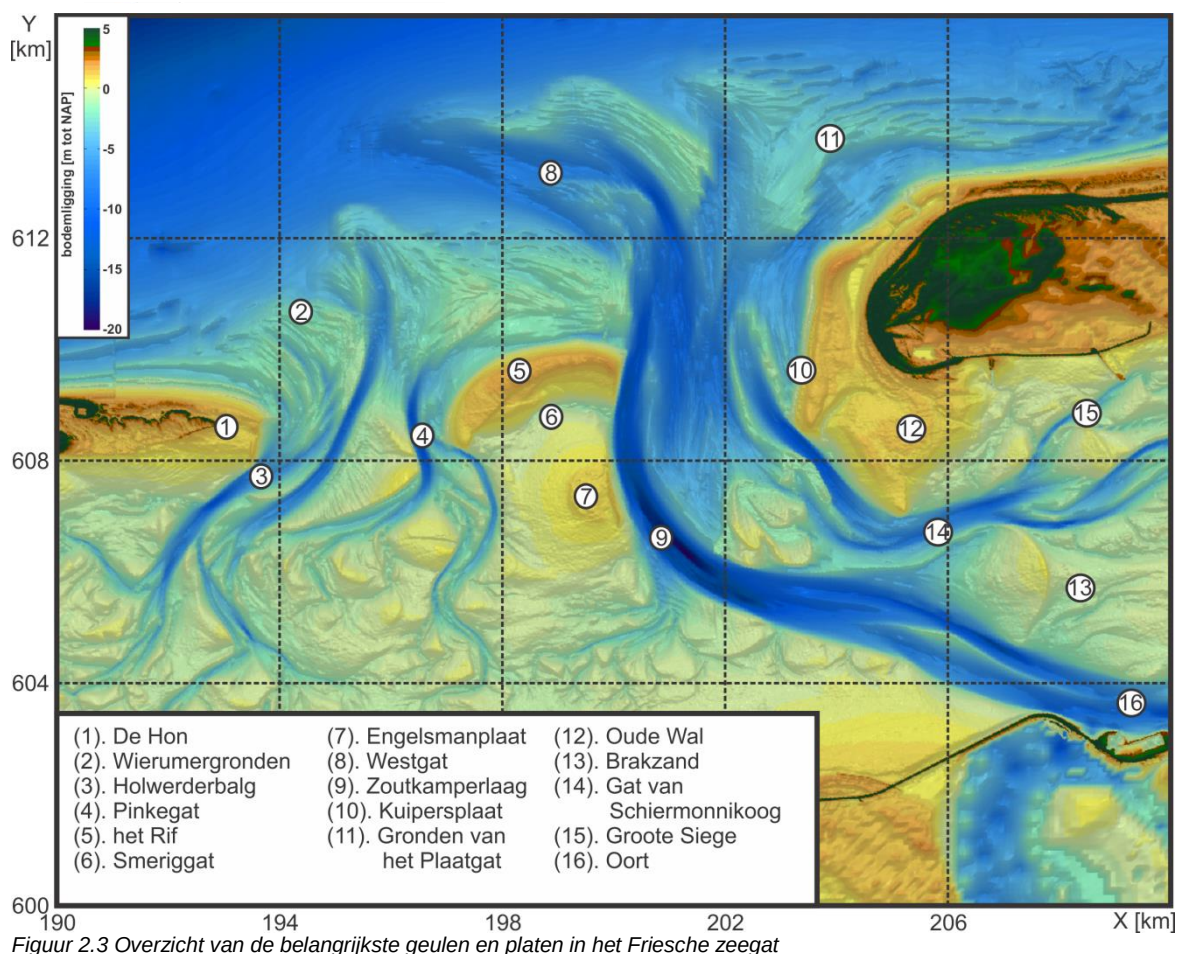
Het Ameland eiland is ingesloten door twee zeegaten. Het zeegat van Ameland, met de geul Borndiep bevindt zich aan de westkant en het Friesche Zeegat (met het Pinkegat) ligt ten oosten (figuur 2.1). De morfologische ontwikkelingen van deze zeegaten bepalen in grote mate de ontwikkeling van het eiland Ameland en met name de veranderingen bij de eilandkoppen (Cleveringa et al., 2005, Oost, 1995). 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 2.2 geeft een overzicht van de belangrijkste geulen in het Ameland Zeegat. Historisch gezien vertoont het zeegat een cyclisch gedrag waarin enkele en dubbele geulconfiguraties elkaar afwisselen (Van der Spek en Noorbergen, 1992, Israël, 1998, Israël en Dunsbergen, 1999; Cheung et al. 2007). De 2011 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.



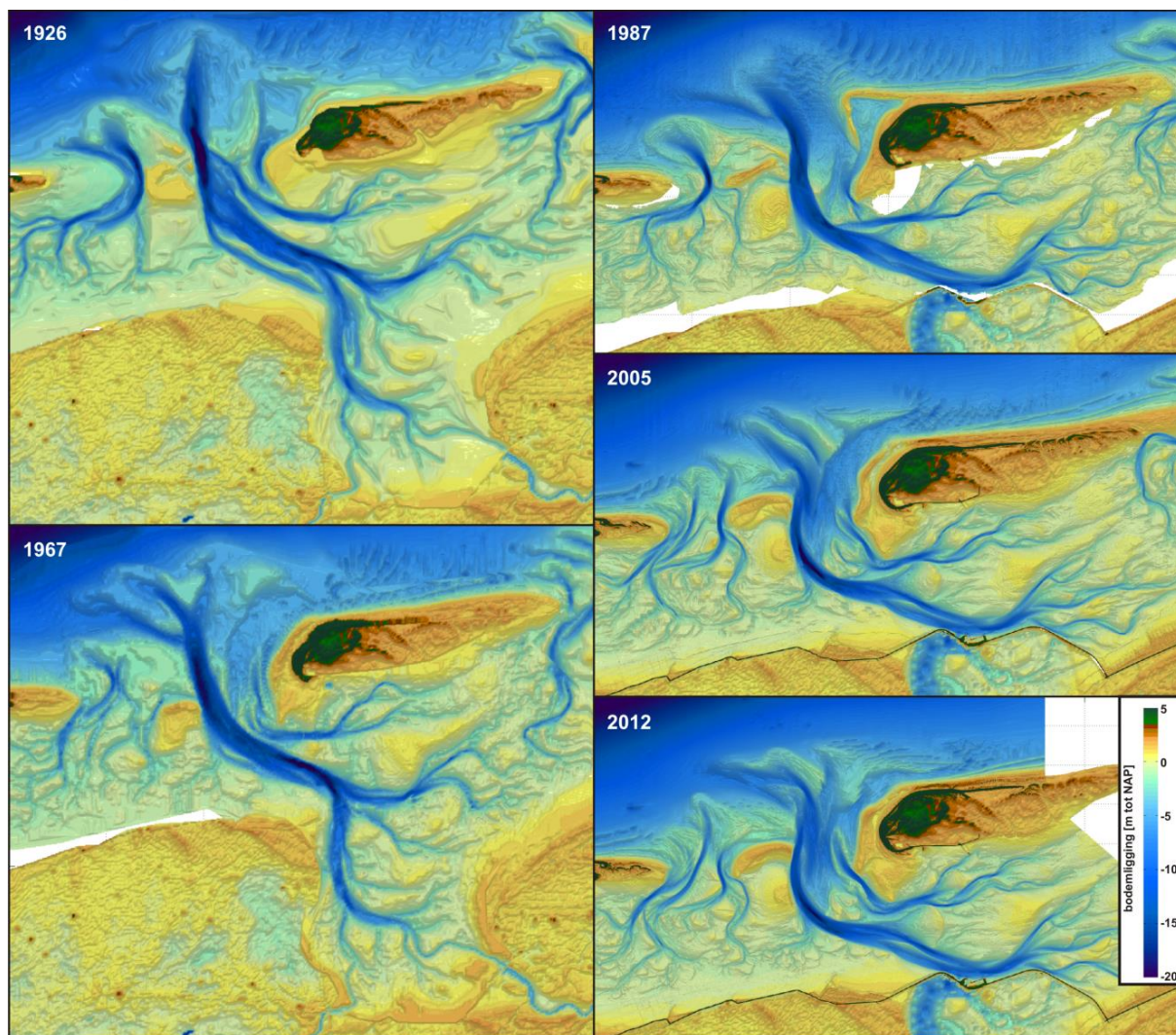
Figuur 2.2 Overzicht van de belangrijkste geulen en platen in het Amelanders zeegat in 2011.

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 Friesche zeegat

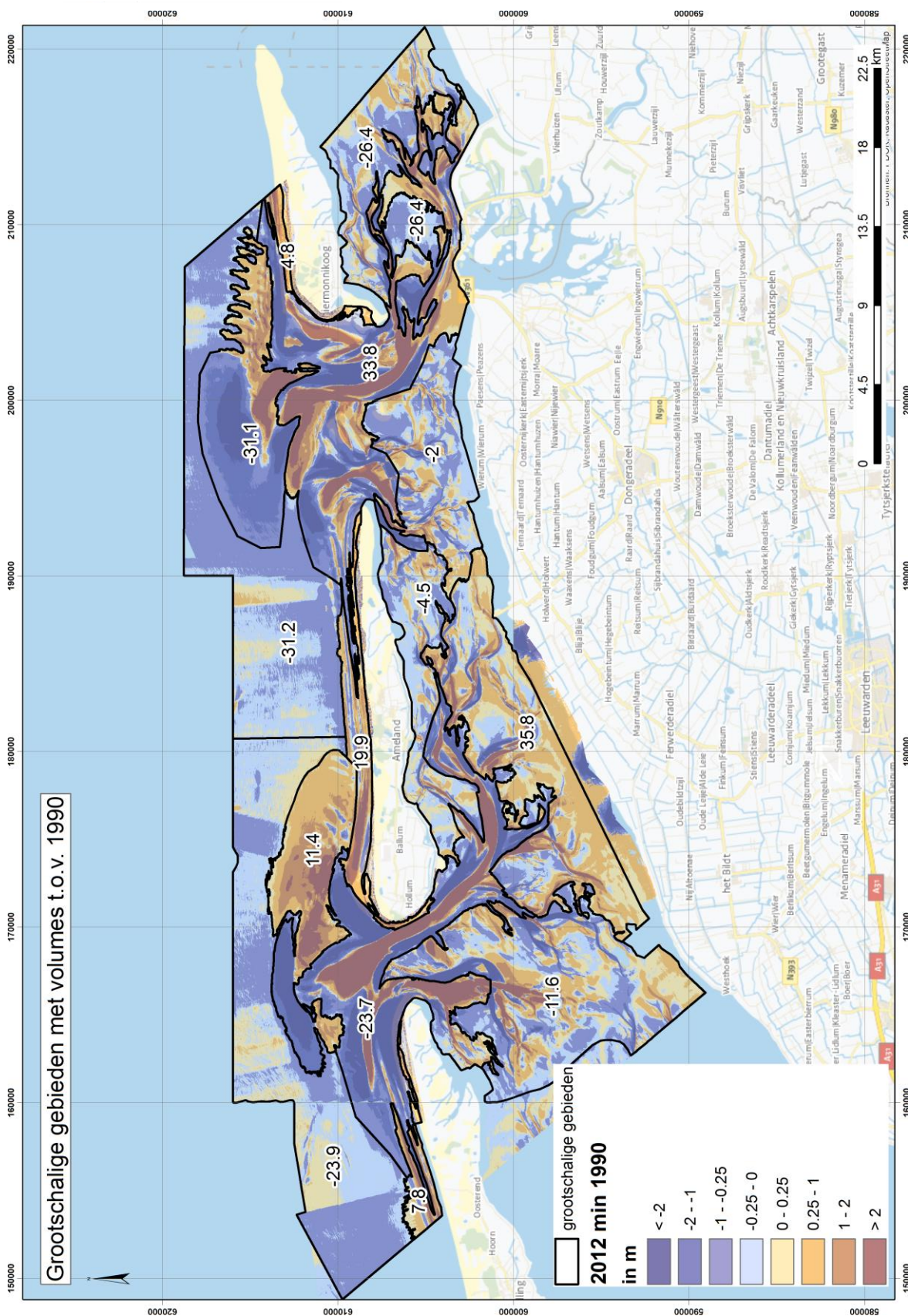
Het Friesche zeegat bestaat uit twee deelsystemen, Pinkegat en Zoutkamperlaag, gescheiden door de Engelmansplaat (figuur 2.3, [7]). De huidige configuratie van platen en geulen is sterk beïnvloed door de afsluiting van de Lauwerszee in 1969 (Biegel, 1993; Oost, 1995). Vóór de afsluiting was er zowel in het Pinkegat en het Zoutkamperlaag deelsysteem een cyclische ontwikkeling tussen een één en twee-geulsystemen te zien. Na afsluiting, vonden er grote veranderingen in zowel het bekken als het zeegat plaats (figuur 2.4). 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 2.4, 1987). De aanlanding van deze strandhaak en de herverdeling van dit sediment bepaalt de huidige morfologische ontwikkeling van het eiland.



Figuur 2.4 Grootschalige morfologische ontwikkeling van het Friesche zeegat op basis van de Vakkelingen (de eilanden zijn ingevuld met het AHN-1(1996-2003))

Grootschalige veranderingen op kaart





Figuur 2.6 Grootschalige gebieden met verandering in volume tussen 1990 en 2012 in miljoen m³, positieve waarden zijn sedimentatie, negatieve erosie



Tabel 2.1 Volumeveranderingen tussen 1990 en 2012 voor de grootschalige gebieden en de kwelders langs het vasteland

Naam grootschalig gebied	Volumeverandering 1990-2012 (10 ⁶ m ³)
kom West	-11.64
kom Zuid	35.77
kom Ameland	-4.55
Zeegat van Ameland	-23.7
ebdelta Zeegat van Ameland	11.43
kwelder vasteland	15.3
subtotaal	+22.61
kom Friesche Zeegat	-1.98
kom Oost	-26.39
Friesche Zeegat	33.84
ebdelta Friesche Zeegat	-31.06
kwelder vasteland	2.7
subtotaal	-22.89
kust Terschelling	7.84
kust Ameland	19.86
kust Schiermonnikoog	4.79
subtotaal	+32.49
offshore West	-23.93
offshore Oost	-31.16
subtotaal	-48.57
Totaal	-22.88

Tussen 1990 en 2012 is de totale verandering in volume van alle deelgebieden en de kweldergebieden langs het vasteland netto ruim -22 miljoen m³ achteruit gegaan (tabel 2.1). In de tabel zijn ook subtotalen weergegeven van grootschalige gebieden rondom de twee zeegaten, inclusief de kwelders langs het vasteland. Voor het Zeegat van Ameland en de omliggende gebieden is het volume netto ruim 22 miljoen m³ toegenomen, voornamelijk door de grote toename in *kom Zuid*. Het Friesche Zeegat en omliggende gebieden zijn juist netto ruim -22 miljoen m³ in volume afgenomen. Samen zijn de geulen, geul/plaat systemen in de Waddenzee en ebdelta's dus ongeveer gelijk gebleven in volume. De kusten van de eilanden zijn flink in volume toegenomen, ruim 32 miljoen m³ in het geanalyseerde gebied. Dit komt deels door de suppleties en deels door sedimentaanvoer vanaf aanlandende platen vanaf de buitendeltas. De kuststrook van Ameland is bijna 20 miljoen m³ in volume toegenomen. Dit is vrijwel evenveel als de hoeveelheid die op Ameland is gesuppleerd (20.6 miljoen m³, merk op dat dit het totale volume op hele Ameland kust betreft en dus anders is dan het in 2.3 gerapporteerd effectieve volume tussen kmr.7 en kmr.20). De grootste afname in volume bevindt zich in de offshore gebieden: totaal -55 miljoen m³.

2.2.3 Relatie tot bodemdaling

De totale bodemdaling die tussen 1986 en 2009 is opgetreden is maximaal 30 cm en gemiddeld 1.3 cm per jaar, wat relatief t.o.v. de morfologische veranderingen vrij laag is. De gemiddelde veranderingen in het Friesche zeegat en de kuststrook liggen tussen de 4 en 17 cm per jaar, het gebied in de Wadden (gebied 28) heeft gemiddeld wel een kleinere verandering van -0.5 cm per jaar, maar toont veranderingen tussen tot 65 cm per jaar.

Het totale volume van de dalingskom is echter wel significant. Volgens de Meet & Regelcyclus Waddenzee 2015 is het totale volume van de daling tussen 1986 en 2012 door gaswinning op Ameland 15.2 miljoen m³, waarvan 3.9 miljoen m³ in Pinkegat, en 7.3 miljoen m³ in Noordzee.



In de voorgaande rapportages werd geen zichtbaar effect van bodemdaling op de morfologische ontwikkeling van het gebied geconstateerd. De huidige analyse geeft een verklaring hiervoor: de bodemdaling (maximaal orde 1 cm/jaar) is een orde kleiner dan de waargenomen lokale sedimentatie-erosiesnelheid. Dit neemt echter niet weg dat de totale volumes van de daling in verschillende

2.3 Noordzeekust

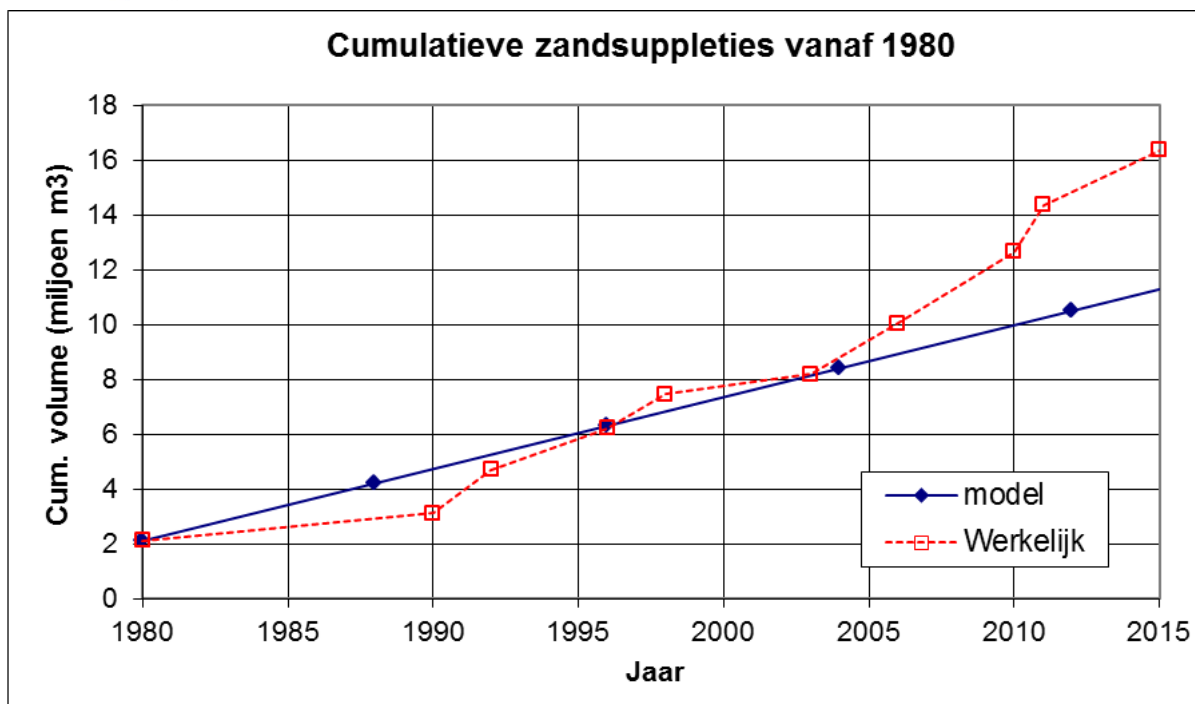
In 1987 is met behulp van een kustlijnmodel een voorspelling gemaakt van het gedrag van de Noordzeekust tussen kmr 7 en kmr 25 (Eysink et al, 1987). De voorspelling geeft de berekende verandering in de positie van de gemiddelde hoogwaterlijn (GHW-lijn) ten opzichte van die in het jaar 1980. De berekeningen 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. De suppleties langs de Noordzeekust van Ameland ten oost van kmr. 7 sinds 1980 zijn weergegeven in tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kustsuppleties Noordzeekust Ameland tussen kmr.7 en kmr.20. 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

Figuur 2.7 laat de ontwikkeling van het cumulatieve volume effectief zien vanaf 1980, samen met die in het kustlijnmodel.

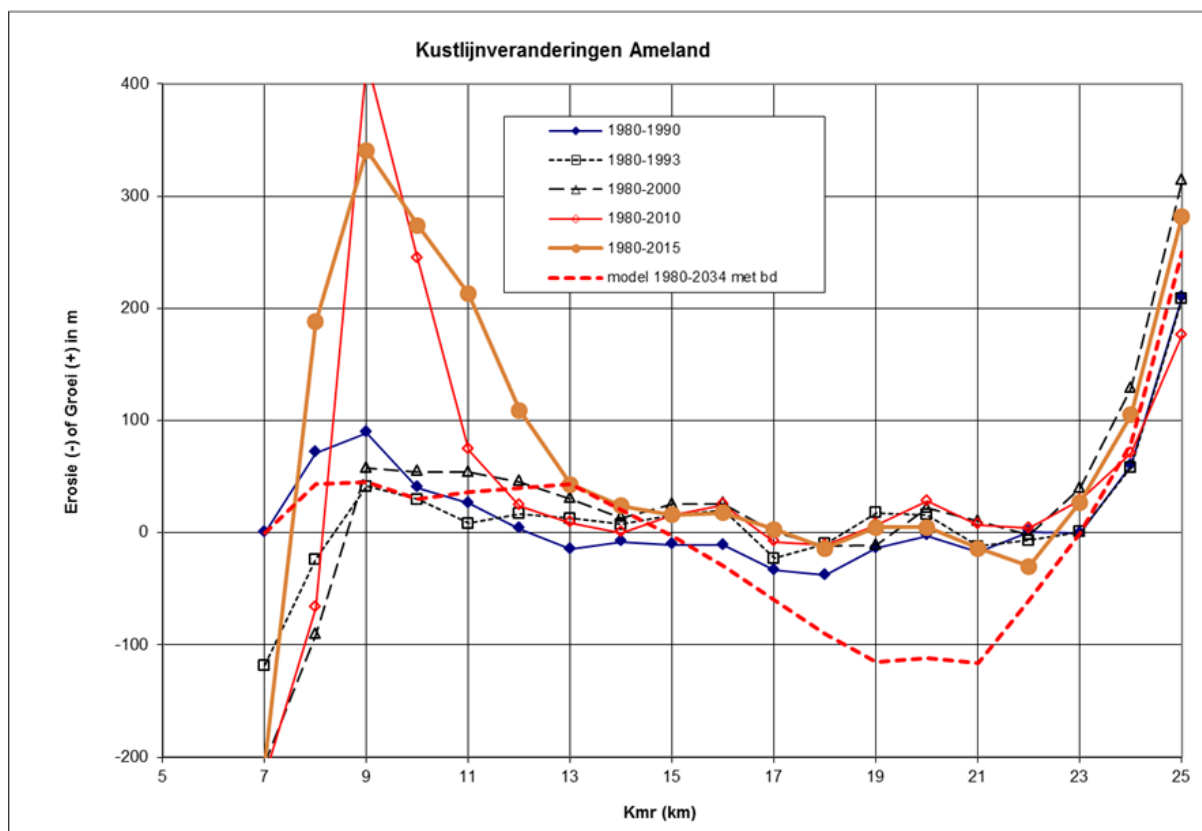


Figuur 2.7 Totale effectieve volume van de kustsuppleties op het Noordzeestrand van Ameland vanaf 1980

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-standhouden 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.

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 (figuur 2.7). Vanaf 2005 loopt de werkelijke kustsuppletie sneller op in de tijd dan dat in het model. In de vorige rapportage was deze afwijking nog niet aangemerkt omdat het dan nog maar om één duidelijke afwijking (2010) gaat. 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 ($R^2=0.97$) van 0,5 miljoen m³ per jaar, aanzienlijk hoger dan de waarde van 0,2625 miljoen m³ 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.

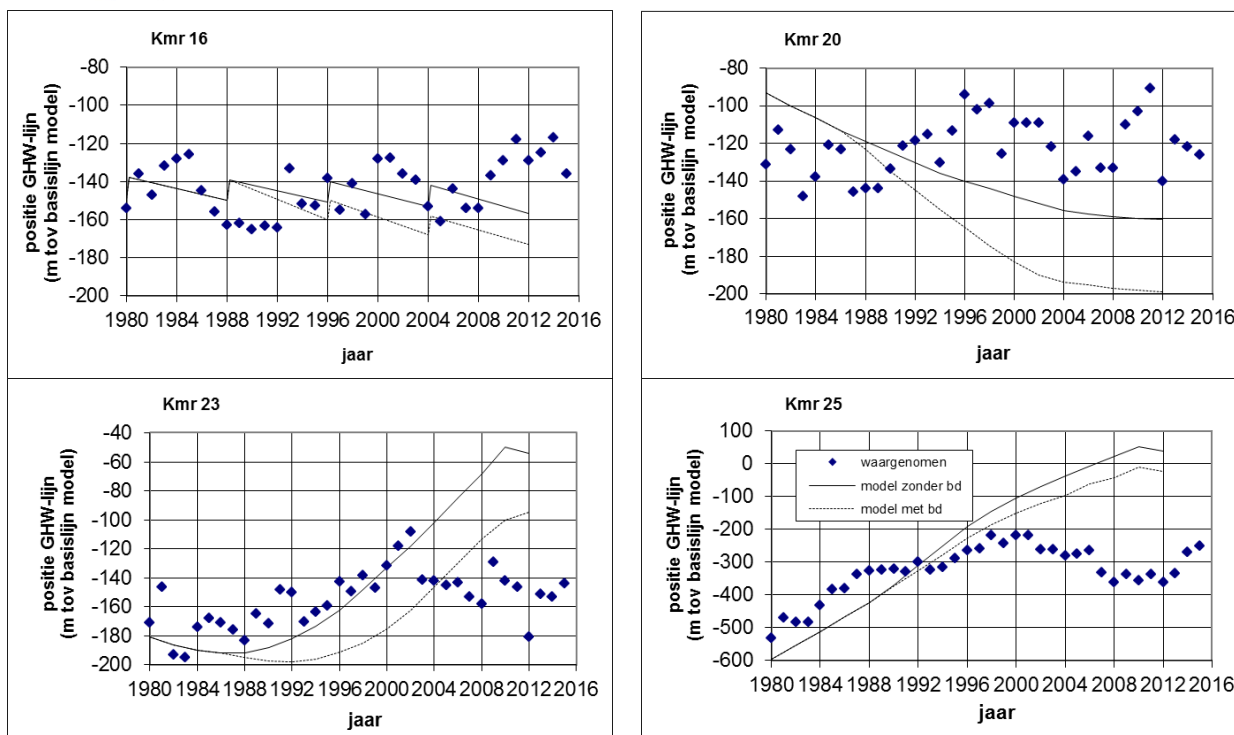
Uit de resultaten van het monitoren van de werkelijke kustveranderingen van de Noordzeekust van Ameland vanaf 1980 blijkt dat in 2010 de kust tussen kmr. 9 en kmr. 25 overal zeewaarts van de kustlijn in 1990 lag (figuur 2.8). In 2010 was er bij kmr. 9 een plaat van het Bornrif met het Noordzeestrand van Ameland verheeld. 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 het algemeen kan worden gesteld dat de kustlijn van 1990 tussen kmr. 9 en kmr. 23 goed wordt gehandhaafd.



Figuur 2.8 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 zeegat en de buitendelta op de kustlijn niet geheel juist konden worden ingeschat. 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 2.9 zijn de berekende en de waargenomen kustontwikkeling ter plaatse van de kilometerraaien 16, 20, 23 en 25 rond de NAM-locatie gegeven.



Figuur 2.9 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 en 2010-2011 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.

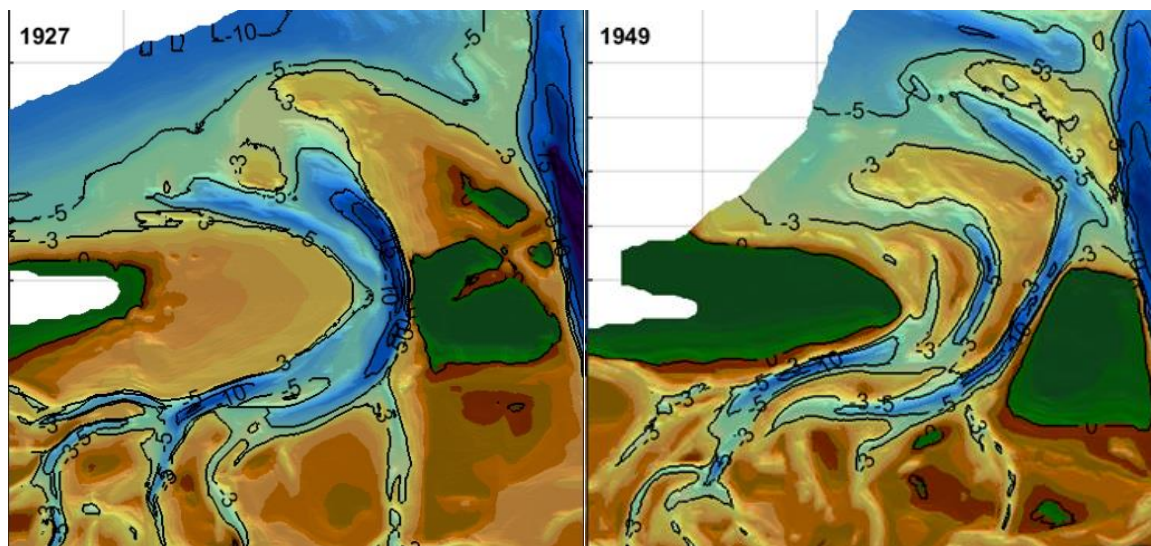
Samenvattend kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- 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 dan 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 steeds meer 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.

2.4 Friesche Zeegat en De Hon

Het Friesche Zeegat is morfologisch een zeer dynamisch gebied. Uit vergelijking van alle lodingskaarten van 1927 t/m 2012 blijkt de sterke dynamiek in het geulgedrag in het zeegat en de vloedkom.

Uit bestudering van deze kaarten in samenhang met het groeien en eroderen van het oostpunt van Ameland (zie figuur 4.15 uit Eysink et al, 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 vloedscharen aan de Noordzeezijde van De Hon, waardoor ook de vloedstroom geen aanval op De Hon deed. De omstandigheden voor groei waren toen dus optimaal.



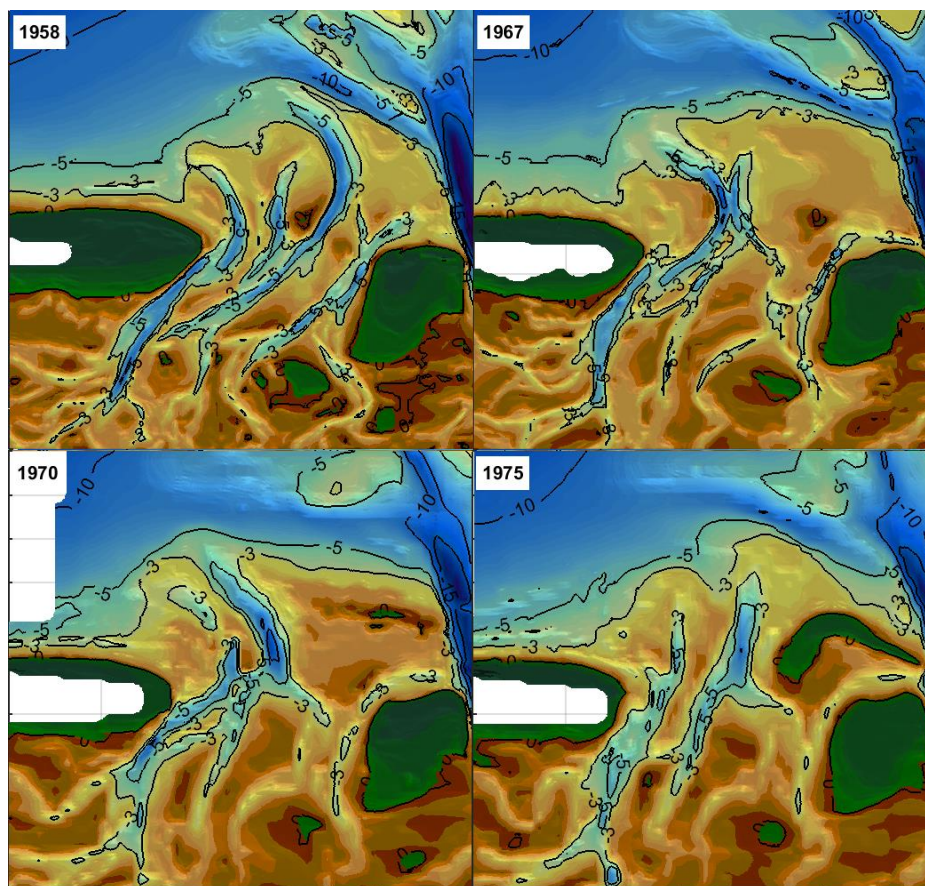
Figuur 2.10 Pinkegat in 1927 en 1949

Rond 1940 - 1950 had De Hon een maximale uitbreiding naar het oosten. 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. Door deze geulontwikkelingen nam De Hon

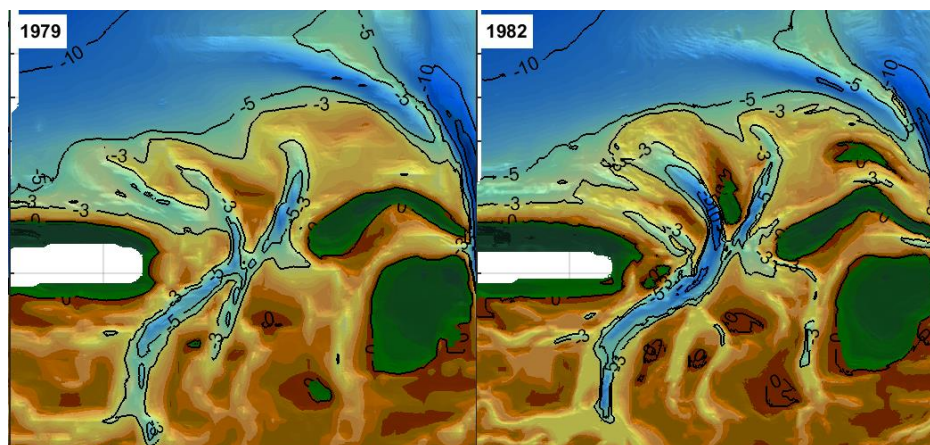


vervolgens tot 1975 - 1980 weer af tot een minimum. In 1975 lag de Holwerderbalg maximaal linksom gedraaid.



Figuur 2.11 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 vloedschaar ontwikkeld die de groei van De Hon nog tegenhield. In die fase had De Hon een lengte van circa 3 km.



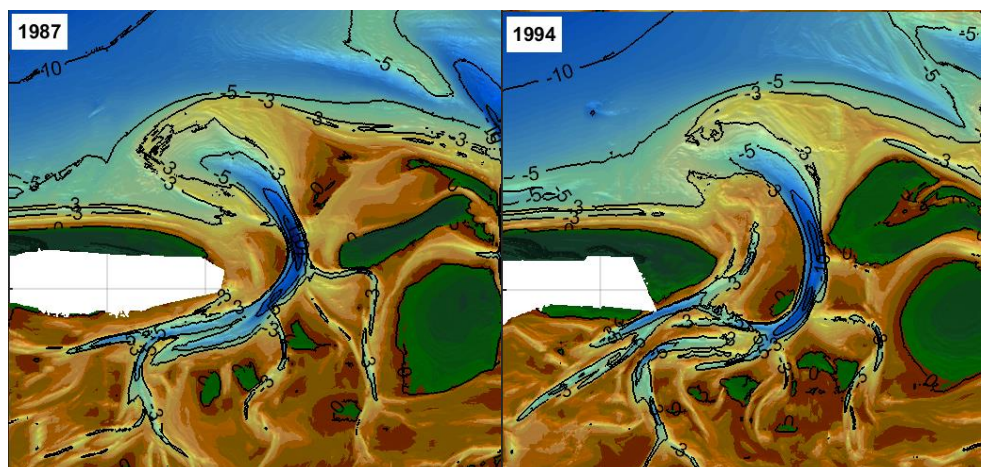
Figuur 2.12 Pinkegat 1979 en 1982

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

Vanaf ongeveer 1986 stagneerde de groei (figuur 2.16) 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.



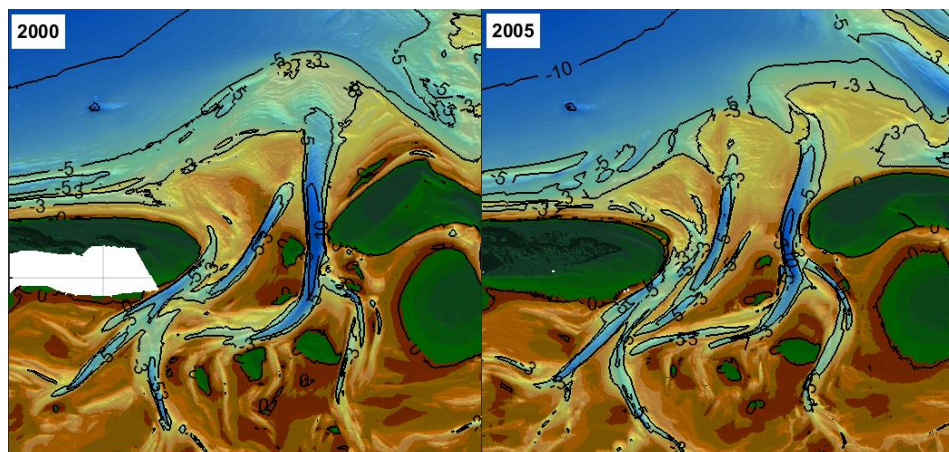
In 1987 was de Holwerderbalg aansluitend op het Pinkegat bijna van west naar oost georiënteerd en stroomde het meeste water via het diepe Pinkegat af naar zee.



Figuur 2.13 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 2.17). 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 1994-2005 sterk ontwikkeld tot een brede en lokaal diepe geul (figuur 2.17).



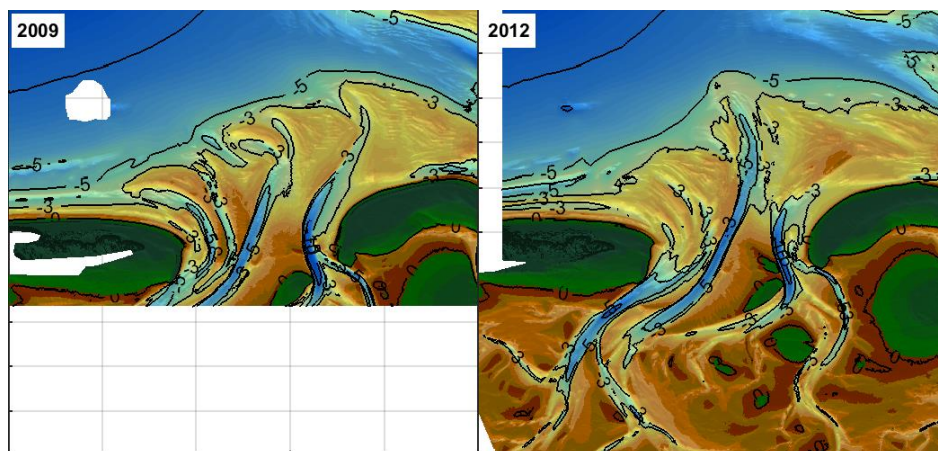
Figuur 2.14 Pinkegat in 2000 en 2005

In 2005 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.



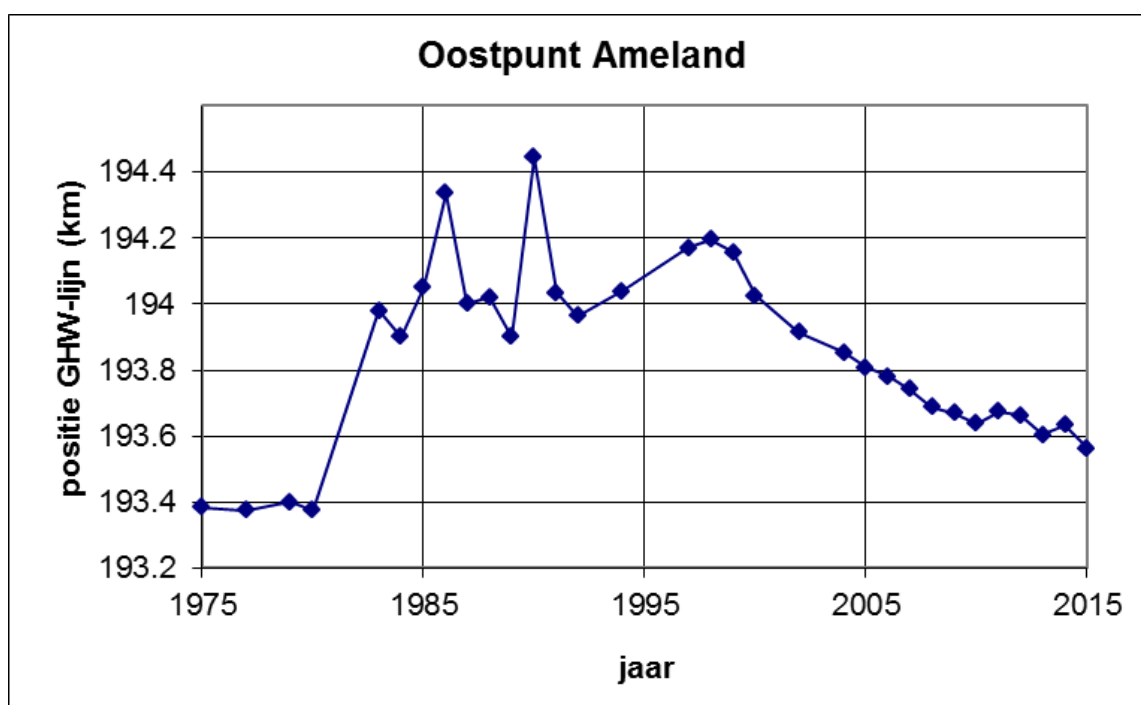
Met de rotatie van de noordwestelijke hoofdtak van de Holwerderbalg in de Waddenzee zijn ook de kleinere geulen op het wad onder De Hon tussen 1994 en 2000 naar het oosten gemigreerd en zijn bovendien in omvang afgenomen. De NAP-lijn ten zuiden van De Hon is in die periode gemiddeld tussen de 50 en 100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



Figuur 2.15 Pinkegat in 2009 en 2012

In 2005 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. De hoofdgeul van de Holwerderbalg heeft in 2012 op de buitendelta de functie van het Pinkegat overgenomen. Het ziet ernaar uit dat het Pinkegat versnelde aan het verdwijnen is (vergelijk 2009 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.

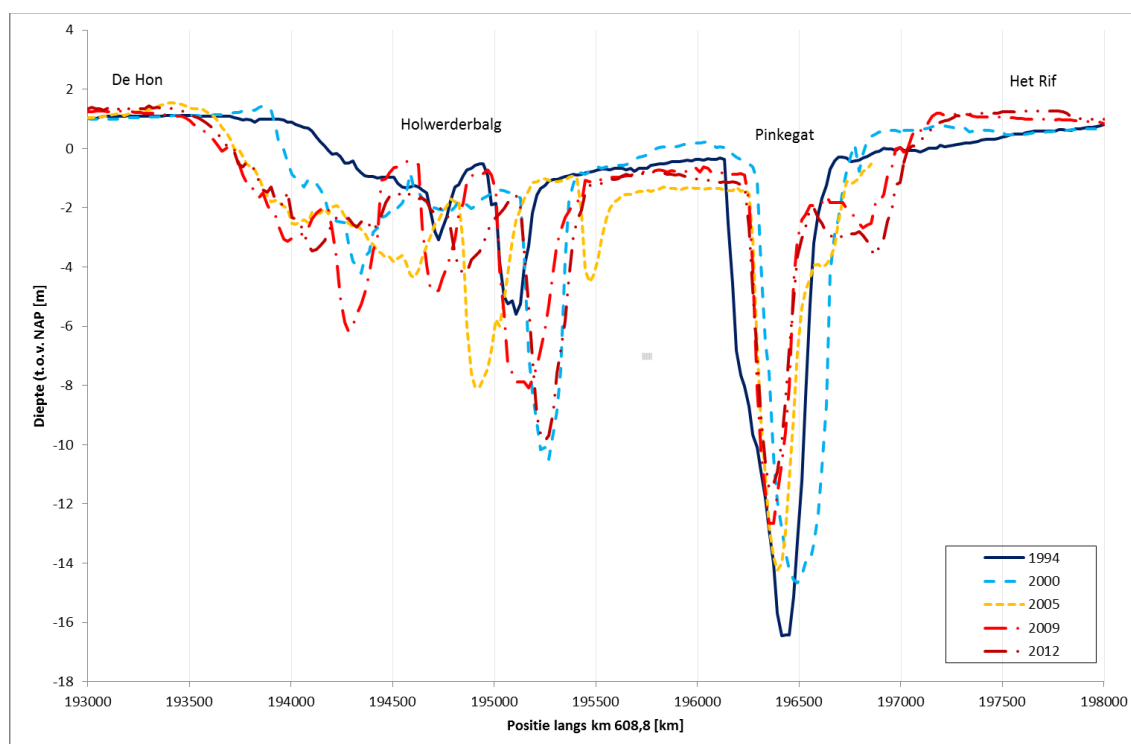
Indien de ontwikkeling van het oostpunt van Ameland zich inderdaad cyclisch gedraagt, zoals bij de voorspelling in Eysink et al (1987) is aangenomen, dan zou vanaf circa 2010 de groei van het oostpunt van Ameland kunnen omslaan in afslag. Het in de werkelijkheid is dit proces, dat voornamelijk wordt gedicteerd door het geulgedrag in en rond het zeegat tussen Ameland en Engelsmanplaat, al in 1999 is 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 2.16 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 et al, 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 (figuur 2.17). Deze laatste toont een forse verschuiving van de laagwaterlijn naar het westen. In 2012 lijkt deze ontwikkeling zich te hebben gestopt en er weer een fase van groei voor het oostpunt van Ameland kan komen als de geulen in het zeegat tot één grote geul zullen ontwikkelen. De ontwikkeling van de positie van het oostpunt van Ameland (figuur 2.16) in de periode 2012-2015 (gebaseerd op Jarkus gegevens) laat de omslag van afslag naar groei nog niet zien.



Figuur 2.17 Ontwikkelingen in het zeegat Holwerderbalg/Pinkegat in de periode 1994 – 2005

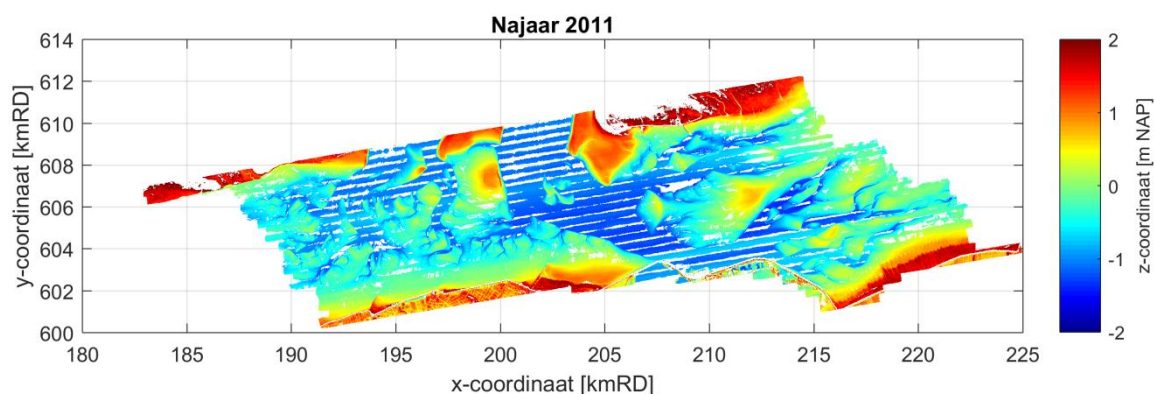
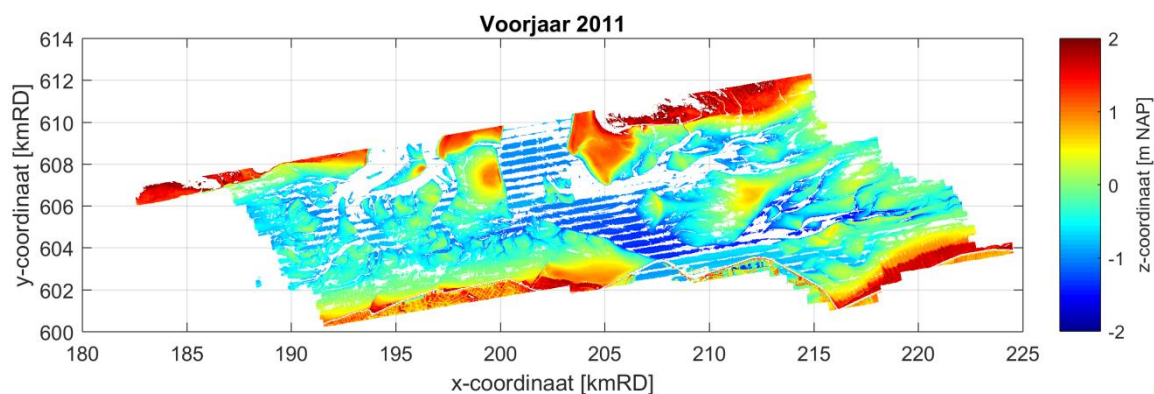
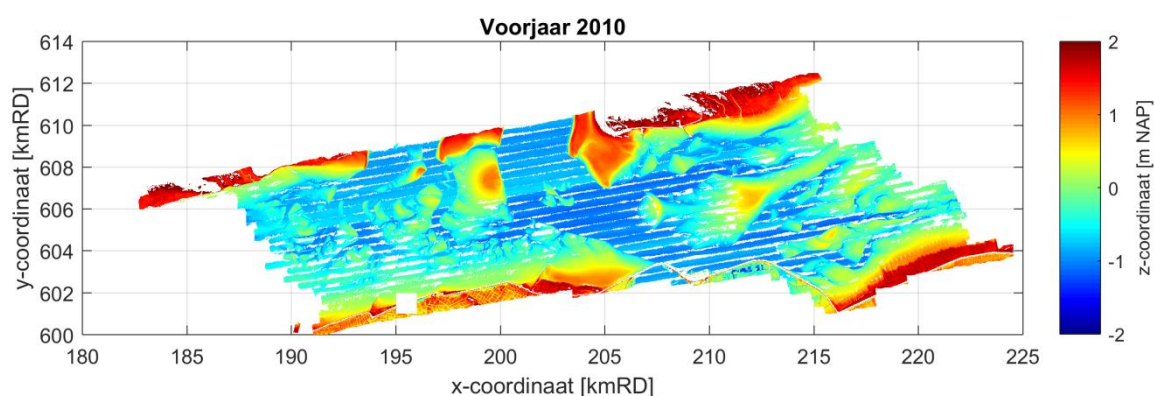
2.5 Waddenzee

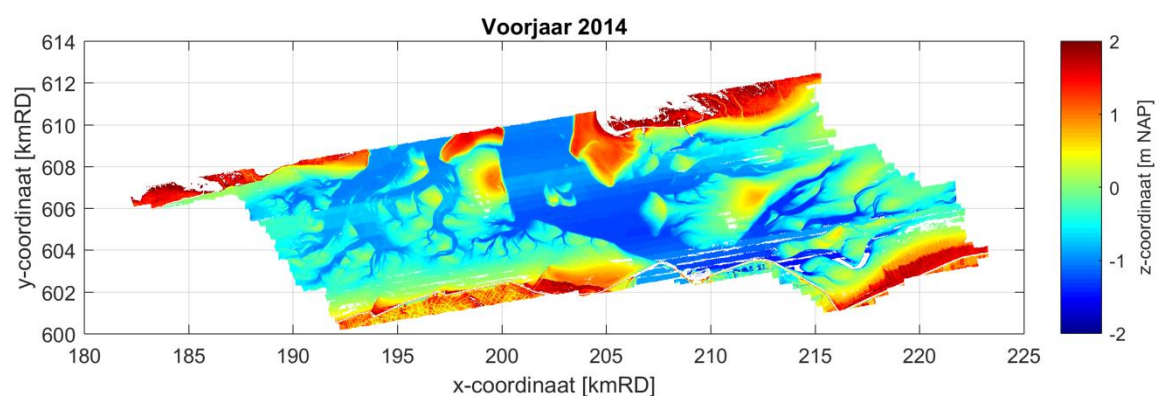
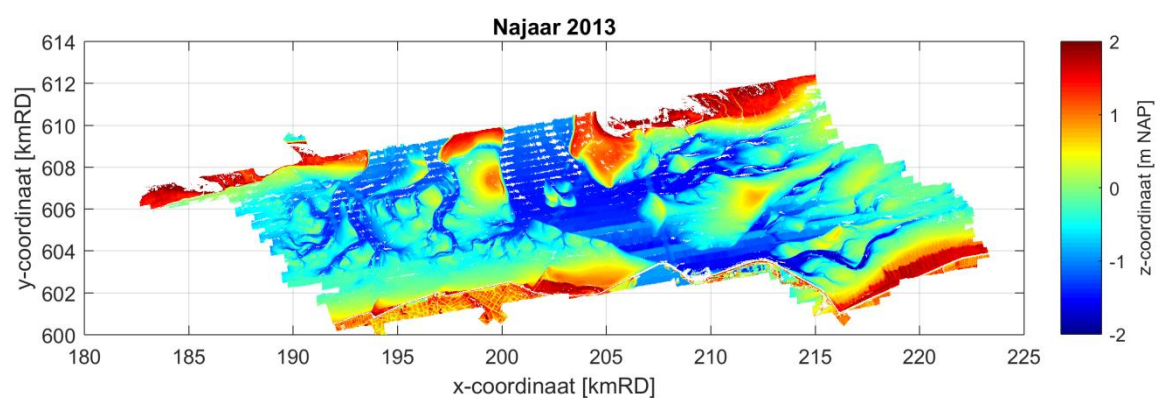
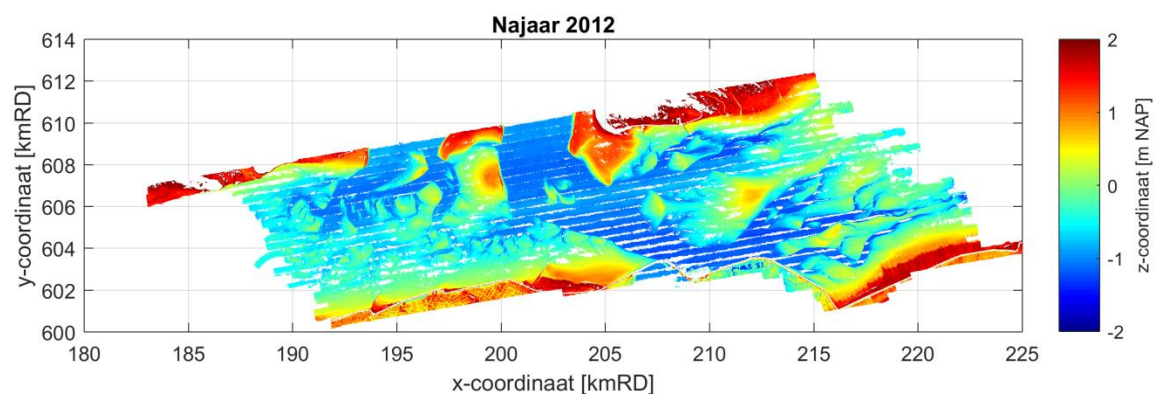
In de vorige rapporten is aangetoond dat het onmogelijk is om compensatie van de bodemdalingsschotel in de Waddenzee door sedimentatie aan te tonen met behulp van de lodingsgegevens. Lokaal lukt dit zeker niet door de grote variaties in bodemniveau als gevolg van de grote dynamiek in het waddensysteem (zie plaatjes van het Pinkegat). 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 (zie figuur 4.18 in Eysink et al, 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 in tabel B.1.4.1 in RIKZ (2004). Daaruit blijkt dat het totale volume van de vloedkom tussen 1987 en 1999 met 212.257 m³ zou zijn afgenomen, ondanks de bodemdaling in die periode die een verruiming van 2 à 2,5 miljoen m³ heeft gegeven. Dit suggereert een overcompensatie van de bodemdaling, wat onlogisch is. De volumevermindering komt overeen met een gemiddelde verondieping van de vloedkom van slechts 4 mm, hetgeen ver binnen de onbetrouwbaarheidsmarge van het loden ligt. De laatste beschikbare Vakloding voor het gebied is uit 2012. Aan de hand daarvan is de totale toename van hoeveelheid sediment in de vloedkom van Pinkegat bepaald op 1,96 miljoen m³ ondanks de bodemdaling voor de periode 2006-2012. Dit komt

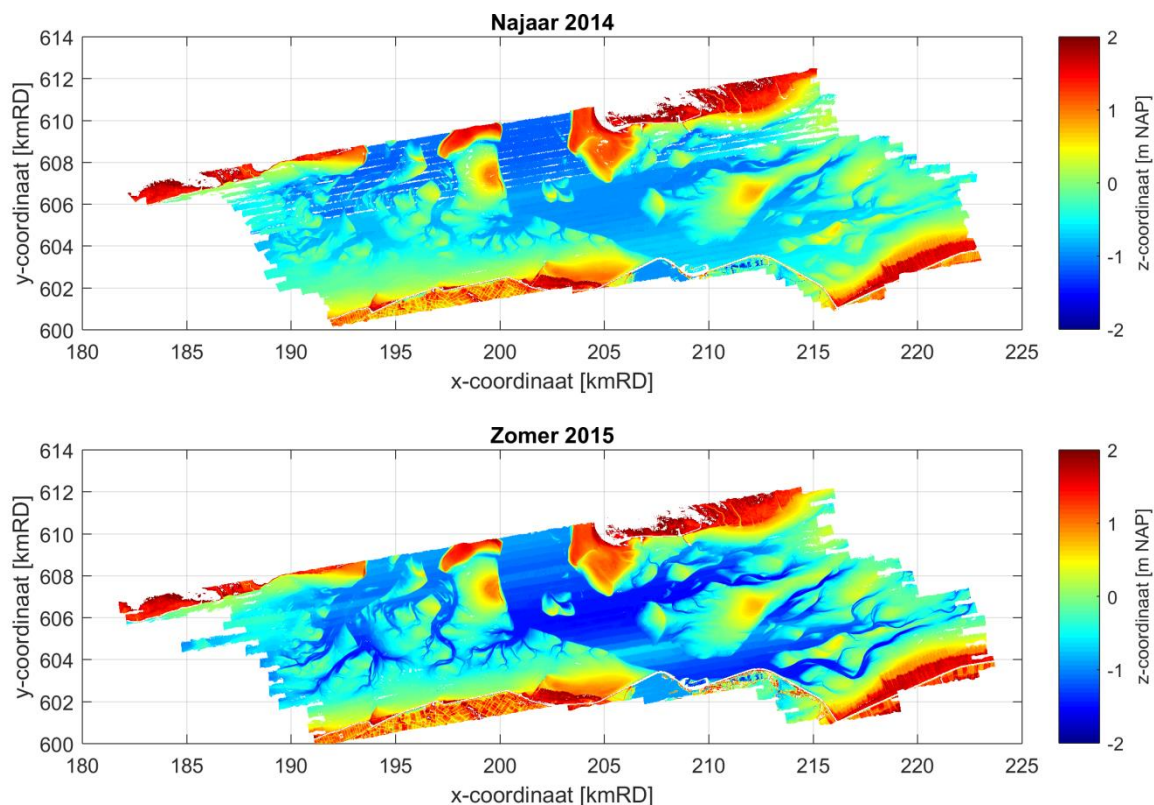


overeen met ruim 3 cm gemiddeld over het bekken, hetgeen nog steeds binnen de onbetrouwbaarheidsmarge van het loden ligt.

Het belangrijkste waddegebied dat door bodemdaling zal verlagen ligt op het Pinkewad direct onder de Hon, de Oerderduinen en het Neerlands Reid. 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 2.6.

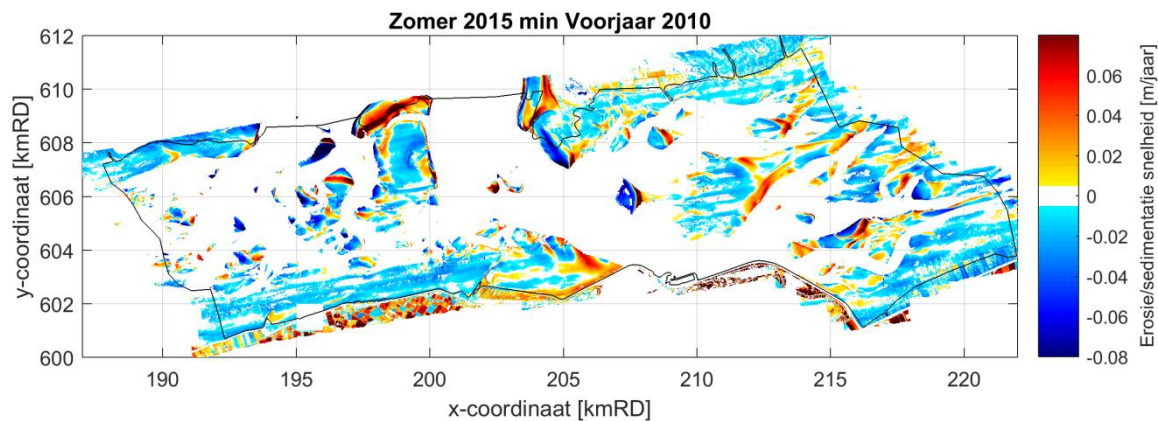


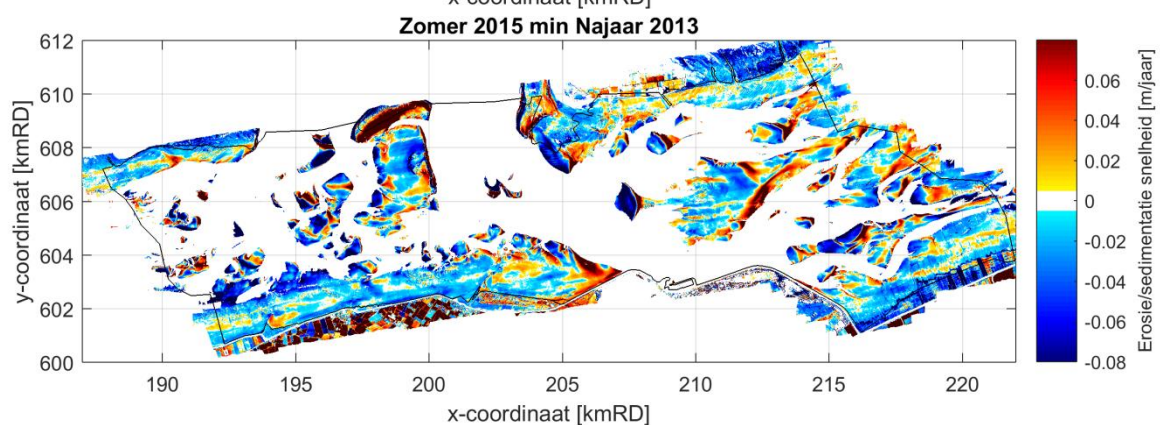
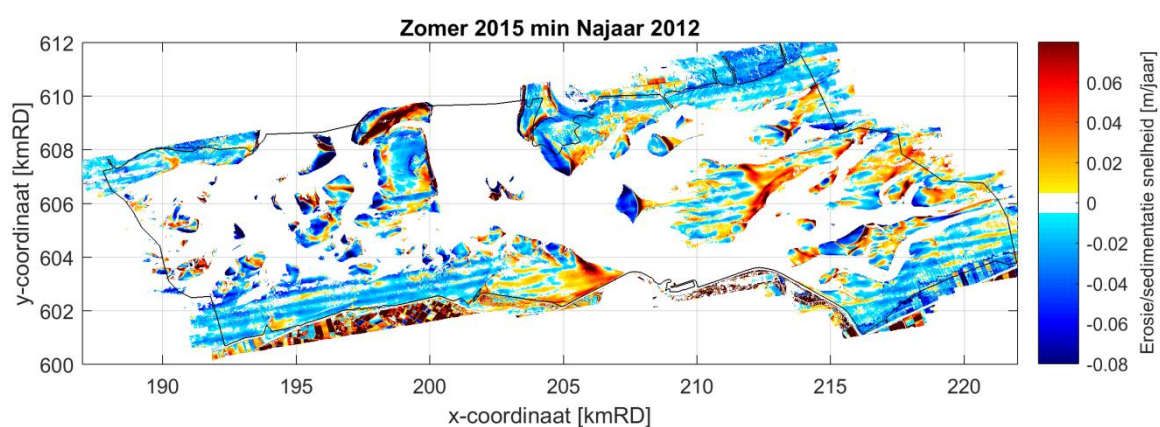
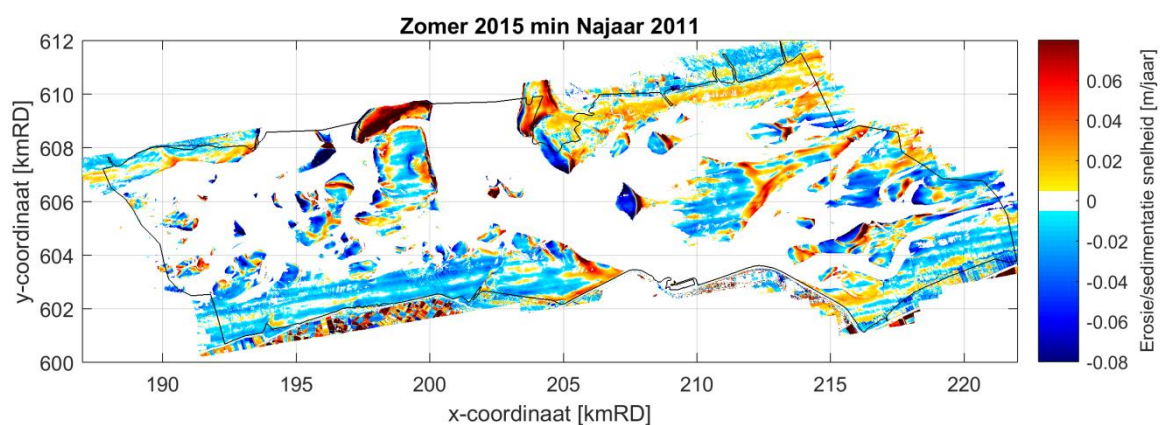
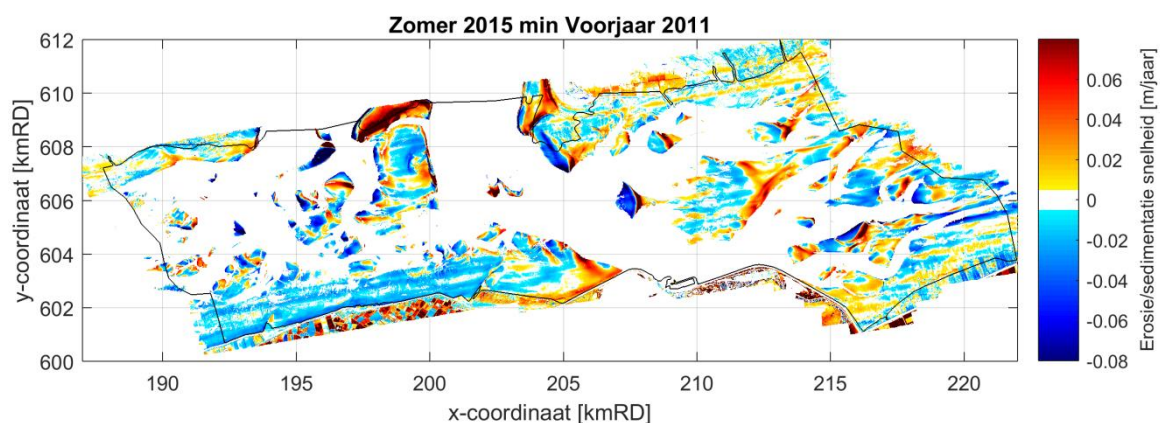


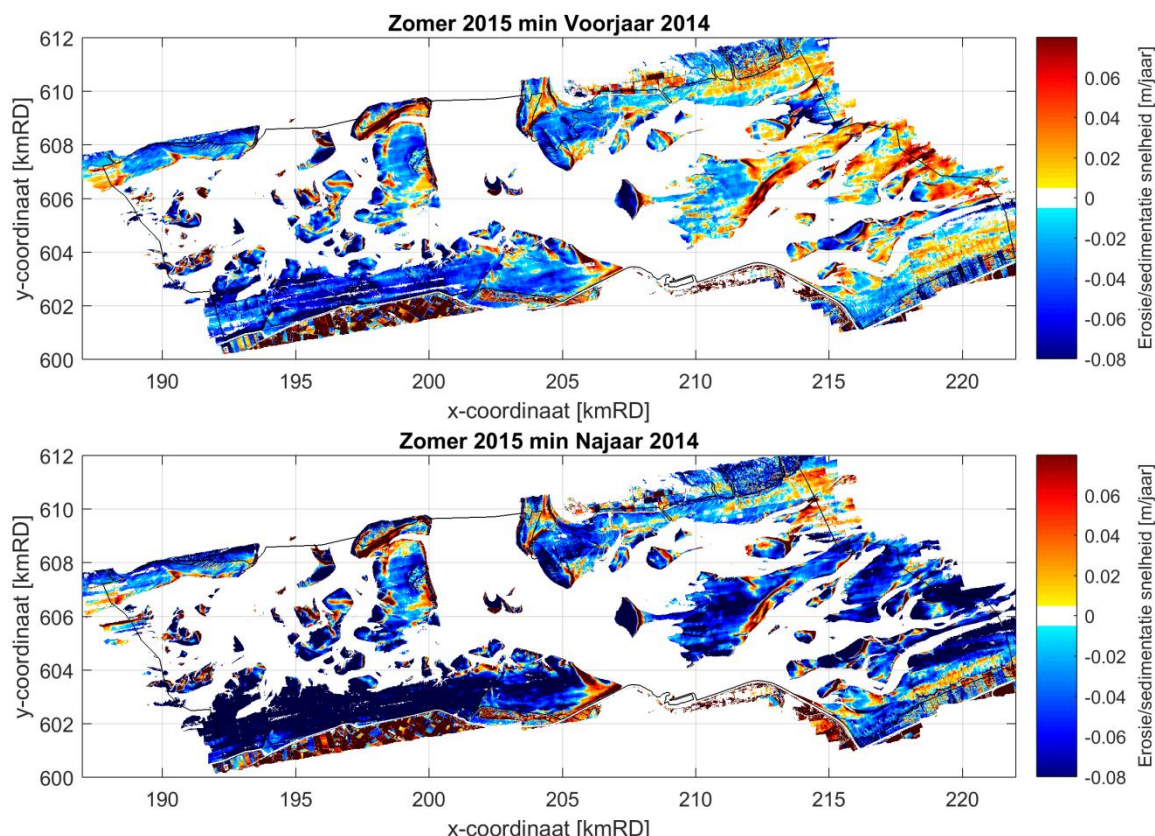


Figuur 2.18 Visualisatie van alle LiDAR opnames (april 2010 t/m juli 2015) op een 10m x 10m grid.

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 zomer 2015 zijn er acht opnames gedaan en geanalyseerd (Wang e.a., 2010; Cronin en Wang, 2012; Elias e.a., 2013; Arentz en Vroom, 2014; Vroom en Beekhuizen, Schrijvershof en Vroom, 2015). De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in figuur 2.18

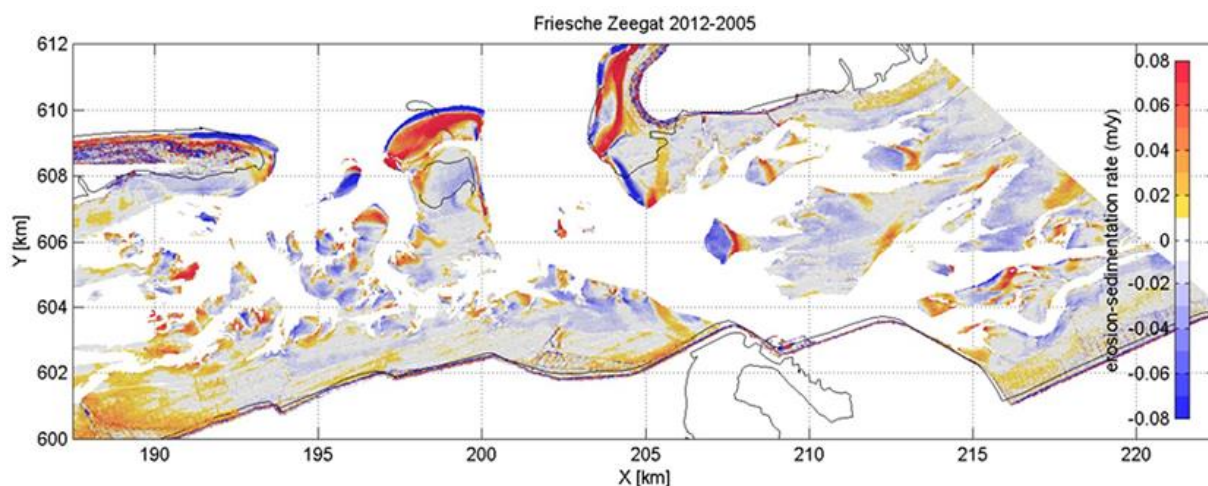






Figuur 2.19 Erosie/sedimentatiesnelheden in meter per jaar van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m september 2015) ten opzichte van de LiDAR opname van juli 2015.

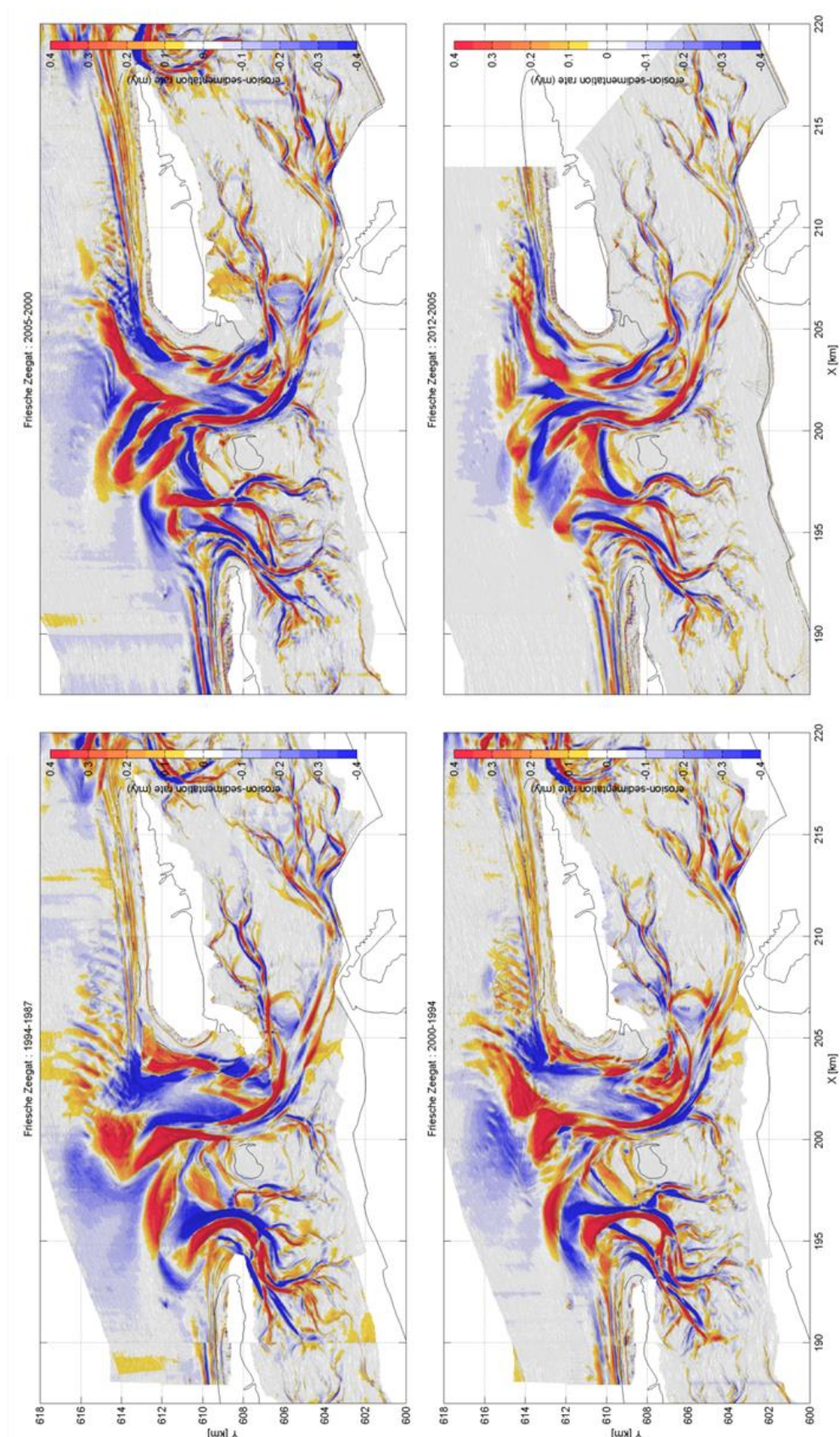
Figuur 2.19 laat de verschillen tussen de bodemhoogtes afgeleid uit de verschillende lidar opnames zien. Het verschil tussen de zomer 2015 opname en elk andere opname is vertaald naar een snelheid (m/jaar) van bodemniveauverandering. Volgens de gegevens vallen de veranderingen op de platen (sedimentatie en erosie) in een jaar vaak binnen enkele centimeters. Het valt verder op dat de absolute waarde van deze snelheid groter wordt naar mate het tijdsinterval tussen de twee metingen kleiner wordt. Dit komt voornamelijk door dat de 2015 opname gemiddeld lager liggen dan alle andere opnames die onderling gemiddeld minder van elkaar verschillen. Deze constatering roept de vraag op of de gemeten verlaging in 2015 een werkelijke verandering betreft. Momenteel is er nog discussie gaande over de kwaliteit van de metingen. Duidelijk is dat de kwaliteit van de verschillende opnames niet dezelfde is. Door het gebruik van een andere scanner en door de kleinere afstanden tussen de vliegbanen is de kwaliteit van de recentere (2014 en 2015) opnames beter dan de eerdere opnames bijv. qua gebiedsdekking. Ook vertonen de verschillen tussen de recentere metingen minder patronen van vliegbanen dan de eerdere metingen. Maar ondanks de kwaliteitsverbetering in de tijd lijkt het er nog steeds op dat de theoretische nauwkeurigheid van de metingen in de praktijk moeilijk te halen is. Zo vermoedt men dat er tijdens de metingen van najaar 2014 te veel water op de wadplaat, vooral in het zuidelijke deel van de vloedkom Pinkegat is geweest. Daardoor was het toen gemeten bodemniveau te hoog. Blijkbaar spelen de weeromstandigheden tijdens de metingen een belangrijke rol. Verder is er ook twijfels over de GCP correcties bij de 2015 metingen. Er zijn vermoedens dat de gemeten verlaging t.o.v. de eerdere opnames een gevolg kan zijn van een fout in deze correctie. Al met al lijkt het nu nog te vroeg om conclusies te trekken uit de dataset afgeleid van de lidar opnames.



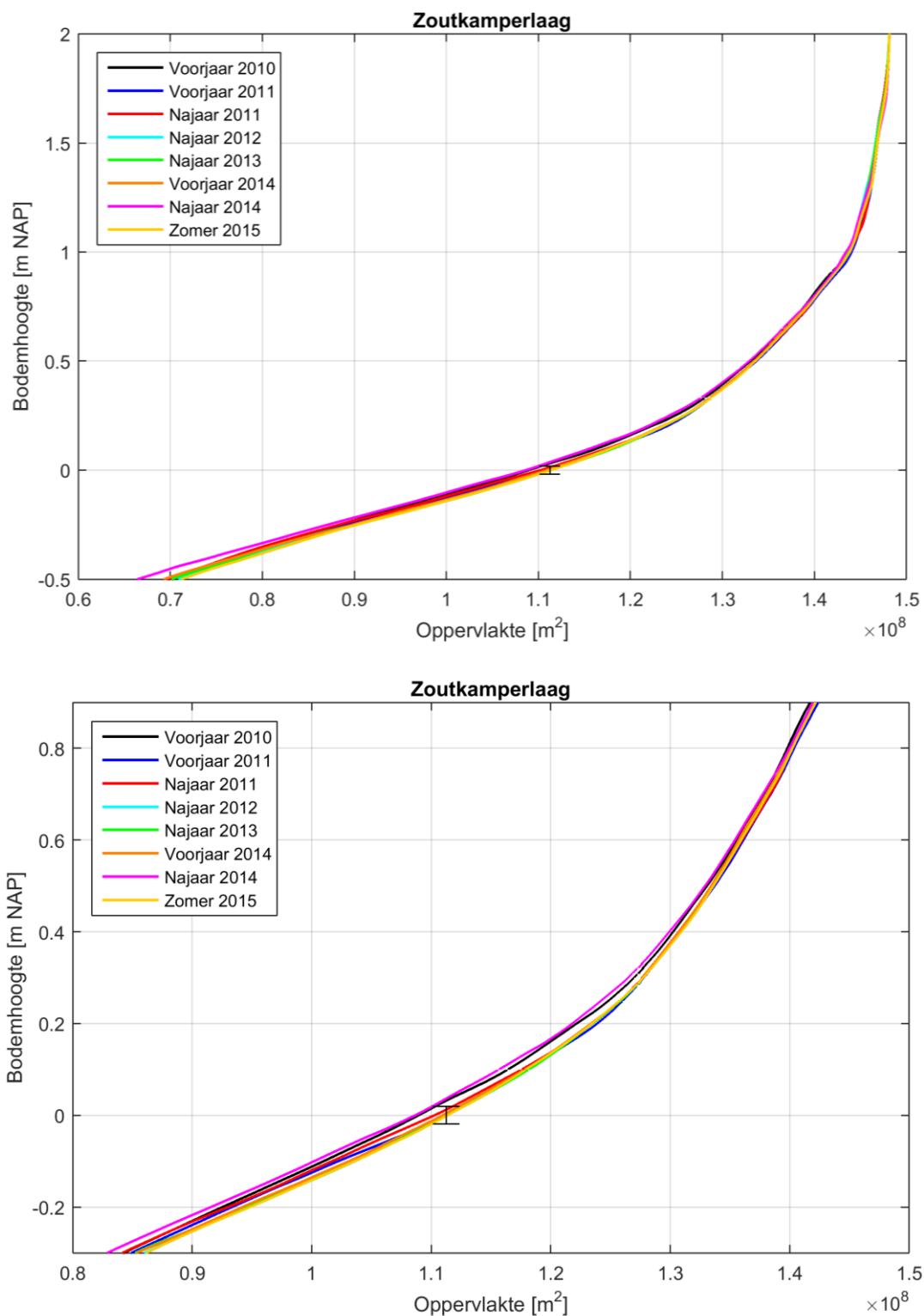
Figuur 2.20 Erosie/sedimentatiesnelheden afgeleid van de vaklodingen data van 2012 ten opzichte van 2005.

De snelheden van sedimentatie-erosie kunnen ook worden afgeleid uit de verschillende vaklodingen die gemiddeld iedere zes jaar worden gemeten. Het beeld van de veranderingen wordt gedomineerd door veranderingen (vooral migratie) van de geulen (figuur 2.21). Ook als wij op de platen inzoomen (figuur 2.20), lijkt de patroon van de veranderingen anders dan afgeleid van de lidar metingen.

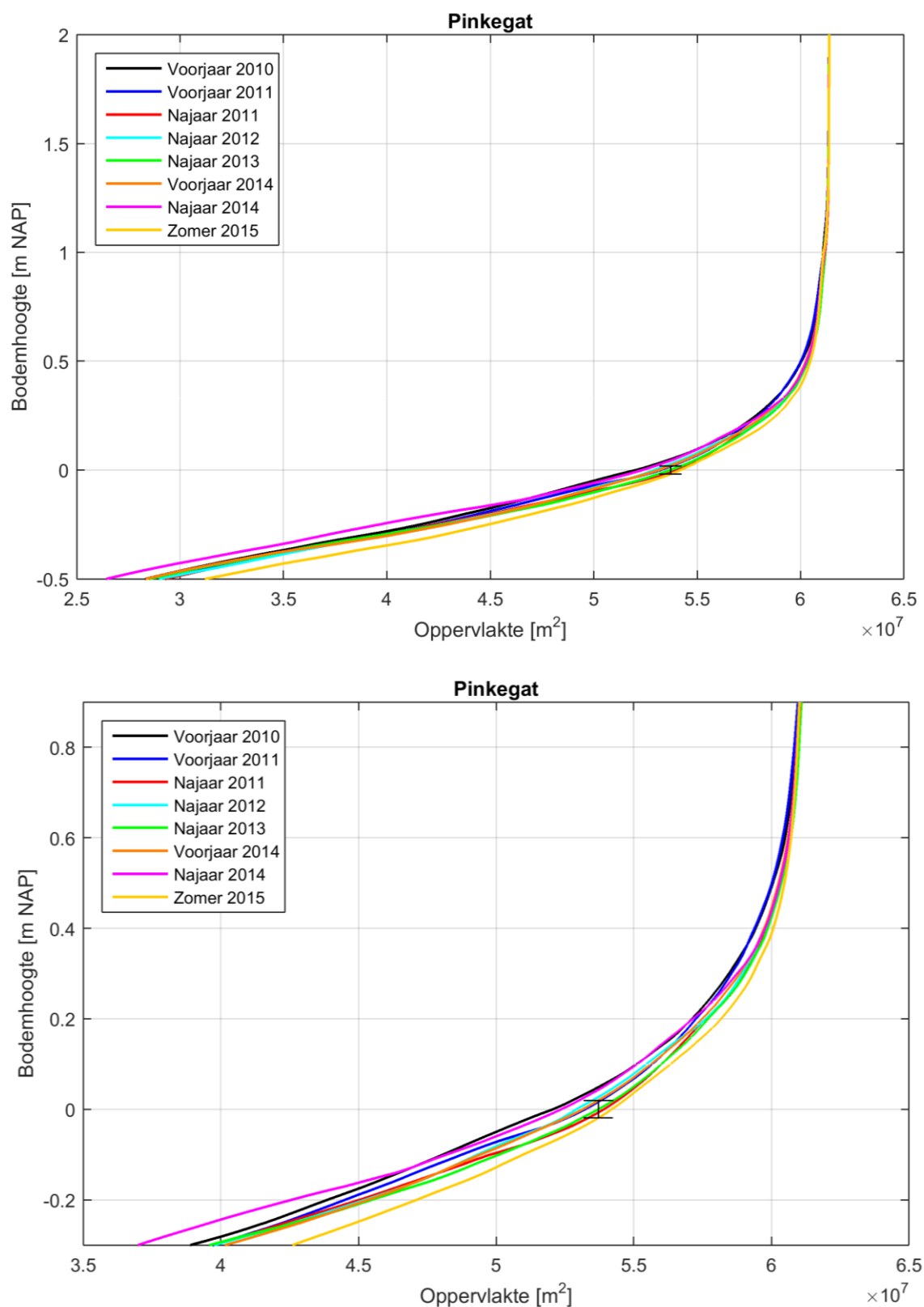
De metingen kunnen ook worden gebruikt om de hypsometrie van bijvoorbeeld een vloedkom te bepalen (figuur 2.22 en 2.23), waaruit areaal van gebied in een bepaalde hoogteklaas kan worden afgeleid (figuur 2.24 en 2.25). Merk op dat alleen de informatie boven een bepaalde hoogte is betrouwbaar (dit is geschat als boven NAP-0,5 m). Gezien de verschillende problemen met de dataset kunnen wij nu nog geen conclusies trekken uit deze resultaten.



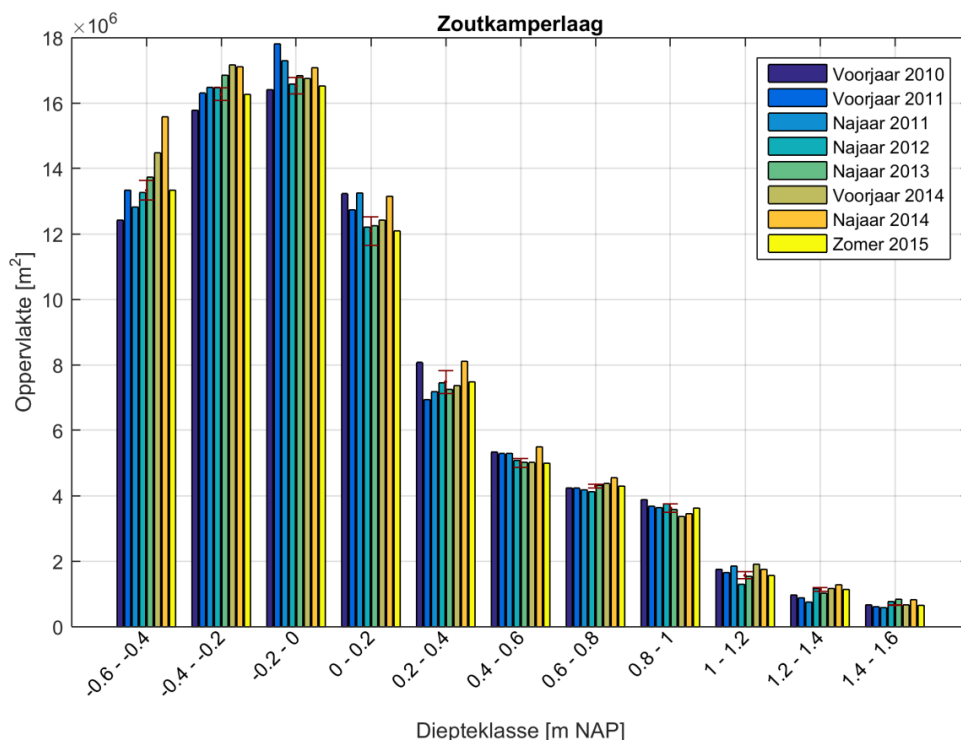
Figuur 2.21 Gemeten sedimentatie-erosiesnelheden (m/jaar) gebaseerd op de vaklodingen over de periode 1987-2012.



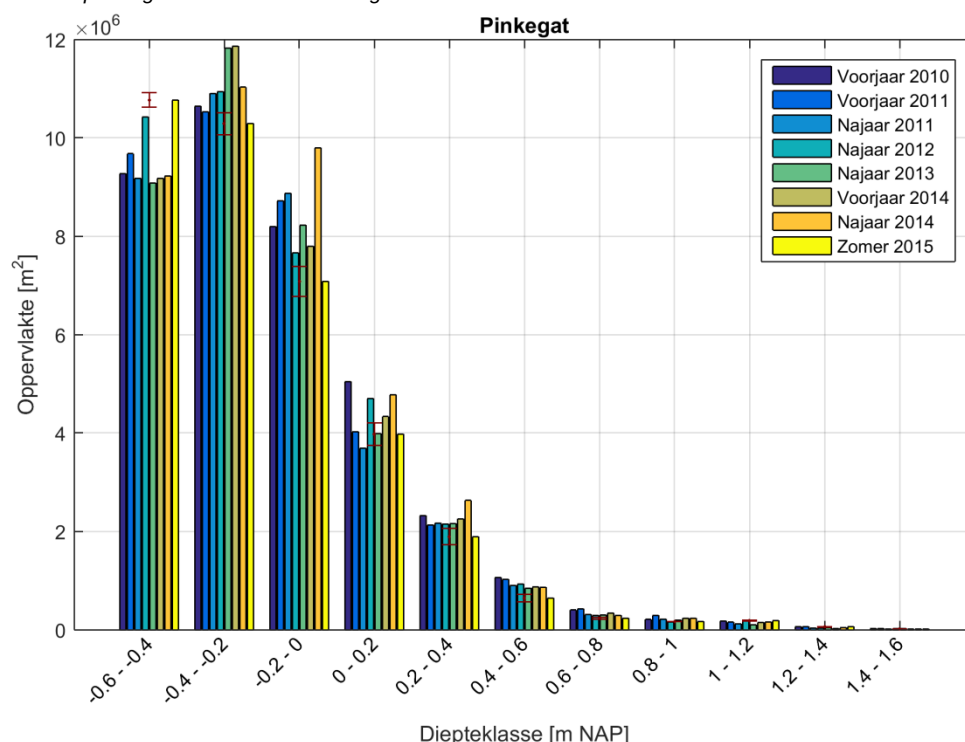
Figuur 2.22 Hypsometrische curves voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag voor alle LiDAR opnames voor het gehele hoogtebereik (boven) en ingezoomd (onder). De meetfout van 3,8 cm is weergegeven met een errorbar.



Figuur 2.23 Hypsometrische curves voor het kombergingsgebied Pinkegat voor alle LiDAR opnames voor het gehele hoogtebereik (boven) en ingezoomd (onder). De meetfout van 3,8 cm is weergegeven met een errorbar.



Figuur 2.24 Histogram van de oppervlaktes per diepteklasse voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De bruine foutenbalk geeft de fout voor de zomer van 2015 aan.



Figuur 2.25 Histogram van de oppervlaktes per diepteklasse voor het kombergingsgebied Pinkegat. De bruine foutenbalk geeft de fout voor de zomer van 2015 aan.

2.6 Wadplaat sedimentatie bij Ameland 2000-2016

2.6.1 Inleiding

Ten gevolge van aardgaswinning onder Oost-Ameland vindt sinds 1986 diepe daling plaats in het nabijgelegen deel van de Waddenzee (Ketelaar, in de Vlas, 2011. Piening, dit rapport). 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 waddengebied ten zuiden van Oost-Ameland wordt de sedimentatie aan het wadoppervlak sinds 2000 gemeten (figuur 2.32). In 2006 is een waddengebied ten zuiden van West-Ameland aan het meetprogramma toegevoegd als referentiegebied zonder bodemdaling (figuur 2.33).

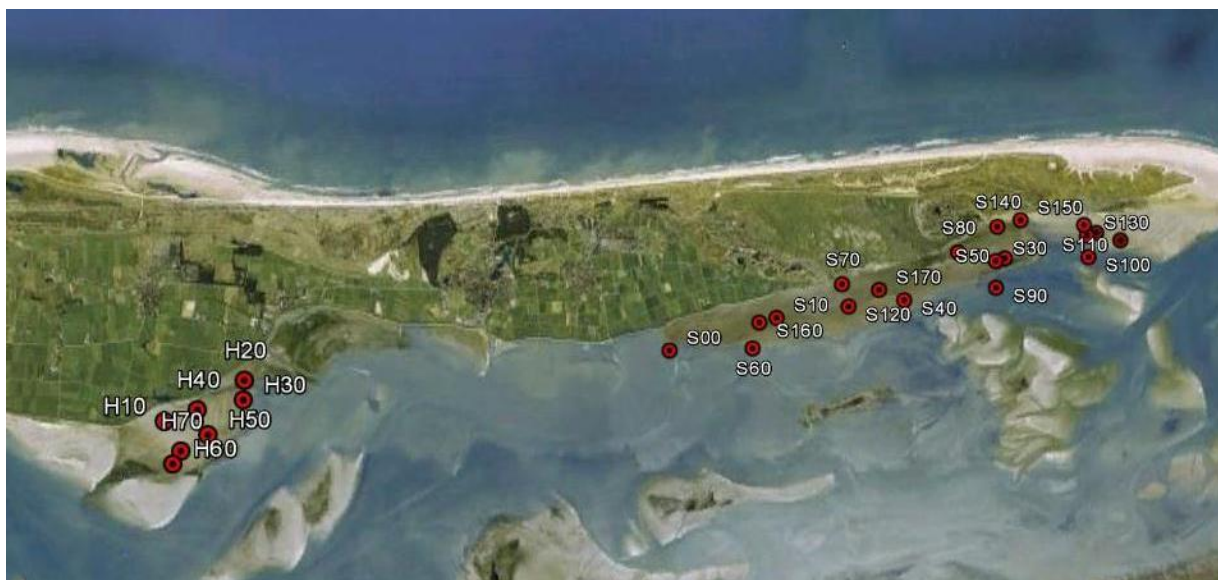
In dit onderzoek blijkt het mogelijk om na een reeks van 16 meetjaren een goede indicatie te kunnen geven van lokale dynamiek en het effect van diepe daling op de sedimentatie van een groot wadplaatgebied van ongeveer 6 km lengte langs de kust van Oost-Ameland.

De berekende daling van de ondergrond (sinds 1986) in het onderzoeksgebied varieert van ruim 30 cm bij de kustlijn van Het Oerd tot ruim 2 cm op het wad ten zuiden van Buren (tabel 2.3).

Indien het plaatgebied waarin de meetstations liggen als geheel wordt genomen is er slechts bij 2 stations sprake van enige erosie in de periode 2000-2016 en is er sprake van een gemiddelde sedimentatie van 6,2 mm/jaar. Maar vanwege de diepe daling blijft daar netto gemiddeld 2,8 mm/jaar van over. In het gebied bij West-Ameland is geen bodemdaling en daar wordt een gemiddelde sedimentatie gemeten van 7,1 mm/jaar, wat overeenkomt met Oost-Ameland.

Slechts in een smalle strook van ongeveer 2 km lengte vlak langs de kust bij Het Oerd, waar de bodemdaling maximaal is, is de sedimentatie onvoldoende om de bodemdaling volledig te compenseren. De netto maaiveldverlaging bedraagt daar ongeveer 5 mm/j (paragraaf 2.6.4.6). Bij Oost-Ameland wordt erosie gemeten aan de rand van de wadplaat op de overgang naar de eerste geul die het onderzoeksgebied op ongeveer een km afstand van Ameland begrenst (paragraaf 2.6.4.6) maar dit betreft slechts 1 meetstation zodat hier niet al te veel zeggingskracht aan gekoppeld kan worden.

2.6.2 Materiaal en methode



Figuur 2.26 Een overzicht van beide onderzoeksgebieden ten zuiden van Ameland met de meetstations op een luchtfoto (Google) 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 2.27). Een meetstation op het wad bestaat uit 4 grondankers (figuur 2.29) 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 2.31) 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 2.29) en in de loop van de tijd te blijven meten of dit systeem waterpas blijft (figuur 2.30). 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.

Aankankelijk 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 2.31) 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.

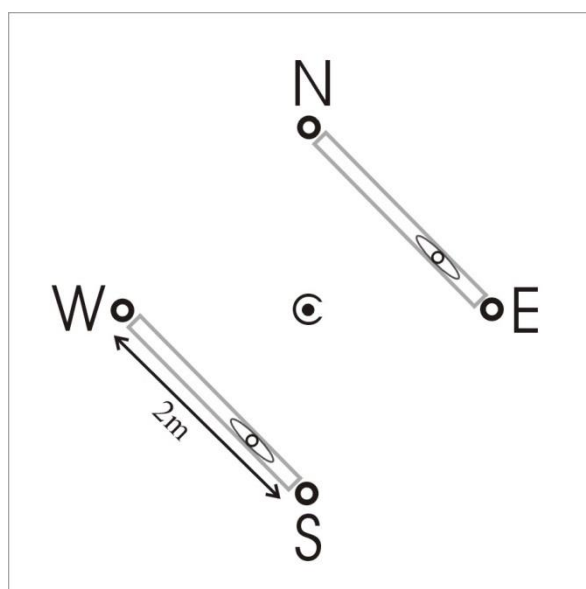
Indien een gebied erg dynamisch is en er over een periode van enkele maanden niveauveranderingen in een grootteorde van een decimeter plaatsvinden raken de meetringen en touwtjes snel onvindbaar, in een dergelijk gebied kunnen beter andere methodes worden ingezet om sedimentatie/erosie te volgen in de tijd. In het onderzoeksgebied Oost-Ameland is per meetlocatie (S00 tm 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.



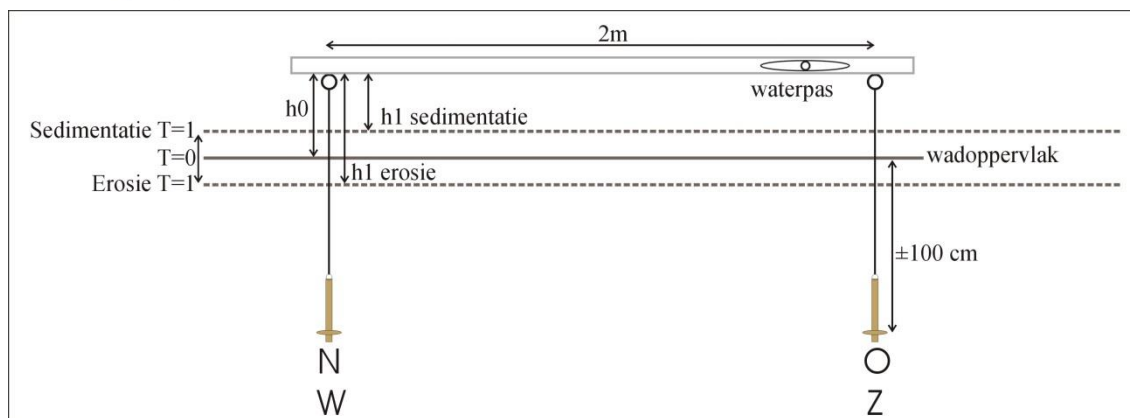
Figuur 2.27 Eigenbouw grondanker waaraan niet rekkend meettouw bevestigd wordt. Rechts de dop aan het uiteinde van de T-grondboor waarmee het anker in de bodem geschroefd wordt (figuur 2.28).



Figuur 2.28 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 2.29 Verticale aanblik van een meetstation met 4 grondankers (noord, oost, zuid, west). Per tweetal (N-E en W-S) zijn de meetringen aan de bovengrondse dyneema lijnen waterpas gezet als check op nazakking.



Figuur 2.30 Horizontale aanblik van een meetstation en prinseschema van de meetmethode om wadsedimentatie te monitoren. Indien na verloop van tijd een langere afstand tussen meetring 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 2.31 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..

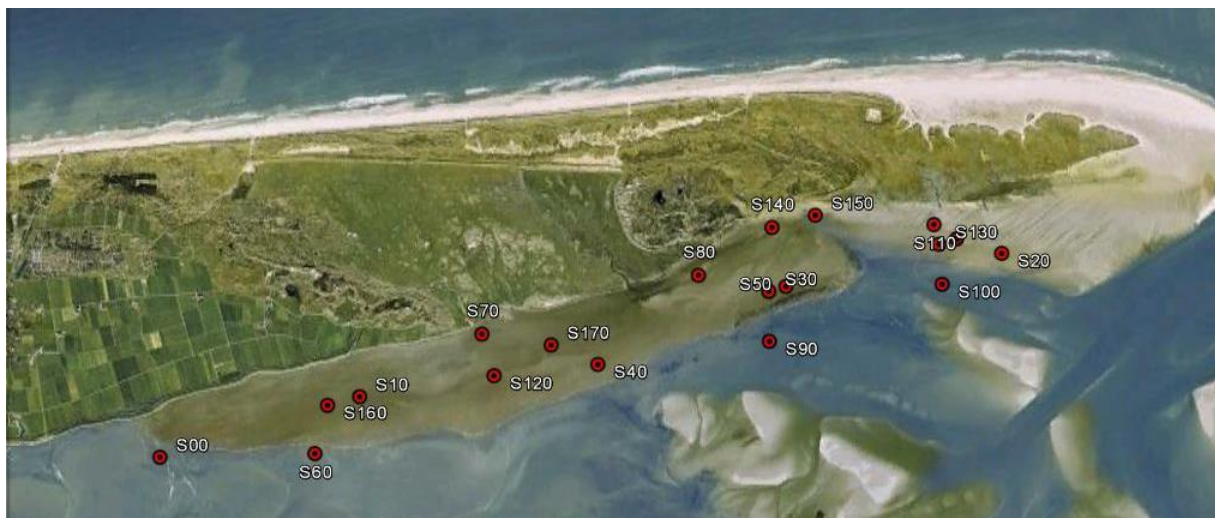
2.6.3 Onderzoeksgebieden en meetstations

2.6.3.1 Oost-Ameland

De eerste metingen zijn in 2000 begonnen in het bodemdalingsgebied ten zuiden van Oost-Ameland (Kersten 2002; Tabel 1). Vanaf 2004 zijn hier 16 meetstations ingericht 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. Alleen de stations S90 en S100 liggen aan de rand van de plaat op de overgang naar een ondiepe geul. De diepe ondergrond in het onderzoeksgebied is sinds 1986 tot 2014 30,5 cm (S150) tot 2,2 cm (S00) gedaald volgens berekening met het NAM-model Ameland_GRIDS_2014 (Piening, dit hoofdstuk). Het meetstation S100 is in 2009 door geulvorming verloren gegaan. In 2011 zijn er drie nieuwe stations (S160 tm S180) tussengevoegd en deze bestaan ieder uit 4 grondankers (figuur 2.32). In tabel 2.3 staan ook de hoogten van de wadplaat bij de meetstations. Deze zijn in 2013 ingemeten met een RTK/DGPS ontvanger waarbij de meetfout maximaal 20 mm bedraagt.



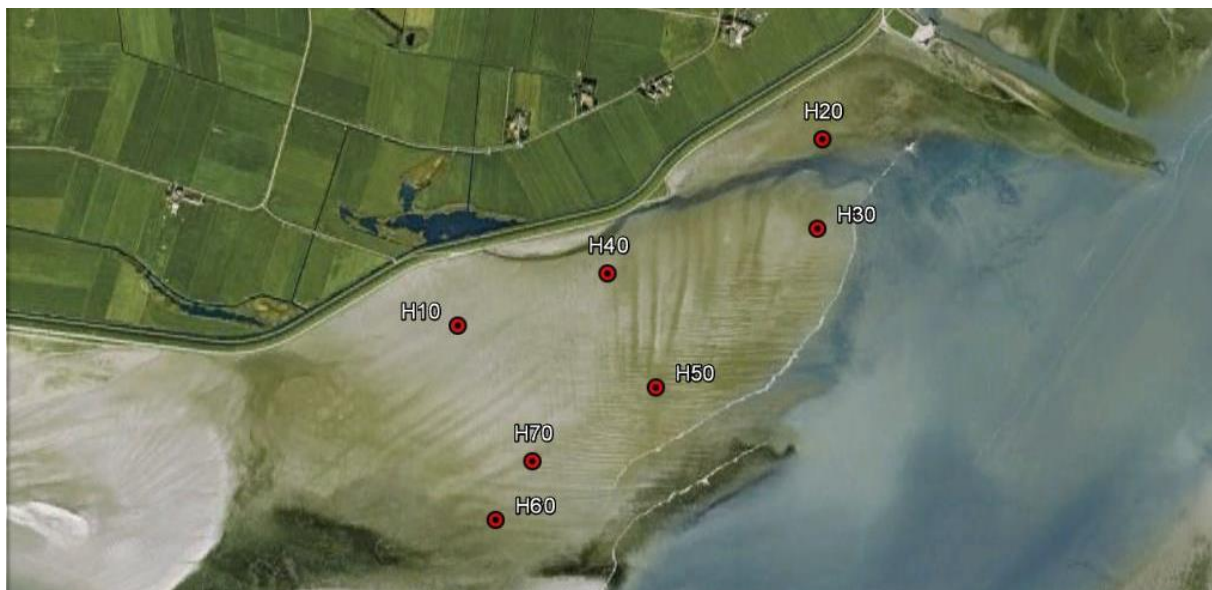
Figuur 2.32 Luchtfoto (Google) met 19 meetstations bij Oost-Ameland ingetekend.

Tabel 2.3 Coördinaten en hoogteligging van meetstations Oost-Ameland.

Station	X	Y	Datum plaatsing	NAP (m) aug 2013
S00	183915	605684	30-7-2000	-0,374
S10	185751	606260	8-8-2000	0,012
S20	191644	607626	11-8-2000	0,141
S30	189516	607256	11-8-2000	-0,070
S40	187941	606574	11-8-2000	-0,304
S50	189670	607305	6-3-2001	0,036
S60	185350	605743	27-3-2002	-0,320
S70	186873	606850	27-3-2002	0,076
S80	188863	607400	27-3-2002	0,104
S90	189523	606795	27-3-2002	-0,750
S100	191102	607337	27-3-2002	-0,786
S110	191027	607886	27-3-2002	0,301
S120	186990	606467	20-3-2003	-0,028
S130	191065	607710	20-3-2003	0,044
S140	189534	607843	1-3-2004	0,355
S150	189931	607967	1-3-2004	0,238
S160	185456	606177	7-11-11	-0,088
S170	187510	606750	7-11-11	0,004
S180	191233	607756	7-11-11	0,005

2.6.3.2 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 2.33 Luchtfoto (Google) met 7 meetstations bij West-Ameland ingetekend.

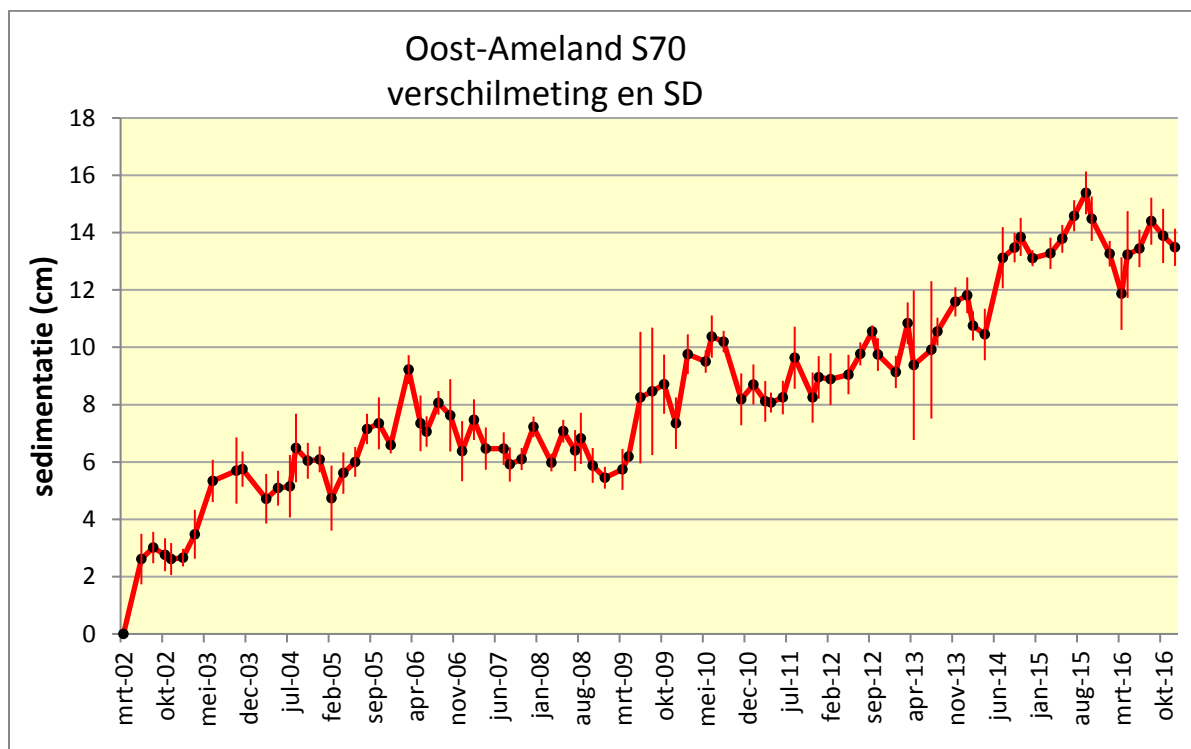
Tabel 2.4 Coördinaten en hoogteligging van meetstations West-Ameland.

Station	X	Y	Datum plaatsing	NAP (m) mei 2013
H10	175248	604416	4-09-06	0,496
H20	176617	605128	4-09-06	0,064
H30	176601	604792	4-09-06	0,076
H40	175811	604617	4-09-06	0,443
H50	175997	604190	4-09-06	0,067
H60	175397	603687	4-09-06	0,066
H70	175539	603906	28-2-12	0,228

2.6.4 Resultaten Oost-Ameland

2.6.4.1 Uitwerking per meetstation

Voor de berekeningen van de verandering ten opzichte van het meetbegin zijn per meetstation alle metingen aan 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 vind middeling over de wel beschikbare grondankers plaats. Een voorbeeld van een meetreeks staat in figuur 2.34. 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 2.34 Meetreeks van meetstation S70 in het onderzoeksgebied Oost-Ameland.

2.6.4.2 Bodemdaling wadplaten Oost-Ameland

De bodemdaling schotel strekt zich uit onder het wad ten zuiden van Ameland (hoofdstuk 1, paragraaf 1.3.2). De afstand van de meetstations op het wad tot het hart van de dalingschotel staat in tabel 3 gegeven. Deze afstand is met handheld GPS bepaald vanaf de zeereep (X189618/Y609065) bij paal 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.

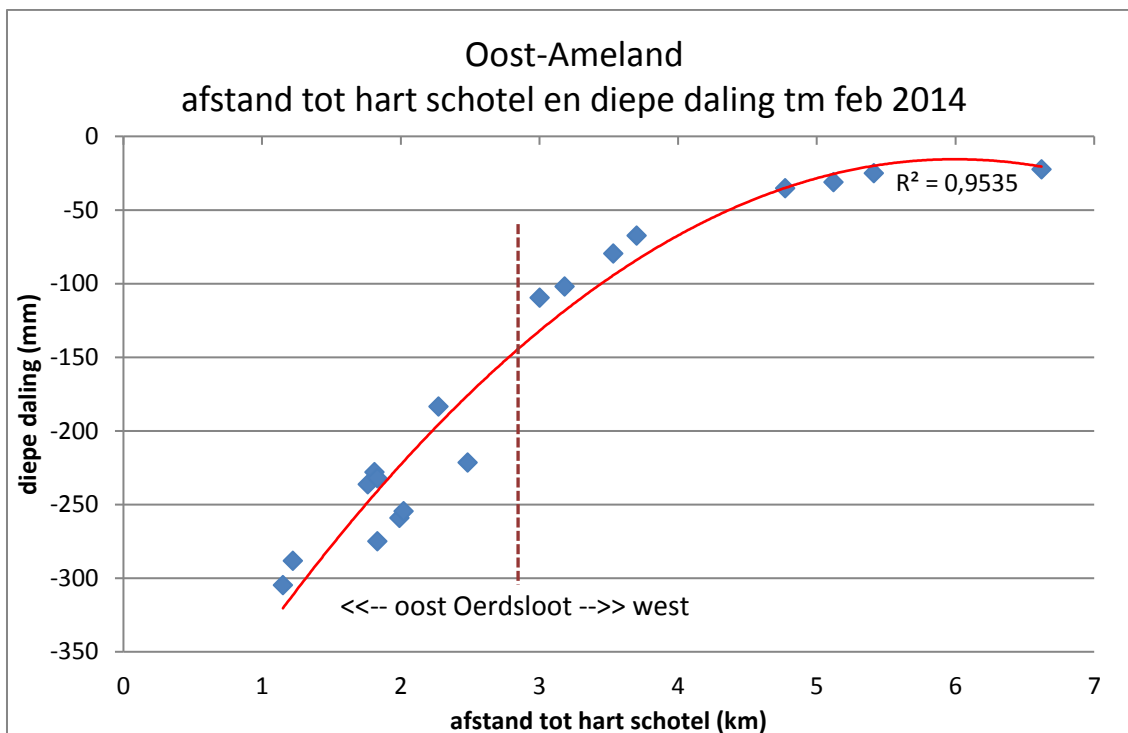
In 2013 is de hoogte van het wad bij de meetstations met RTK/DGPS meting bepaald (tabel 2.3). De meeste stations liggen tussen +35 cm NAP en -35 cm NAP en alleen de twee stations S90 en S100 aan de zuidrand van de wadplaat liggen veel lager op ongeveer -80 cm NAP. De diepe daling op de RD-coördinaat van ieder station is vanaf 1986 tm februari 2014 uitgerekend met het NAM-model Ameland_GRIDS_2014 en is weergegeven in tabel 2.5.

Tabel 2.5. Afstand tot hart van bodemdaling schotel en diepe daling in 1986-2014 bij meetstations berekend met NAM-model Ameland_GRIDS_2014.

Station	Afstand tot hart schotel (km)	2014 diepe daling (mm)
S00	6,62	-22
S10	4,77	-35
S20	2,48	-221
S30	1,81	-228
S40	3,00	-109
S50	1,76	-236
S60	5,41	-25
S70	3,53	-79
S80	1,83	-220
S90	2,27	-183
S100	2,28	-225
S110	1,83	-275
S120	3,70	-67



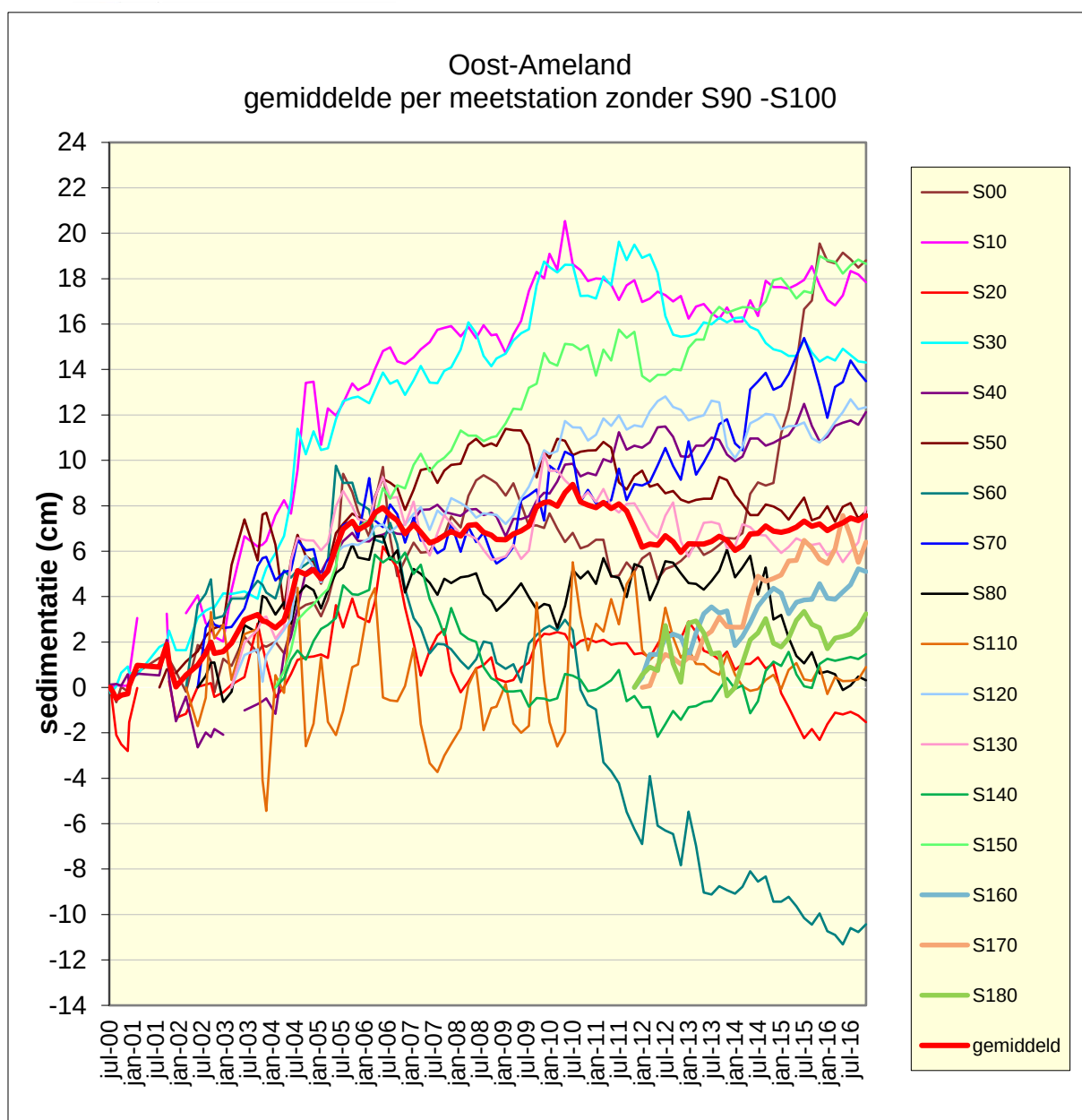
Station	Afstand tot hart schotel (km)	2014 diepe daling (mm)
S130	1,99	-259
S140	1,22	-288
S150	1,15	-305
S160	5,12	-31
S170	3,18	-102
S180	2,02	-254



Figuur 2.35 Afstand tot hart dalingschotel en de diepe daling tm februari 2014. Het wantij ter hoogte van de Oerdsloot vormt een scheiding tussen veel en weinig gedaalde stations.

2.6.4.3 Sedimentatie op wadplaat Oost-Ameland.

Per meetstation is het verloop van de sedimentatie ten opzichte van het begin van de meetreeks verwerkt in figuur 2.36. De beide geulrandstations S90 en S100 (S100 is sinds 2009 verdwenen) zijn hierin niet opgenomen. Deze figuur laat dus de sedimentatie aan het oppervlak zien van de wadplaat ten zuiden van Oost-Ameland. Station S110 kent 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 bewegen (figuur 2.37). 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 geulensetel 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 nu weer boven maaiveld (figuur 2.38). Naast S60 is station S20 het enige dat aan het eind van de meetreeks, in december 2016, erosie aan het oppervlak laat zien. De overige stations laten sedimentatie zien ten opzichte van het meetbegin.



Figuur 2.36 Sedimentatie van alle meetstations op wadplaat ten zuiden van Oost-Ameland.



Figuur 2.37 Meetstation S110 op luchtfoto. Zandgolven veroorzaken lokale dynamiek.



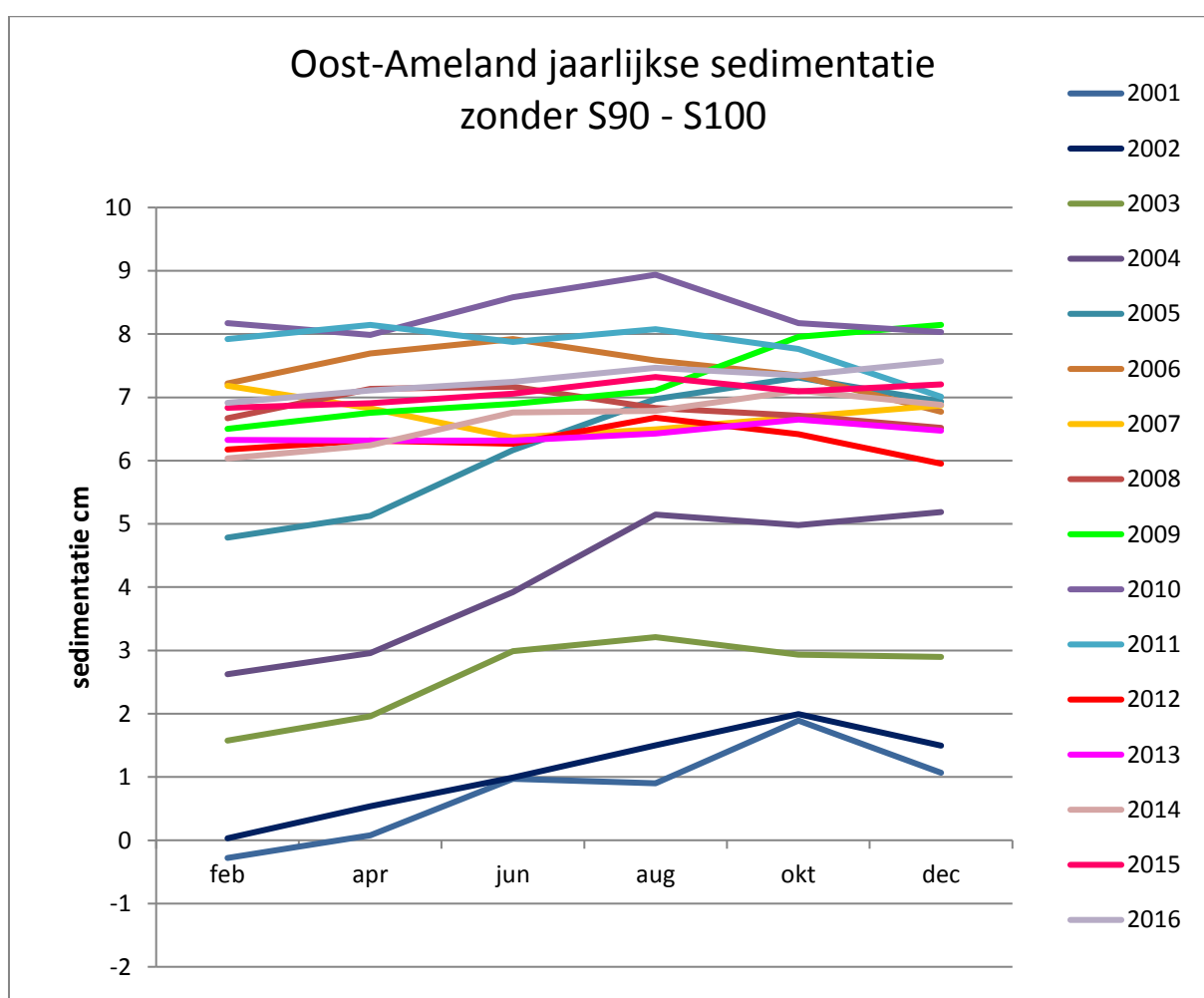
Figuur 2.38 Station S60, herkenbaar aan witte buisje en scheve paal op voorgrond (zuidelijke station van duplo) met geulvorming en wadplaat in erosiefase. Op achtergrond zijn aluminium onderdelen van een viermotorige Engelse Short Stirling RAF (BF378) bommenwerper zichtbaar die hier op 19 februari 1943 '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).

2.6.4.4 Plaatsedimentatie in relatie tot de tijd

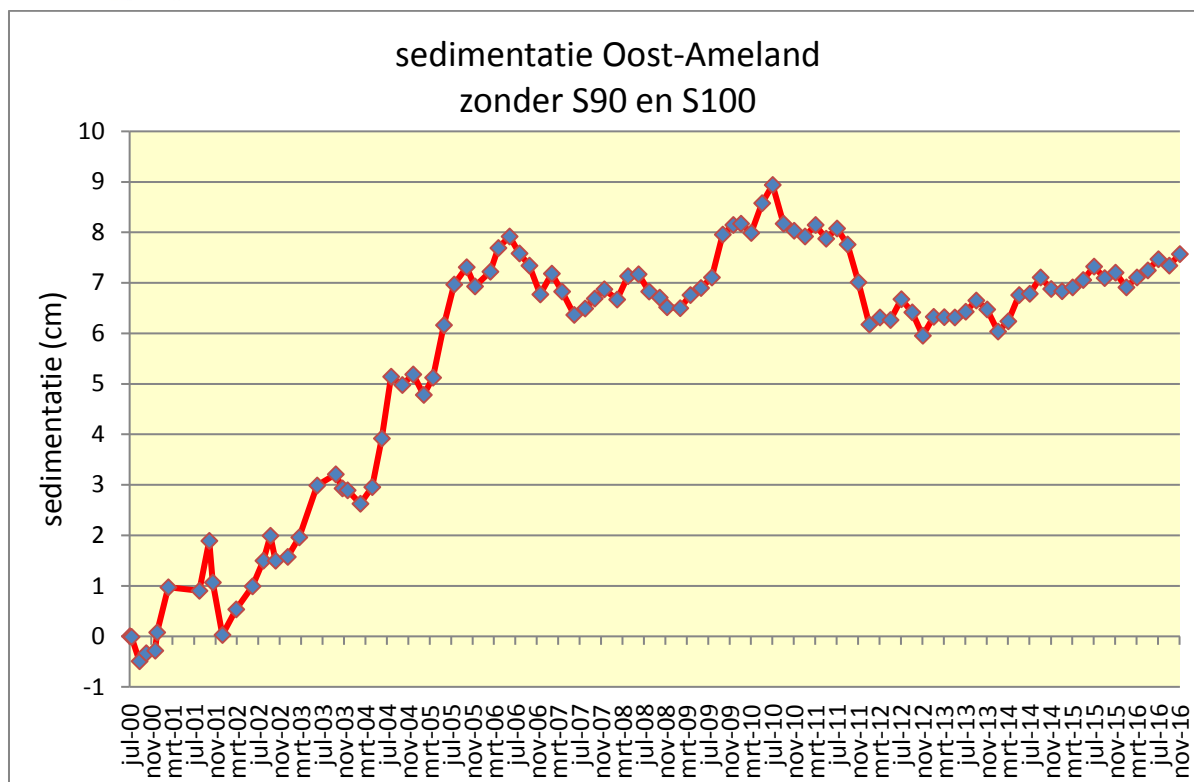
Om de ontwikkeling van de sedimentatie op de wadplaten te kunnen beoordelen, zijn de beide geulrandstations S90 en S100 buiten beschouwing gelaten omdat ze op de rand van de plaat liggen. Een jaarlijks beeld van de sedimentatie op de wadplaat ten zuiden van Ameland tussen De Hon en de



'oude dam' ten zuiden van Buren kan worden gemaakt door een verschilberekening te maken ten opzichte van december in het voorgaande jaar (bijlage 2A). Dat levert steeds jaarlijks 6 waarden op voor de 15 complete jaren 2001 t/m 2015. Hierbij moet worden bedacht dat het aantal stations oploopt van 5 in 2001 tot 14 vanaf mei 2004 en 17 vanaf november 2011 (figuur 2.39). Erosie jaren zijn 2006, 2008, 2010, 2011 en 2012. De overige jaren laten opslibbing zien. Indien de data in één grafiek worden samengevat, de lijnen van figuur 2.39 worden als het ware achter elkaar geplakt, ontstaat figuur 2.40. 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 en daarna 58 maanden langzame sedimentatie tot het eind van de reeks in december 2016. 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 sprake van een gemiddelde sedimentatie van 6,2 mm/j voor de 17 meetstations die op de wadplaat liggen gerekend over de gehele meetreeks.



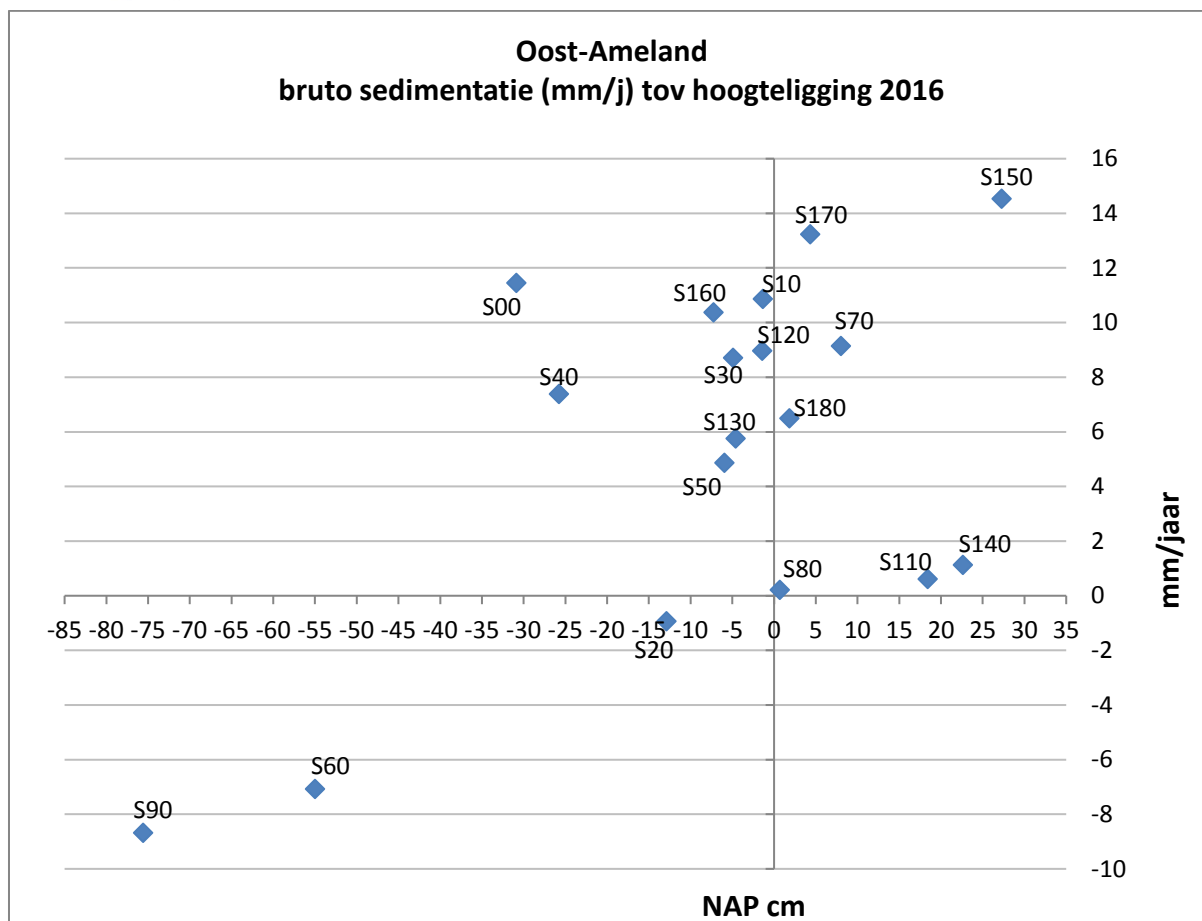
Figuur 2.39 Jaarlijkse sedimentatie op de stations van de wadplaat onder Oost-Ameland ten opzichte van decembermeting voorgaande jaar.



Figuur 2.40 Sedimentatie op wadplaten op Oost-Ameland. Alle meetstations uitgezonderd S90 en S100.

2.6.4.5 Wadplaats sedimentatie in relatie tot hoogteligging.

Van het gebied Oost-Ameland zijn de NAP-hoogten van de meetstations met RTK/DGPS ingemeten in 2013 (tabel 2.3). 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 2016 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 2016 was over de gehele meetperiode van ieder meetstation. Als de bijzondere situatie van S60 (lokale erosie) even buiten beschouwing wordt gelaten is er alleen sprake van erosie bij station S20. Dit is het meest oostelijke station en dynamische processen rond de oostpunt van het eiland (het eiland wordt momenteel korter) kunnen hiervan de oorzaak zijn. Bij de overige 15 stations is sprake van sedimentatie vanaf een hoogte van +27 cm NAP (S150) tot -31 cm NAP (S00) (figuur 2.32). Dit betreft vrijwel de volledige hoogterange waarop de stations liggen. In het spreidingsdiagram van figuur 2.32 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 S20, S80, S110 en S140. Deze stations laten een veel lagere opslibbing zien dan stations met vergelijkbare hoogteligging. Indien de ligging van deze stations in oegenschouw wordt genomen (figuur 2.32) dan valt op dat ze op een gebogen lijn vlak ten zuiden van het eiland liggen waar de diepe daling hoog is geweest (figuur 2.42).



Figuur 2.41 Spreidingsdiagram van de sedimentatiesnelheid ten opzichte van hoogteligging eind 2016 van de meetstations bij Oost-Ameland. Sedimentatiesnelheid in mm per jaar over de totale meetperiode die eindigt in december 2016. Meetperiode van de meetstations varieert van 5 tot 16 jaar (tabel 1). S100 niet berekend, dit station is in 2009 verloren gegaan door geulvorming.

2.6.4.6 Wadplaats sedimentatie in relatie tot bodemdaling

In het Waddengebied bij Oost-Ameland zijn de meetstations gedaald door diepe daling vanwege de gaswinning (figuur 2.35, tabel 2.5). Tegelijkertijd heeft er ook opslibbing plaatsgevonden aan het oppervlak bij het merendeel van de meetstations als de gehele meetperiode in ogenschouw wordt genomen (paragraaf 2.6.4.3, 2.6.4.4, 2.6.4.5). In hoeverre de opslibbing aan het oppervlak voldoende is om tenminste de diepe daling te compenseren kan per meetstation bepaald worden. Dan blijkt uiteraard dat het maaiveld bij de drie stations S60, S90 en S20, die tijdens de meetperiode erosie lieten zien (paragraaf 2.6.4.5), door de diepe daling versterkt daalt (figuur 2.43). Bij S60 is dit minimaal aangezien dit station op de rand van de dalingschotel ligt. Bij de beide stations S90 en S20 daalt het maaiveld door diepe daling extra.

Bij het merendeel van de stations is er voldoende sedimentatie om de bodemdaling volledig te compenseren en vind er dus geen maaiveldverlaging plaats (figuur 19). In vijf gevallen is er sprake van een maaiveldverlaging veroorzaakt door bodemdaling waar anders een maaiveldverhoging zou zijn geweest. Dit betreft de stations S50 (minimaal), S80, S110 en S140. Bij S130 weet de sedimentatie de diepe daling nog net te compenseren. Alle vijf dalende stations liggen in het meest dalende plaatgebied bij Oost-Ameland waar een diepe daling van maximaal 6 mm/jaar (S140) plaatsvindt wat bij deze stations resulteert in een netto (sedimentatie minus diepe daling) maaiveldverlaging van maximaal 5 (S80, S110, S140) tot 5,5 (S20) mm/j.

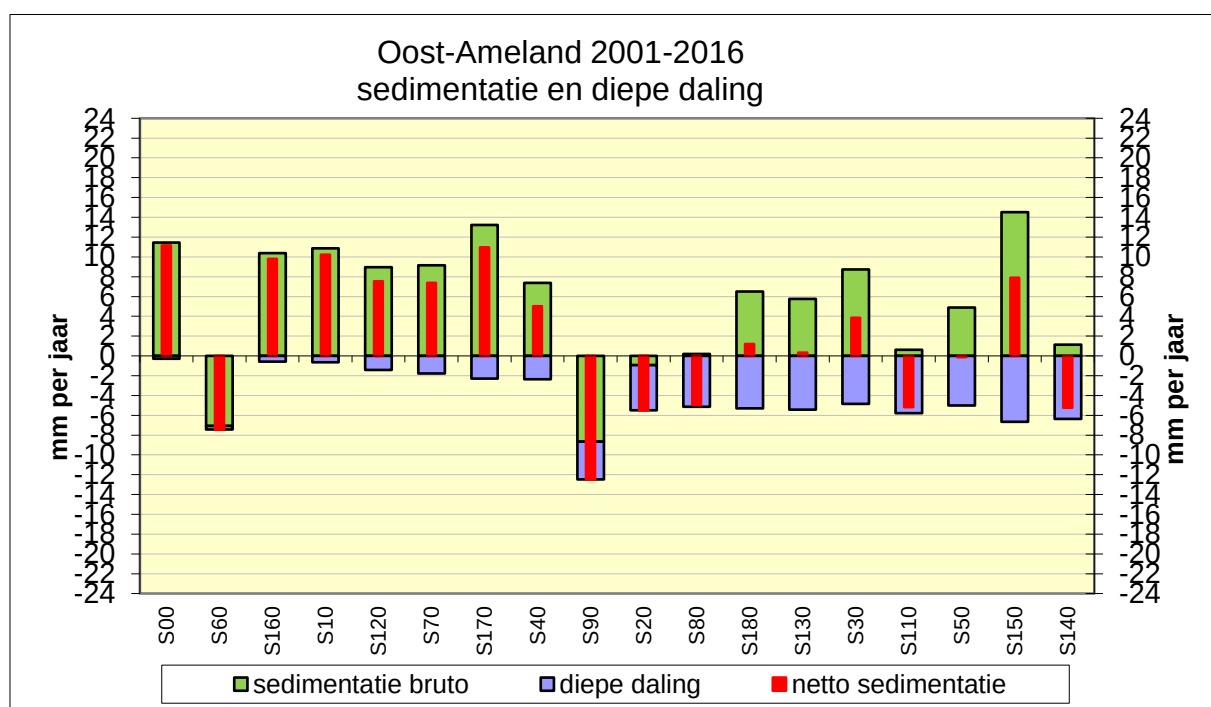
In figuur 2.42 is handmatig geschetst om welk gebied het gaat waarin de stations liggen die in de periode 2000-2016 netto (sedimentatie minus diepe daling) tussen 4,9 en 5,5 mm/jaar dalen. Dit betreft een vrij smalle strook van ongeveer 2 kilometer lengte en beperkte breedte gezien de ligging vlak langs de kust en de sedimentatie bij de omliggende stations. Een ruwe schatting duidt op een sedimenttekort van 3000 m³ /jaar (2000x300x0,004 m) in deze strook om tenminste het maaiveld op gelijke hoogte te houden.



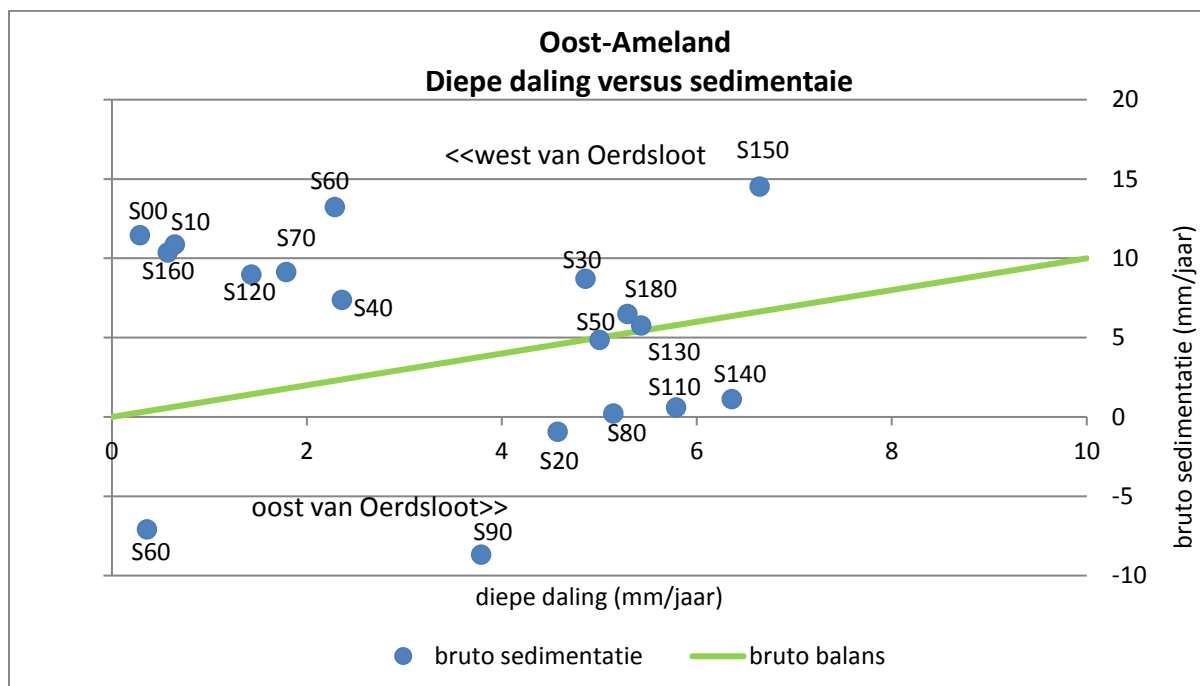
Indien alle stations, uitgezonderd S90 en S100, samen worden genomen is er in de periode 2000-2016 sprake van een bruto sedimentatie van 6,2 mm/jaar. Een ruwe schatting duidt op een opslibingsvolume van ruim 18.000 m³/jaar (7500x400x0,0062 m) sediment voor het gehele gebied. Door de diepe daling van gemiddeld 3,5 mm/jaar resulteert uiteindelijk een netto ophoging van 2,8 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. Maar deze studie laat zien dat lokaal sprake is van een netto maaiveld daling.



Figuur 2.42 In het oranje gebied is sprake van netto maaiveld daling ten gevolge van diepe daling door gaswinning.



Figuur 2.43 Snelheid van sedimentatie en bodemdaling en het netto effect per meetstation gedurende de meetperiode. Data t/m december 2016.

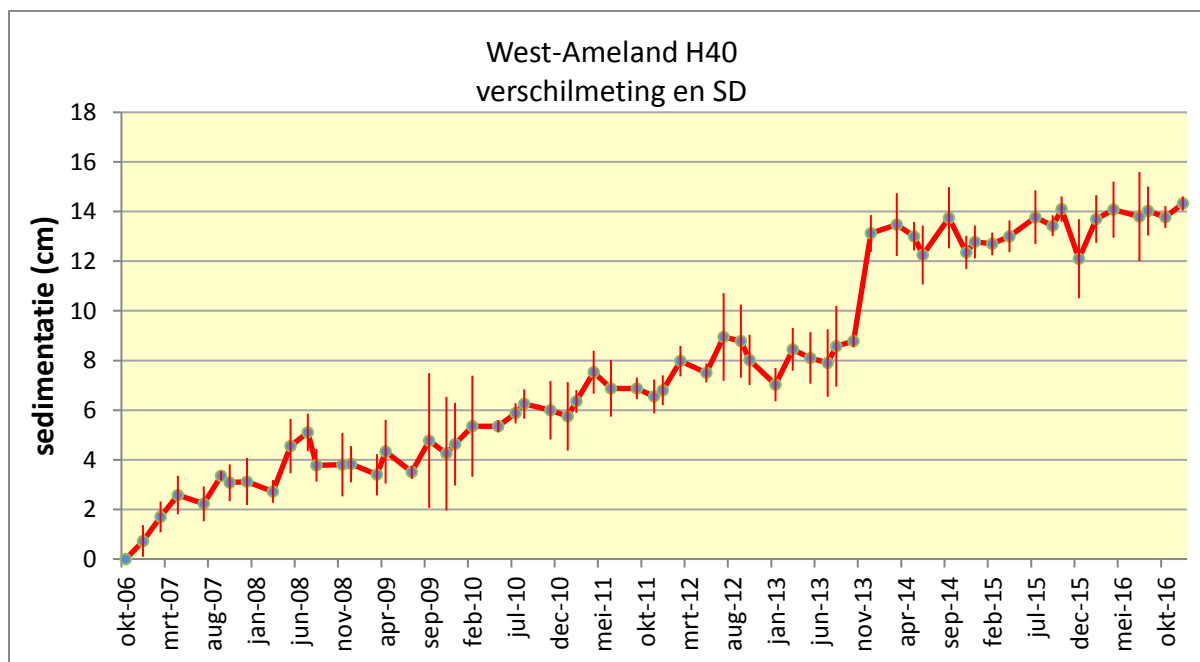


Figuur 2.44 Verband tussen bodemdaling en sedimentatiesnelheid op alle meetstations. Data tm december 2016. De getrokken lijn geeft aan waar bodemdaling en sedimentatie in balans zijn zodat het maaiveld op gelijke hoogte blijft.

2.6.5 Resultaten West-Ameland

2.6.5.1 Uitwerking per meetstation

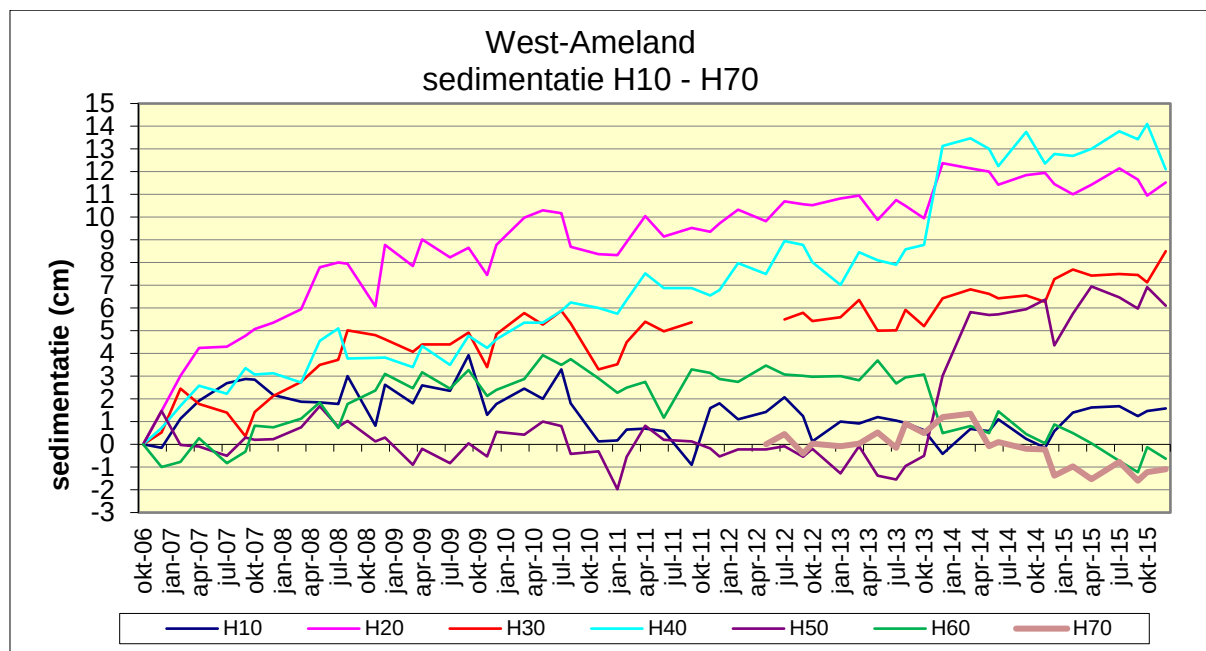
Voor de berekeningen van de verandering ten opzichte van het meetbegin zijn voor iedere meting alle beschikbare grondankers meegenomen. In de meeste gevallen betekent dit per meting per meetstation 4 grondankers die worden gemiddeld. Soms is een touwtje met meetlabel (tijdelijk) onvindbaar en vindt middeling over de wel beschikbare grondankers plaats. Een voorbeeld van een meetreeks staat in figuur 2.45. 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 2.45 Meetreeks van meetstation H40 in het onderzoeksgebied West-Ameland.

2.6.5.2 Sedimentatie alle meetstations West-Ameland

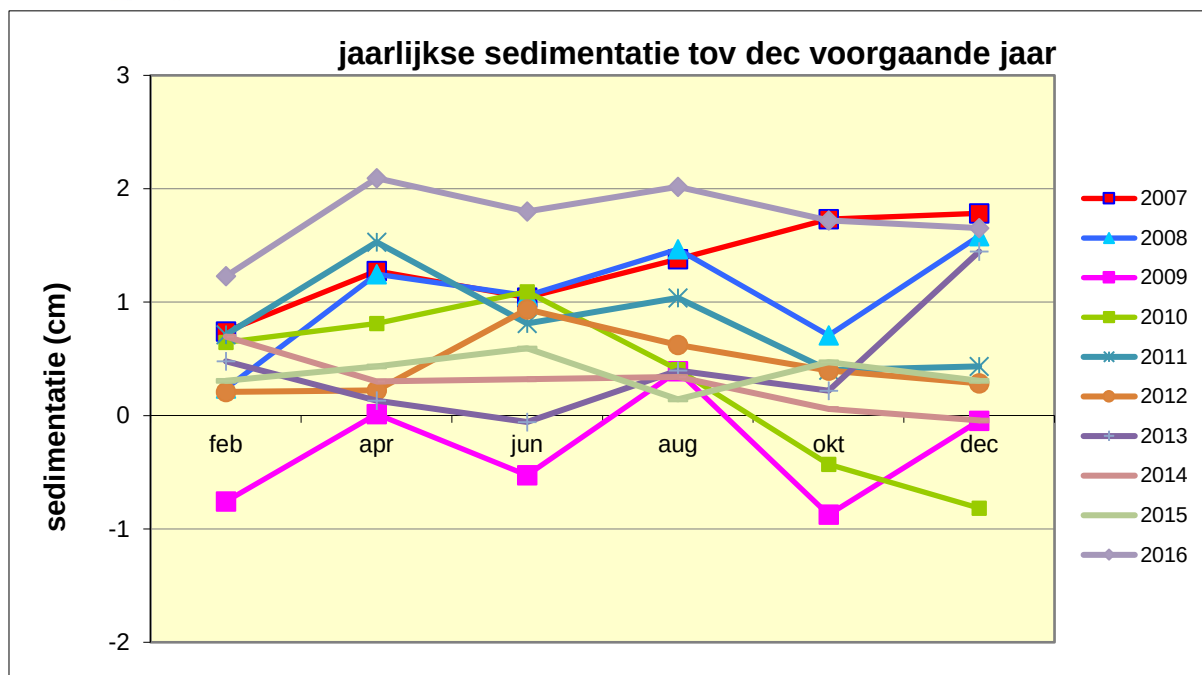
Per meetstation is het verloop van de sedimentatie ten opzichte van het begin van de meetreeks verwerkt in figuur 2.46. Hieruit blijkt dat de hoogteligging van de stations H10, H60 en H70 vrijwel onveranderd is sinds het meetbegin. De stations H20, H30, H40 en H50 laten sedimentatie zien met station H10 en H40 als hoogste met 12 cm in een periode van ruim 10 jaar. In de winter 2013/2014 is sprake van een trendbreuk waarbij de stations H20, H30, H40 en H50 sterk sedimenteren en H60 en H70 juist eroderen.



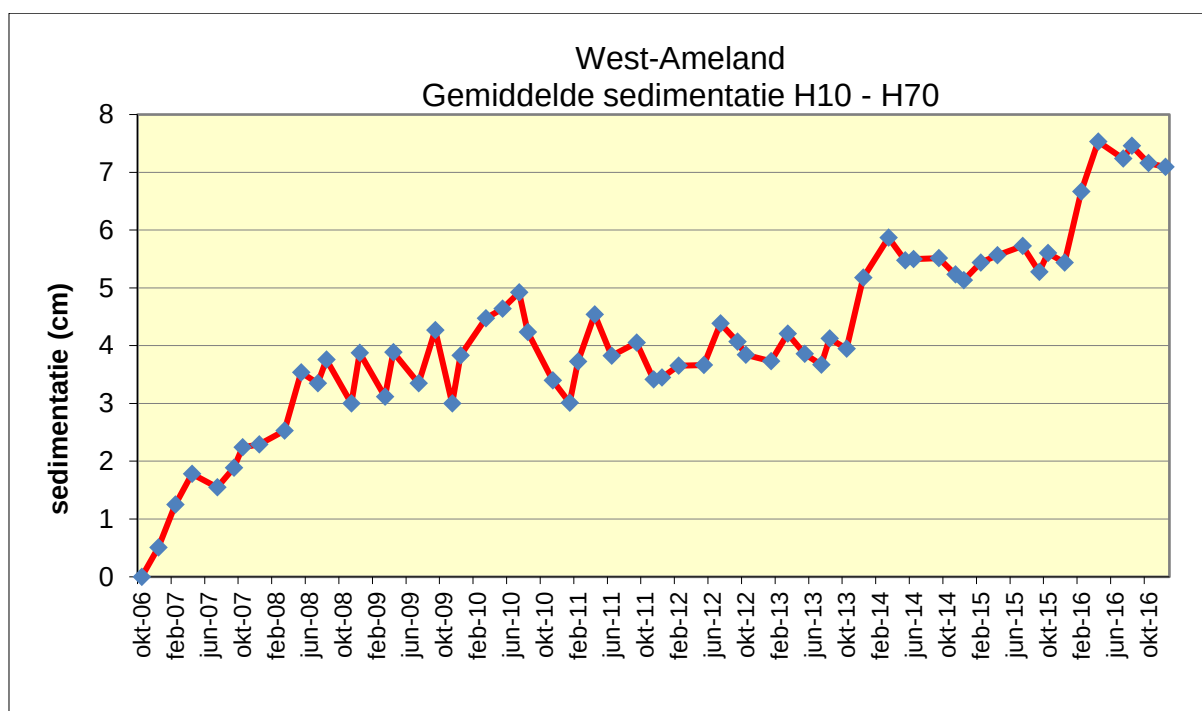
Figuur 2.46 Gemiddelde sedimentatie van de meetstations H10 tm H70 in het onderzoeksgebied West-Ameland.

2.6.5.3 Plaats sedimentatie in relatie tot tijd

Om de ontwikkeling van de sedimentatie op de wadplaat ten zuiden van Ballum te kunnen beoordelen zijn de resultaten van de zeven stations samengevoegd. Hiermee kan een algemeen jaarlijks beeld van de sedimentatie worden gemaakt door een verschilberekening te maken ten opzichte van december in het voorgaande jaar (Bijlage B). Er zijn 5 sedimentatiejaren (2007, 2008, 2009, 2013 en 2016), drie erosiejaren (2010, 2011 en 2014) en twee stabiele jaren (2012 en 2015) (figuur 2.47). Indien de data in één grafiek worden samengevat, de lijnen van figuur 2.47 worden als het ware achter elkaar aan geplakt, ontstaat figuur 2.48. Deze figuur geeft een goed overzicht van het plaatgedrag op maaiveldhoogte. Aan het eind van de meetreeks in december 2016 is gemiddeld sprake van 7,1 cm sedimentatie wat overeenkomt met een gemiddelde opslibbingsnelheid van 7,1 mm/j. De variatie tussen de stations is echter behoorlijk groot (figuur 2.46) maar zowel de sedimentatie als de gemiddelde snelheid van sedimentatie (Oost-Ameland 6,2 mm/j, paragraaf 2.6.4.6) en de variatie tussen de stations zijn daarmee op hetzelfde niveau als op Oost-Ameland.



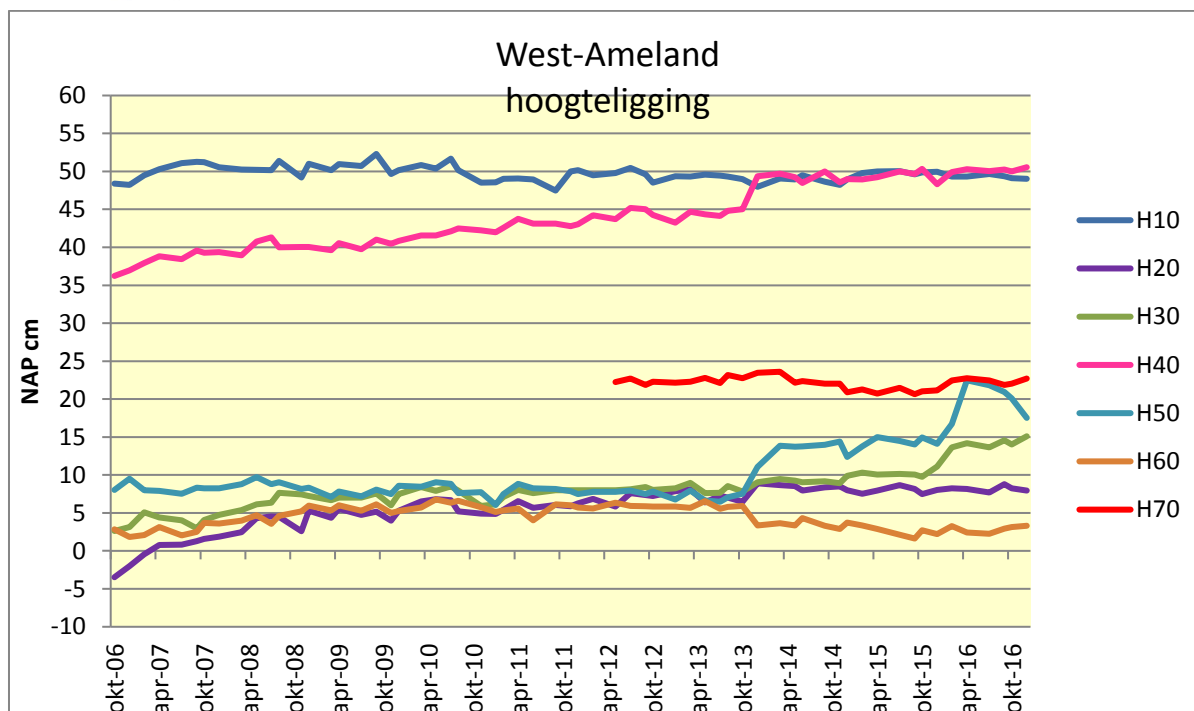
Figuur 2.47 Jaarlijkse sedimentatie West-Ameland ten opzichte van decembermeting voorgaande jaar.



Figuur 2.48 Sedimentatie op wadplaten op West-Ameland. Alle meetstations.

2.6.5.4 Plaats sedimentatie in relatie tot hoogteligging.

Van het gebied West-Ameland zijn de NAP-hoogten van de meetstations met RTK/DGPS ingemeten in 2013 (tabel 2.4). 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 2.49). De wadplaat heeft een hoogteligging rond NAP 0 tot +10 cm gezien de hoogteligging van de meeste stations. De dichterbij de dijk gelegen stations H10 en H40 liggen eind 2016 op ongeveer NAP +50 cm.



Figuur 2.49 Hoogteverloop (NAP cm) van de meetstations op wadplaat bij West-Ameland.

2.6.6 Discussie

Droogvallende wadplaten vormen uiterst belangrijk gebied in diverse voedselketens in de Waddenzee. Het best zichtbare voorbeeld daarvan zijn de vogels, waarvan veel soorten in grote aantallen lopend foerageren op de wadplaten (Kersten et. al., in de Vlas 2011). Verlaging van wadplaten kan van invloed zijn op de leefomstandigheden van bodemdieren en de foerageeromstandigheden van wadvogels.

Teneinde vast te kunnen stellen of er een verdieping plaats vindt in het deel van de Waddenzee dat binnen de contour van de bodemdaling valt zijn vanaf het jaar 2000 meetstations op wadplaten zuidelijk van Oost-Ameland ingericht. 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. 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 hoog is zoals langs een plaatrand (S90, S100) blijkt de methode ongeschikt en draagt de meting bovendien niet mee aan het verzamelen van data van een echte wadplaat.

In hoeverre de gezamenlijke meetstations per plaatgebied iets zeggen over de gehele plaat is bekeken met een kriging methodiek. Hieruit bleek dat statistisch gezien geen definitieve uitspraken kunnen worden gedaan over de hoogteverandering van de gehele plaat. Kriging vraagt veel meer stations op onderling heel verschillende afstanden en dat zou praktisch niet uitvoerbaar zijn. Daarom wordt tijdens iedere meting de omgeving van het meetstation op het oog beoordeeld 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 en S60 bij Oost-Ameland waar na verloop van tijd een geulontwikkeling door het meetstation geslepen is. 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 sinds 2014 is de sterke sedimentatie daar het gevolg van de ontwikkeling van een rif van zandkokerwormen (*Pygospio elegans*). Het belang van deze metingen moet worden gezien in een eenvoudige en goedkope 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 is. Naarmate de meetreeksen zich uitstrekken over een langere periode winnen ze aan kracht.

Pas na een lange reeks meetjaren zal het mogelijk zijn om langzame processen als bodemdaling door gaswinning en zeespiegelstijging door klimaatverandering te onderscheiden van natuurlijke variatie op kortere tijdschalen. In dit onderzoek blijkt het mogelijk om na een reeks van 16 meetjaren (2000-2016) een goede kwantificatie te kunnen geven van het gecombineerde effect van bodemdaling en sedimentatie van een groot wadplaatgebied van ongeveer 7 km lengte langs de kust van Oost-Ameland. In dit gebied wordt een gemiddelde sedimentatie van 6,2 mm/j gemeten. Ten zuiden van West-Ameland is dit 7,1 mm/j over een kortere (2006-2016) meetperiode. De vrijwel gelijke sedimentatiesnelheid wijst mogelijk op een voor heel Ameland geldend sedimentatiemechanisme. Over het geheel genomen is er voldoende sedimentatie bij Oost-Ameland om de diepe daling door gaswinning teniet te doen.

Maar 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 5 mm/j. Dit betekent een daling van 7,5 cm in de afgelopen 15 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 verband houdt met de gaswinning blijft voer voor speculaties. Meer waarschijnlijk lijkt het een soort toevoer/afvoer gebied te zijn voor water dat rondom de oostpunt over dit plaatgebied trekt naar de monding van de Oerdsloot en het wantij daar. De oostpunt van Ameland is van nature behoorlijk dynamisch (Wang, dit hoofdstuk) en deze veranderingen (zie bijlage E) zullen effect hebben op de hydrodynamica van het zeewater.



Figuur 2.50 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. Binnen de arcering bevindt zich het gebied waar de afgelopen 15 jaar een netto verlaging van 5mm/j heeft plaatsgevonden (zie paragraaf 2.6.4.6 en 2.6.4.5). Foto 26-4-17.

2.6.7 Conclusies (2000-2016)

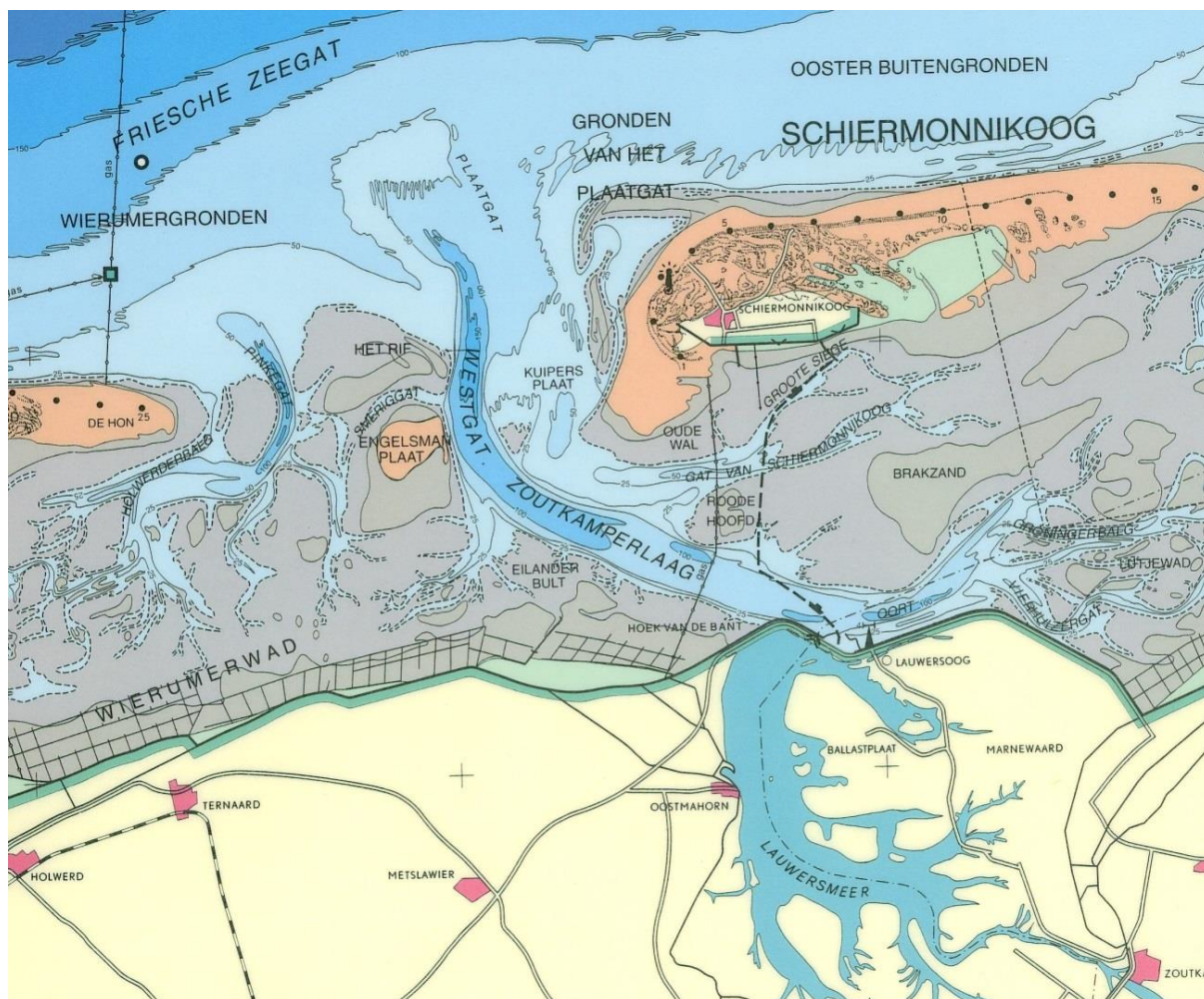
- De jaarlijkse opslibbing op het wad ten zuiden van West-Ameland (6,2 mm/j) verschilt niet van de opslibbing bij Oost-Ameland (7,1 mm/j). Dit zou kunnen duiden op een voor heel Ameland geldend sedimentatiemechanisme onafhankelijk van bodemdaling.



- De opslibbing bij Oost-Ameland (6,2 mm/j) wordt voor bijna de helft teniet gedaan door de diepe daling door gaswinning waardoor er gemiddeld voor het hele gebied een opslibbing van 2,8 mm/jaar netto resulteert.
- In een beperkt waddegebied van 2 km lengte vlak langs de zuidkust bij Oost-Ameland, waar de opslibbing minimaal is en de bodemdaling maximaal is, ontstaat een netto verlaging van het maaiveld met ongeveer 5 mm/jaar.
- De wadplaat bij Oost-Ameland hoogt op maar er is een aanwijzing dat de plaatrand op de overgang naar de eerste geul verlaagt. Dit zou kunnen duiden op een versteiling van de overgang van plaat naar geul maar een kleine verplaatsing van de geul kan niet uitgesloten worden.
- De maximale opslibbing bij Oost-Ameland lijkt plaats te vinden op een hoogteligging rond de 0 cm NAP.
- 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 weinig dynamische wadplaat.

2.7 Engelsmanplaat

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 (figuur 2.51). De Engelsmanplaat was in de jaren daarvoor aan erosie onderhevig, met als zichtbaar teken daarvan dat het reddingshuisje (figuur 2.52) dan alleen nog maar via een 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 (Wang, 2007).



Figuur 2.51 Het Friesche Zeegat

Het primaire doel van het onderzoek is 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 sedimentthonger in het Pinkegat door de bodemdaling worden beïnvloed?

Het onderzoek is uitgevoerd door middel van een literatuuronderzoek en een data-analyse. In het literatuuronderzoek zijn de historische ontwikkelingen op een rij gezet en de bekende theorieën / hypothesen geïnventariseerd. In de data-analyse zijn zowel de velddata als de modeldata verzameld en geanalyseerd. De analyse van velddata leverde in eerste instantie een beschrijving van de ontwikkelingen van de twee gebieden. In tweede instantie worden de data gebruikt om de bestaande en eventueel nieuw te formuleren hypothesen te toetsen. Analyse van modeldata is vooral bedoeld om meer inzicht in de relevant fysische processen te krijgen. Er zijn verder een aantal aanvullende modelberekeningen uitgevoerd, vooral om inzicht te krijgen van de invloed van de bodemdaling op de golf-stroming interactie.



Figuur 2.52 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.

Het onderzoek is gerapporteerd in Wang (2007), waarvan een uitgebreide samenvatting is gegeven in de vorige rapportage (Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland, 2011). 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 onderzoeksvragen 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 onderzoeksvragen 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.

2.8 Ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland

(Samenvatting Alterra-rapport 2152, ISSN 1566-7197)

2.8.1 Inleiding

Eeuwenlang is verstuuving 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 20e 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 20e 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 2.53, 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 verstuing, 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).

Km 20.2 naar west jul. 1995



km 20.2 naar west jan. 2006



Figuur 2.53 Opnamen zeereep bij raai 20.2 in juli 1995 en januari 2006 (Foto's J. Krol, 2006)

In de jaren 80 van de 20e 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 verstuing 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 overstuing van landbouwgrond of van de bebouwing (Arens en Mulder, 2008).

In 1990 werd de 1e 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 2.53, 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 et al., 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 het algemeen 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, zeewerende 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 et al., 2007; Slim en Löffler, 2007).

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 verstuiwingen 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).

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

2.8.2.1 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 et al., 2010). Uit het onderzoek van Arens et al. (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 et al., 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).



2.8.2.2 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 verstuiwingen 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).

2.8.2.3 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 et al., 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 et al., 1996).

2.8.2.4 Evaluatie

Arens et al. (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 et al., 2007).

2.8.2.5 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. 2.54). Binnen dit gebied is er bijzondere aandacht voor de twee vakken die gebruikt zijn voor het monitoren

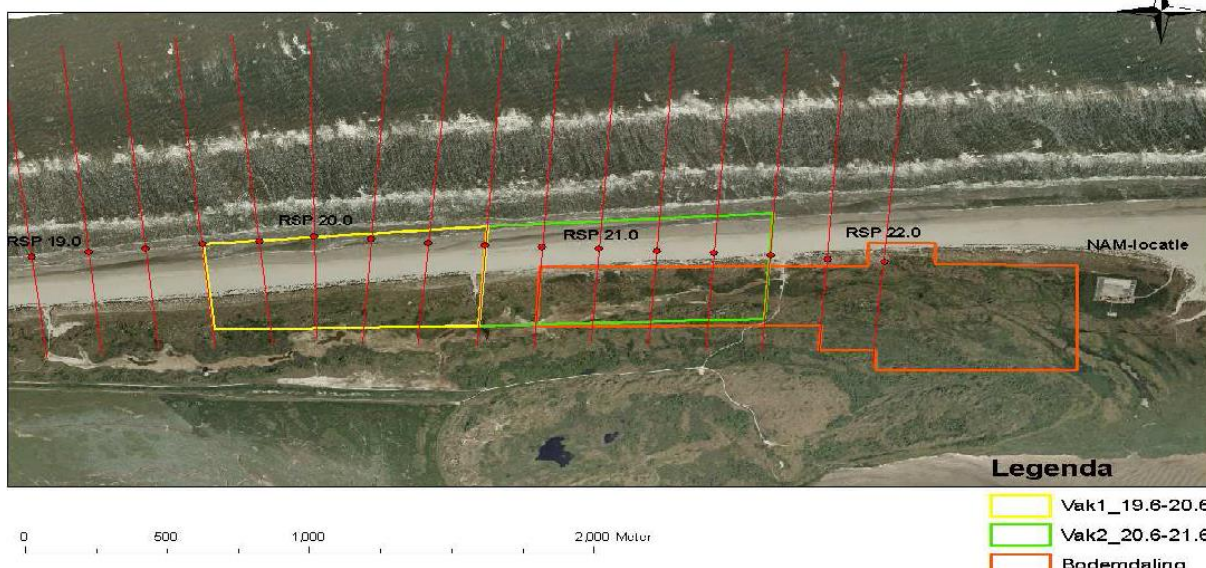


van de effecten van dynamisch kustbeheer. Vak 1 ligt tussen RSP 19.6 en 20.6, en heeft tussen 1995 en 1999 als referentiegebied gediend voor Vak

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 et al., 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 et al., 2005).

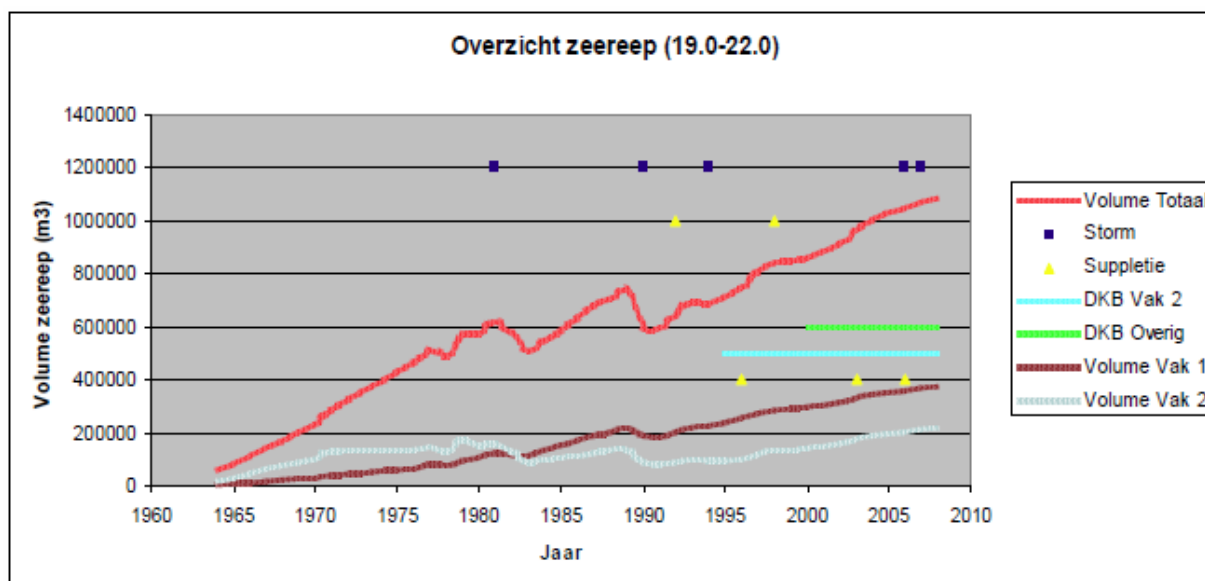


Onderzoekgebied Oost-Ameland



Figuur 2.54 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, hoogwater standen, luchtfoto's, en veldgegevens over de vegetatie over de periode 1994 - 2010.



Figuur 2.55 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. Deze trendbreuk hangt samen met een hoogwatergebeurtenis (storm), en leidt tot een (tijdelijke) afname in het duinvolume (figuur 2.55). 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.

2.9 Panoramafoto's 2004-2016

2.9.1 Inleiding

2.9.1.1 Aanleiding onderzoek.

Teneinde de landschappelijke en biotische veranderingen in de loop van de tijd voor iedereen zichtbaar vast te leggen zijn op vaste standpunten foto's gemaakt. Er zijn standpunten gekozen waar (voor onderzoekers) interessante dynamiek gaande is en zichtbare veranderingen te verwachten zijn (figuur 2.56).



2.9.1.2 Welke opnamelocaties

Het betreft een standpunt (nr. 1) bij het Baken, waar een stormvloedgeul in noordelijke richting zichtbaar is. Langs de rand van de kwelder De Hon, ver naar het oosten (nr. 2) ligt een opnamepunt waar de dynamiek van de overgang van wad naar kwelder zichtbaar is. Op de Hon in een minder dynamische vegetatie, waar wel veel meeuwen broeden, ligt opnamepunt nr. 3. In de Oerderduinen, niet ver van de wadkant ligt een opnamepunt (nr 4) in een meidoornvallei die in 1994 onderwerp van studie is geweest vanwege plotselinge sterfte. Ten zuiden daarvan op een hoog duin ligt een opnamepunt (nr. 5) wat over die meidoornvallei kijkt en de zuidelijke rand van het Oerd en de grens met de Waddenzee laat zien. Deze vijf standpunten zijn in deze rapportage van 2004 t/m 2011 gevolgd. In 2006 is een nieuw opnamestandpunt toegevoegd in een duinvallei direct ten westen van de NAM-locatie (nr. 6). Deze vallei liet vernatting in de wintermaanden zien (hoofdstuk 6, paragraaf 6.2.5) en het werd interessant geacht om de vegetatieontwikkeling zichtbaar te maken.

Tabel 2.6 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 binnen	189887	608220
5	Meidoornvallei buiten	189897	608169
6	Vallei NC02	190193	608939

Tabel 2.7 Opname data van alle jaren.

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



Figuur 2.56 Kaart (Google Earth) met de standpunten van de opnames. De nummers verwijzen naar tabel 2.6.

2.9.2 Materiaal en methode

Steeds rond 1 juni (tabel 2.7) zijn vanaf de 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 2016 is een Canon EOS 1D Mark IV camera gebruikt die foto's van 4896x3264 pixels produceert. Voor deze rapportage zijn de beelden aan elkaar 'gestitcht' met Photoshop (CS6) tot een 360 graden panorama. Één zo'n panorama beslaat maximaal (2011-2016) ongeveer 40.000x3200 pixels en de bestandsgrootte bedraagt dan als JPG file ongeveer 100MB. Als TIFF bestand bedraagt de grootte ruim 300MB. Sterk verkleinde versies van de panorama's worden in 2.9.3.1 t/m 2.9.3.6 getoond. 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 2.9.3.7 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 loopt 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 2016. Dit duidt op een afnemende dynamiek (wind en water) waardoor het kale zand vastgelegd raakt. 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 2.9.3.8 gedaan voor een detail uit de achtergrond van de in 2.9.3.7 getoonde stormvloedgeul. Dan wordt duidelijk de enorme groei van de embryonale duintjes op het strand zichtbaar die mogelijk de afnemende dynamiek in de stormvloedgeul verklaren. Ook de duinen rond de vloedgeul zijn vastgelegd door vegetatiesuccessie. Duindoorn (*Hippophae rhamnoides*) heeft met name aan de westzijde (links op de foto) het duin gefixeerd.

Gezien het feit dat steeds binnen enkele dagen rond 1 juni de 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 vier en meidoorn op opnamestandpunt 5 is daarvan een voorbeeld. En de vegetatiesuccessie kan gezien worden, zeker als foto's uit de beginjaren met de laatste jaren vergeleken worden. Het duidelijkst is dat op opnamestandpunt 4 in de meidoornvallei. Daar staat in 2004 een jonge wilg in het midden van het beeld en in 2010 verschijnt links in beeld een kleine meidoorn. Beide bomen vullen het beeld bijna in 2016. Tevens is de enorme toename van de kruiden en grassen te zien. Inmiddels (2016) is de vallei vrijwel vol gegroeid en valt er nauwelijks nog iets rondom in beeld te brengen.



2.9.3 Panoramafoto's

2.9.3.1 Baken



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2.9.3.2 Hon paal 25,8



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2.9.3.3 Hon paal 27,2



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2.9.3.4 Meidoornvallei binnen



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012

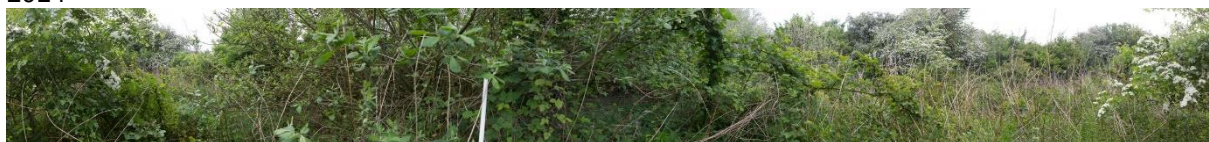


2013

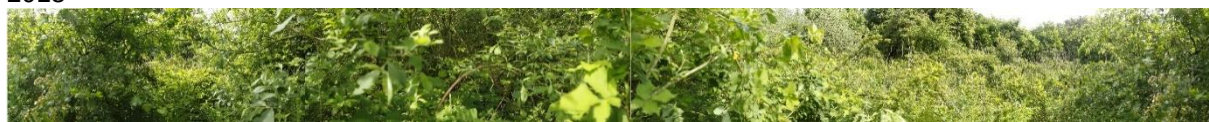




2014



2015



2016



2.9.3.5 Meidoornvallei buiten



2004



2005



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2.9.3.6 Valle NC02



2006



2007



2008



2009



2010



2011



2012



2013



2014



2015



2016



2.9.3.7 Stormvloedgeul bij Baken 2004-2016





2.9.3.8 Detail in stormvloedgeul bij Baken



2.10 Morfologie kwelderrand Oerderduinen



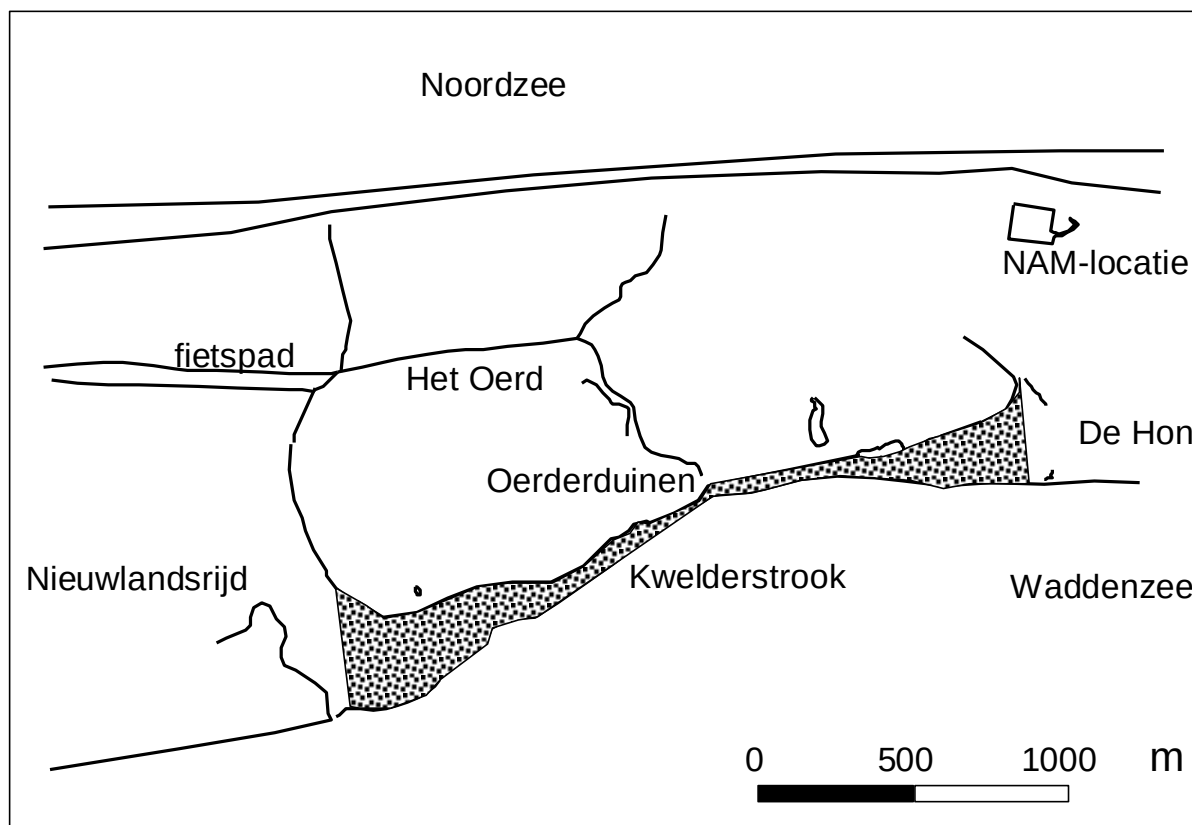
Figuur 2.57 Kwelderrand Oerderduinen

2.10.1 Inleiding

Binnen het monitoringsprogramma wordt ook aandacht besteed aan de veranderingen in de kustmorfologie van de smalle kwelderzone ten zuiden van de Oerderduinen. Om na te gaan of er een samenhang bestaat tussen kustafslag en bodemdaling als gevolg van gaswinning, is de aanwas en afslag van de kust vanaf 1949 gekwantificeerd door middel van luchtfoto-interpretatie. Aanvankelijk tien-later vijfjaarlijks wordt de afslag of aanwas gemonitord. De kwelderrand Oerderduinen ligt in zijn geheel binnen de bodemdalingsschotel. Tot 2015 bedroeg de daling in het meest westelijke deel 23 cm en in het oostelijk deel 30 cm (hoofdstuk 1). Vanaf het begin van de gaswinning in 1986 staat de kwelderrand dus onder invloed van een bodemdaling van ca. 1 cm/jaar.

2.10.2 Aanleiding en doel

Bij *It Fryske Gea* en lokale bewoners bestond de overtuiging dat er over een lengte van 2 km sprake is van aanzienlijke kustafslag van de smalle kwelderzone en duinvoet ten zuiden van de Oerderduinen, tussen Neerlands Reid en De Hon (figuur 2.58). Deze kustafslag zou mogelijk veroorzaakt zijn of versneld optreden door bodemdaling als gevolg van de gaswinning. De vegetatie van de wadrand ten zuiden van de duinmassieven van Het Oerd en de Oerderduinen wordt gekenmerkt door een grote soortenrijkdom en is door zoet-zoutgradiënten uniek in haar soortensamenstelling (Slim et al. 2011).



Figuur 2.58 Locatie van kwelderstrook en kwelderrand onder langs Het Oerd en de Oerderduinen.

Kustafslag kan betekenen dat waardevolle vegetaties verloren gaan of dat hun areaal afneemt. Daarom is in 1999 een eerste onderzoek gestart naar het gedrag van de kwelderrand en de veranderingen in de vegetatie van de kwelderstrook (Sanders & Slim 2000). Doel van de monitoring is de vraag beantwoorden of er versnelde afslag van de kwelderzone is opgetreden en indien dat het geval is, zo mogelijk de oorzaak daarvan vast te stellen. De vragen die daarbij aan de orde komen zijn:

1. Wat is de dynamiek in de morfologie van de kwelderzone van de Oerderduinen in de periode vanaf 1949 tot 2014?
2. Is er een relatie met de optredende bodemdaling als gevolg van de gaswinning op Oost-Ameland?

Deze rapportage beschrijft de resultaten van een luchtfoto-interpretatie van de reeks 1949-2014. Dit is vijf jaar na de vorige monitoring (2009), zoals beschreven in Slim et al. (2011). De luchtfoto van 2014 was de meest recente luchtfoto van het gebied die geo-gerefeerd voorhanden was. Deze resultaten van 2014 zijn vergeleken met resultaten van de luchtfoto-interpretaties van eerdere jaren vanaf 1949. Analyse van luchtfoto's biedt mogelijkheden om de kustdynamiek vlakdekkend te kwantificeren en de mate en snelheid van afslag en aanwas gedurende de laatste 65 jaar vast te stellen.

In de rapportage van 2011 is ook ingegaan op vegetatieveranderingen. Dat aspect blijft in deze rapportage buiten beschouwing, aangezien er sinds 2010 geen waarnemingen meer zijn verricht aan de vegetatie van deze kwelderzone.

2.10.3 Kwelderrand Oerderduinen

De kwelderrand ten zuiden van de Oerderduinen vormt een ca. 2100 m lange grens tussen het wad en de kweldervegetatie van het eiland. Deze strook reikt van de stenen oeververdediging van het Neerlands Reid aan de westkant tot de kwelder van De Hon aan de oostkant. Tussen de Oerderduinen en de kwelderrand ligt een strook kweldervegetatie (figuur 2.59). Deze strook is 10 tot 300 m breed.



Figuur 2.59 Overgang kwelderrand onder de Oerderduinen naar het wad met pionierbegroeiing van zeekraal (*Salicornia* sp.). (maart 2017; foto © Daisy de Vries).

Zolang kwelders aangroeien is er een geleidelijke overgang in hoogte van wad en pionierzone naar midden en hoge kwelder. Een kwelder slibt echter op als gevolg van overfloeding waarbij slib wordt afgezet. Vanaf een bepaalde hoogte ontstaat op een gegeven moment een steile kwelderrand in de vorm van een klif die gevoelig wordt voor afkalving. Op deze manier wordt een kwelder aan de zeezijde op natuurlijke wijze geleidelijk opgerold en groeit landinwaarts aan, mits daar ruimte voor is. In veel gevallen is er sprake van een duincomplex (of dijken), is er geen ruimte voor uitbreiding en wordt de kwelder steeds smaller. Stabiele kwelders bestaan niet en natuurlijke morfologische processen bepalen de balans tussen opslibbing en afkalving. Vanwege verschillen in morfologie maar ook in de oriëntatie van de kustlijn, vooral de expositie ten opzichte van de golfwerking, kan de mate van aanwas en afslag verschillen binnen de kuststrook. Daarom is in dit onderzoek de kuststrook van het Oerderduin opgedeeld in vijf deelgebieden. Het eerste deel en tweede deel hebben een breedte van respectievelijk 400 en 500 m. Het daaropvolgende deel 3 (200 m) vormt het knikpunt van de kustlijn. Daar verandert de richting van noordoost naar oostelijk. De strook is hier op zijn smalst. Deel 4 is ca. 500 m evenals deel 5. De morfologie tussen deze deelgebieden is nogal variabel. Soms is er een scherpe grens van een klifje aanwezig, soms zijn het graduele overgangen in de vegetatie van zeekraal (*Salicornia* sp.) op het wad, naar een dichte zeebiesbegroeiing op de aangrenzende kwelder (figuur 2.60).



Figuur 2.60. Kwelderrand met kustafslag onder het Oerd (augustus 2004; foto © Ruut Wegman).

2.10.4 Luchtfoto-interpretatie

De methode van interpretatie staat in detail beschreven in Sanders & Slim (2000). De analyse van luchtfoto's is vooral gericht op de lokalisatie van de kustlijn, de grens tussen wad en land. Deze is in de tijd gevolgd vanaf 1949 om zo een beeld te krijgen van de natuurlijke dynamiek. Een eventueel effect van bodemdaling sinds de start van de gaswinning in 1986 zou zichtbaar kunnen worden in een trendbreuk in de snelheid van aanwas of afslag. Er is gebruik gemaakt van luchtfoto's van de Topografische Dienst. Het betreft panchromatische luchtfoto's (schaal 1:18.000) gedurende de gehele waarnemingsperiode en tevens van *false-colour* luchtfoto's (schaal 1:5.000) vanaf het moment dat deze van het gebied beschikbaar waren (1993). Met deze laatste type luchtfoto's is het veel eenvoudiger om de grens tussen de vegetatie en het onbegroeide wad te onderscheiden.

De nauwkeurigheid van de geometrische correctie is van essentieel belang om daadwerkelijk kustafslag te kunnen bepalen. De geometrische afwijking tussen twee opeenvolgende foto's moet veel kleiner zijn dan de opgetreden afslag of aanwas om deze afslag of aanwas voldoende betrouwbaar te kunnen aantonen. Om te controleren of de geometrisch gecorrigeerde luchtfoto's voldoende nauwkeurig waren, zijn enige objecten met scherpe grenzen, zoals fietspaden en drinkpoelen, verdeeld over het hele terrein geïnterpreteerd van de 1996-luchtfoto's. Het kaartje met deze controlelijnen werd geprojecteerd op de gecorrigeerde luchtfoto's van de verschillende jaren. De geometrische correctie werd als niet nauwkeurig genoeg beschouwd wanneer de objecten van het kaartje niet passen op die in de foto. Een tweede onafhankelijke controle vond plaats met de locatie van de aan de wadkant gelegen permanente proefvlakken (PQ's).

De grens van de vegetatie werd op het beeldscherm visueel geïnterpreteerd. Beeldscherminterpretatie heeft als voordeel dat er naar behoefte vergroot kan worden en dat de kustlijn direct op het computerscherm kan worden gedigitaliseerd. Beeldscherminterpretatie heeft hierdoor een hogere geometrische nauwkeurigheid dan stereoscopische interpretatie van de foto's. De op het scherm gedigitaliseerde luchtfoto-interpretaties zijn opgeslagen in GIS (ArcView). De kustlijinkaarten van twee opeenvolgende jaren zijn met elkaar gecombineerd waarna de oppervlakteverschillen zijn berekend voor de vijf verschillende deelgebieden en de kuststrook in zijn geheel.

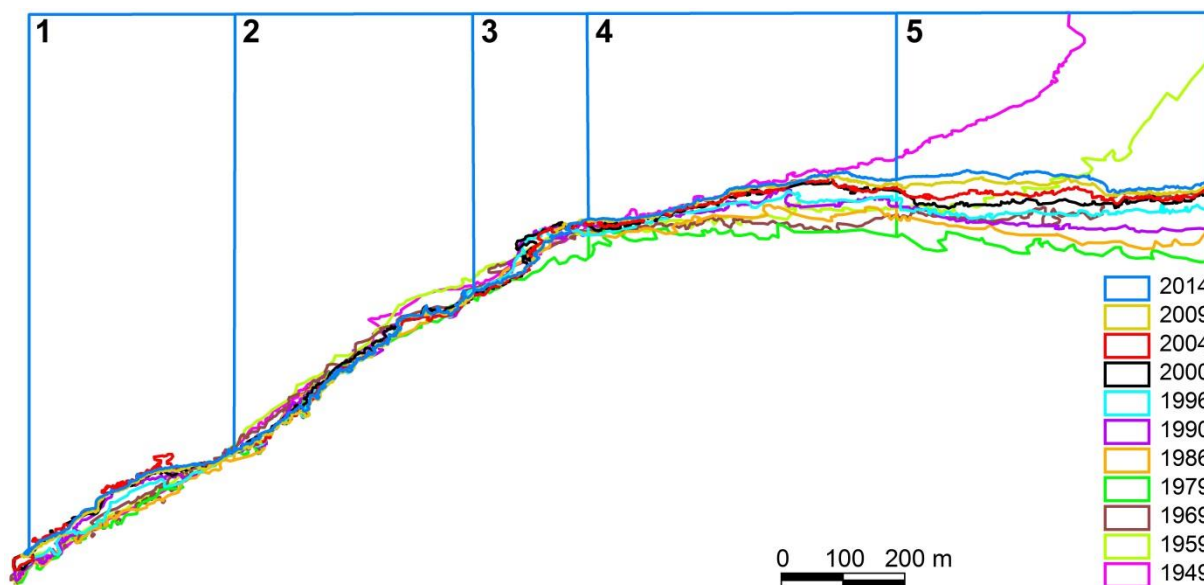
De locatie van de kustlijn kon op de geo-gerefereerde luchtfoto's van 1949-2014 worden vastgesteld met een gemiddelde nauwkeurigheid van 2,1 m (Sanders & Slim 2000). De nauwkeurigheid van het verschil tussen luchtfoto's van opeenvolgende jaren bedroeg daarmee 4,2 m. De controleobjecten en de ligging van de PQ's wezen uit dat de geometrische correcties van de luchtfoto's nauwkeurig genoeg waren om de mate van kustaanwas/-afslag te kunnen kwantificeren. Per deelgebied is per luchtfotojaar het oppervlak gekwantificeerd. Uit een vergelijking tussen de jaren volgt de netto aanwas of afslag.

2.10.5 Resultaten morfologische dynamiek kwelderrand

De luchtfoto-interpretatie in de afzonderlijke jaren resulteerde in kaarten van de kustlijn (figuur 2.61 en 2.62). Als kustlijn is de grens tussen de vegetatie en het wadzand aangehouden. De figuur maakt duidelijk dat er tussen de vijf deelgebieden grote verschillen zijn opgetreden in aangroei en afslag. De dynamiek aan de oostzijde is veel groter dan aan de westzijde. *Overall* trad tot 1979 netto aangroei plaats van de kuststrook (tabel 2.8). Na 1980 brak een periode aan met overwegend afslag. Aanvankelijk (1980-1990) was deze afslag aanzienlijk, maar nam na 1990 geleidelijk af, een trend die zich tot en met 2014 heeft doorgezet. In deelgebieden 1 en 2 is sinds ongeveer 2000 sprake van stabilisatie en in deelgebied 3 vanaf 1996 van netto aanwas. In deelgebieden 4 en 5 is sprake van afslag maar de mate waarin neemt geleidelijk af.



Figuur 2.61 Luchtfoto van de kwelderrand onder Oerderduinen in 2014 met van west naar oost de deelgebieden 1 t/m 5.



Figuur 2.62. Dynamiek van de kwelderrand onder het Oerderduin in de periode 1949-2014.

Tabel 2.8 Netto aanwas en afslag van de kuststrook onder het Oerderduin in de verschillende perioden in m². Netto aanwas is in zwart en netto afslag is in rood weergegeven. In grijs niet significante veranderingen als gevolg van de foutenmarge bij de luchtfoto-interpretatie.

Deel	Lengte (m)	1949-'59	1959-'69	1969-'79	1979-'90	1990-'00	2000-'09	2009-'14
1	400	-1.807	232	2.951	-6.505	-3.363	-241	-1350
2	475	-2.038	5.170	6.889	-995	-2.008	3.135	-1486
3	200	-2.151	1.617	5.553	-6.980	791	969	301
4	500	22.084	5.163	7.638	-20.171	-6.435	-3.994	-1.548
5	500	77.550	34.498	32.018	-20.168	-17.744	-12.916	-5.453
totaal	2.075	93.638	46.680	55.049	-54.819	-28.759	-13.047	-9.537

In tabel 2.9 staat de gemiddelde snelheid van aanwas en afslag. De gemiddelde snelheid (m per jaar) is de netto aanwas of afslag per deelgebied gedeeld door de breedte van het deelgebied en het aantal jaren van de waarnemingsperiode. Snelheden < 0,3 m per jaar vallen binnen de onnauwkeurigheid van de luchtfoto-interpretatie. Opvallend is dat in de periode vóór 1979 er eerst een toename van de aanwassnelheid optrad voordat er netto afslag ging optreden. Na 1986 vond geen versnelde afslag plaats maar juist een afname in de gemiddelde snelheid.

Tabel 2.9 Gemiddelde snelheid in meters per jaar van aanwas (+) en afslag (-) van de kuststrook onder het Oerderduin in de verschillende perioden in m per jaar. Netto aanwas is in zwart en netto afslag is in rood weergegeven. In grijs niet significante veranderingen als gevolg van de foutenmarge bij de luchtfoto-interpretatie.

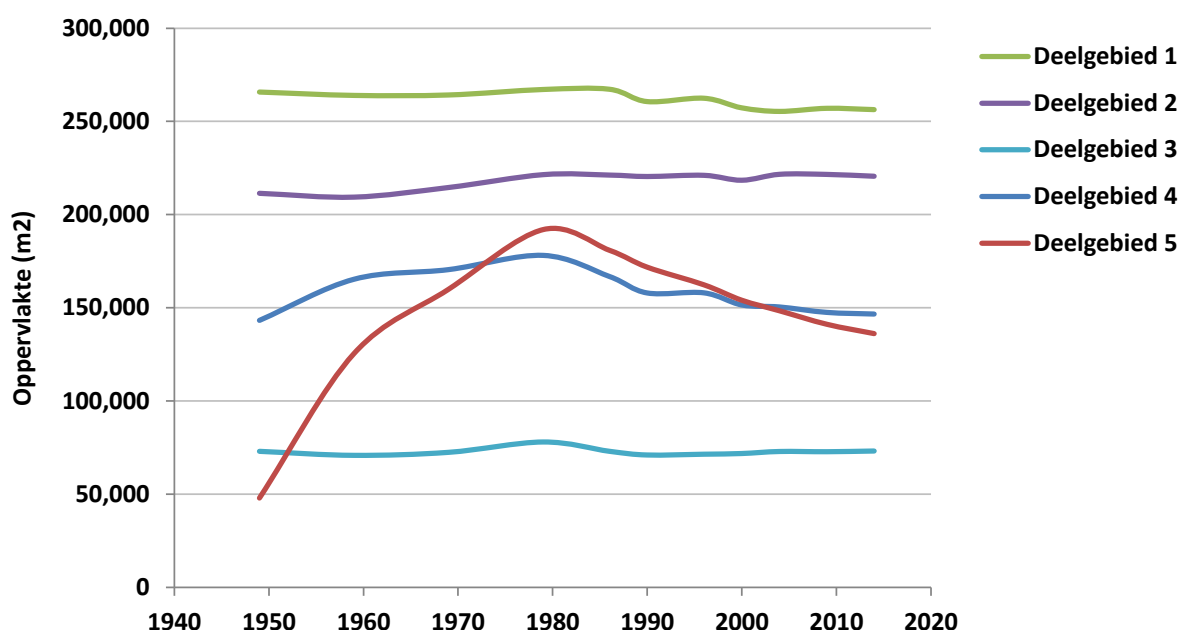
Deel	Lengte (m)	1949-'59	1959-'69	1969-'79	1979-'90	1990-'00	2000-'09	2009-'14
1	400	-0.5	0.1	0.7	-1.5	-0.8	-0.1	-0.7
2	475	-0.4	1.1	1.5	-0.2	-0.4	0.7	-0.6
3	200	-1.1	0.8	2.8	-3.2	0.4	0.5	0.3
4	500	4.4	1.0	1.5	-3.7	-1.3	-0.9	-0.6
5	500	15.5	6.9	6.4	-3.7	-3.5	-2.9	-2.2
totaal	2.075	4.5	2.2	2.7	-2.4	-1.4	-0.7	-0.9

2.10.6 Conclusies en discussie

Een periode van netto aanwas wordt na 1979 in alle deelgebieden afgewisseld met een periode van netto afslag. Na 1990 nam de snelheid van afslag af en sloeg in bepaalde deelgebieden weer om in



netto aanwas. Over de gehele kwelderrand gezien nam de gemiddelde snelheid van afslag af van 2,4 m per jaar tussen 1979 en 1990 naar 0.8 in de periode 2000-2014. Er lijkt al met al geen sprake van een monotone trend in een bepaalde richting. De trend in aanwas en afslag verschilde ook tussen de verschillende deelgebieden als gevolg van lokale verschillen in dynamiek van de kustmorfologie. De kwelderstrook is in deelgebied 3 op z'n smalst en door de afslag reikte de kwelderrand op een gegeven moment bijna tot aan de duinvoet. Inmiddels is in dit deel weer sprake van enige aangroei. De grootste dynamiek trad op in de meest oostwaarts gelegen deelgebieden 4 en 5. Dit heeft te maken met het feit dat in dit deel van Oost-Ameland de groei van de eilandstaart rond 1949 nog in volle gang was. De Honkende in de afgelopen decennia een grote mate van bewegelijkheid, het zogenaamde 'kwispelen' (De Groot *et al.* 2015). Dit proces duurde tot omstreeks 1979, het meest recente omslagpunt van aanwas naar afslag. Vanaf dat moment begon een periode met regressie, die de laatste jaren steeds weer afvlakt (figuur 2.63). Na 1986 (moment van de start van de gaswinning) vond dus geen versnelde afslag plaats maar juist een afname in de gemiddelde afslagsnelheid. De langjarige dynamiek van de eilandstaart lijkt daarmee veel belangrijker dan een eventueel effect van bodemdaling.



Figuur 2.63. Dynamiek in het oppervlak (m²) van de afzonderlijke deelgebieden sinds 1949.

2.11 Overige relevante abiotische factoren

2.11.1.1 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. 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.

2.11.1.2 Waterstanden

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

- astronomisch getij;
- op- en afwaaiing door wind;

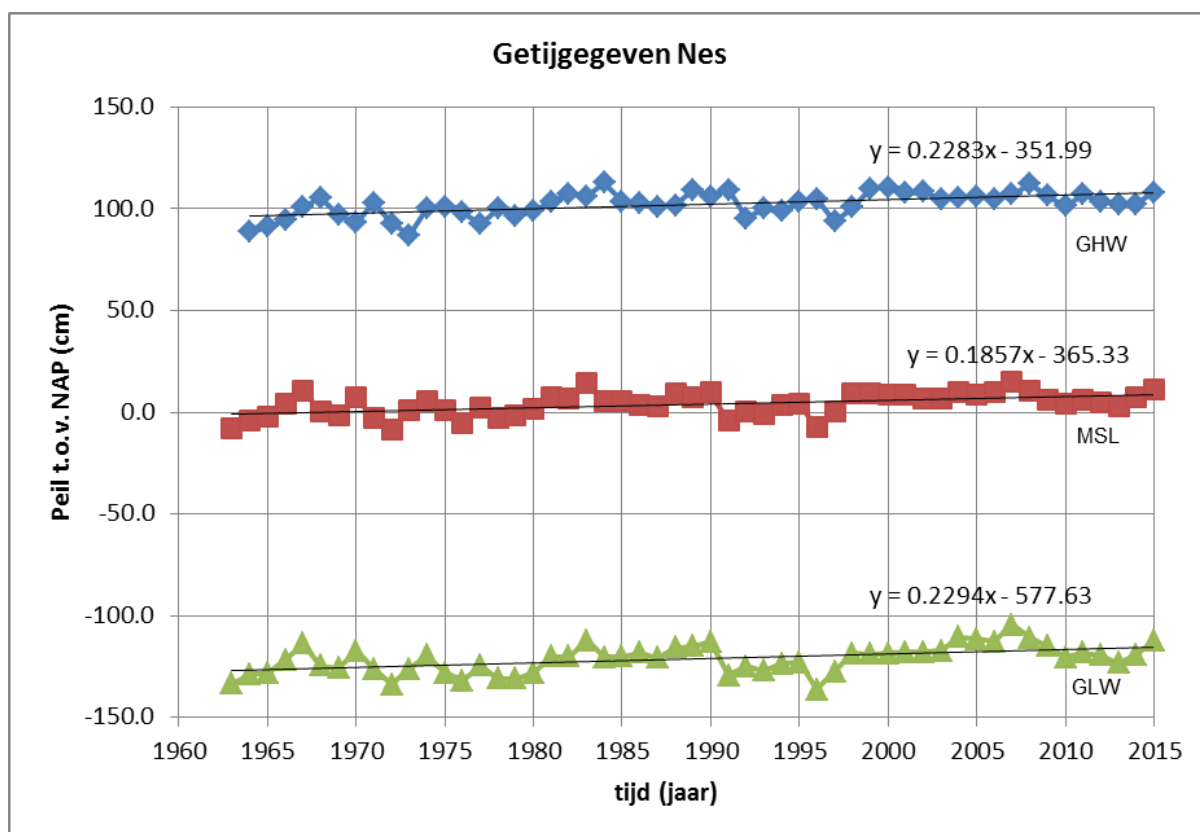
- langetermijnveranderingen in het gemiddeld zeeniveau door klimaatsverandering.

2.11.1.3 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 Neerlands Reid en in iets mindere mate voor De Hon op Ameland-oost (zie Eysink et al, 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 Noordzeezijde 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 Neerlands Reid (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 overfloeding van De Hon.

Dit station wordt gebruikt voor het verzamelen van de jaarlijkse waarden van gemiddeld hoogwater (GHW), gemiddeld zeeniveau (MSL), halftij i.e.(GHW+GLW)/2, gemiddeld laagwater (GLW) en de hoogwateroverschrijdingsfrequentie. Het blijkt dat het jaargemiddelde halftij 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 overstroomd, 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 2.64 en zijn de jaarlijkse hoogwateroverschrijdingsgegevens samengevat in tabel 2.10.

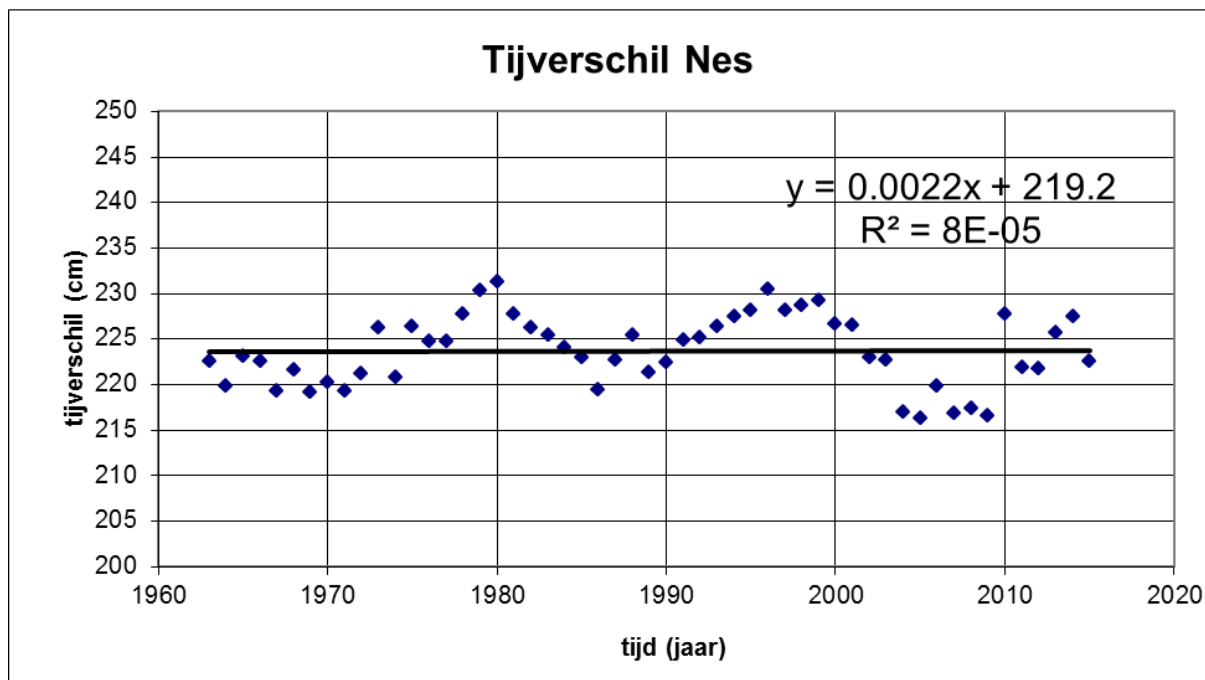


Figuur 2.64 Verloop gemiddeld hoogwater, gemiddeld zeeniveau en gemiddeld laagwater Nes

Het tijverskil in Nes schommelt tussen circa 2,16 m en 2,31 m (figuur 2.65) 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 tijverskil over de hele periode is 223 cm. Dit langjarige gemiddelde vertoont in de beschouwde periode geen trend tot verandering. Het is waarschijnlijk dat het tijverskil bij Nes in de komende decennia niet significant zal veranderen.



Figuur 2.65 Verloop gemiddeld tijverskil Nes

In de voorgaande rapportage zijn de overschrijdingsgegevens van 1981-2010 gepresenteerd samen met langjarig gemiddelde overschrijdingen. In dit verslag zijn deze gegevens aangevuld tot 2015. Tabel 2.10 laat een aantal extreme stormvloed en in de periode 2011-2015 zien. Het niveau van NAP+2,5 m werd in Nes in 2012 eenmaal en in de andere vier jaar (2011, 2013, 2014 2015) tweemaal per jaar overschreden, en het niveau NAP+3,0 m tweemaal in 2013, eenmaal in 2014 en eenmaal in 2015. In 2013 werd een waterstand bereikt van NAP + 3,3 à 3,4 m. Extreme waterstanden zijn in de afgelopen 5 jaar vaker voorgekomen dan de 5 jaar periode daarvoor.

Het niveau van NAP+2,0 m werd in deze periode (2011-2015), behalve in 2015, beneden het gemiddelde aantal overschreden. Dit geldt ook voor het niveau van NAP+1,5 m, waarbij de lagere delen van de kwelders onderlopen. Procentueel is het verschil hier echter beduidend kleiner dan op het niveau van NAP+2,0 m. Het betekent dat de kwelders iets minder frequent werden overstroomd en dat gemiddeld het overstroomde oppervlak en de waterdiepte per overstrooming kleiner waren dan gemiddeld. Hierdoor kan de jaarlijkse opslibbing op de kwelders in deze periode lager zijn geweest dan gemiddeld.



Tabel 2.10 Hoogwateroverschrijdingsgegevens Nes

Niveau (m + NAP)	Aantal HW-overschrijdingen per jaar	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2020	2021-2030	2031-2040	1981-2014 Gem.
3.5	Gem.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.9	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.8	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.7	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.6	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	1.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.4	1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.3	2.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.2	3.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.1	5.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	7.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.9	10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.8	14.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.7	20.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.6	30.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	44.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.4	65.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	95.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	141.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1	212.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	321.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9	400.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	495.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.7	565.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.6	622.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	660.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	681.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	691.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	698.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	701.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	703.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aantal HW's / jaar	705.8	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705	705.8

2.11.1.4 Zeespiegelstijging

Bodemdaling en zeespiegelstijging zijn in zekere mate optelbaar wat betreft de lokale gevolgen. In beide gevallen komt het zeewater hoger te staan ten opzichte van kwelders en duinen. De monitoring van de bodemdaling op Ameland was echter van oorsprong met name gericht op het vaststellen van de gevolgen van de bodemdaling op de natuur, conform het verzoek van It Fryske Gea. Zeespiegelstijging (ZSS) speelde hierin geen rol. Op dat moment werd nog uitgegaan van een continue stijging van circa 18 cm per eeuw inclusief een zogeheten geo-synclinale daling van het hele gebied.

Zorg over versnelde zeespiegelstijging werd pas concreet voor Nederland met het uitbrengen van het advies van de Deltacommissie op 3 september 2008 “Een veilige toekomst voor de Nederlandse delta”.

Ook in het lange termijn monitoringplan voor de bodemdaling op Ameland: “Monitoringsplan Ameland bodemdaling 2006-2020” speelde zeespiegelstijging daarom nog geen rol. In een nieuw op te stellen lange termijn plan voor de periode na 2020 zal zeespiegelstijging in de toekomst ongetwijfeld in de vorm van de dan bekende scenario's medebepalend voor het programma worden.

Dit wil echter niet zeggen dat zeespiegelstijging geen rol heeft gespeeld in de monitoring, maar het belang was tot op heden wel ondergeschikt (maar niet te verwaarlozen) zoals mag blijken uit de volgende globale gegevens:

Tabel 2.11 Bijdrage van zeespiegelstijging aan de relatieve bodemdaling voor de oostpunt van Ameland

Periode 1986-2017	Kwelder (midden Neerlands Reid)	Wadrand (ter hoogte Oerderduin)	Hart schotel (duinvallei ten westen van gaswinlocatie)
Bodemdaling	16 cm	24 cm	38 cm
Zeespiegelstijging	6 cm	6 cm	6 cm
Totaal	22 cm	30 cm	44 cm
Aandeel ZSS	27%	20%	16%
Relatieve ZSS per eeuw	73 cm/eeuw	100 cm/eeuw	147 cm/eeuw

Duidelijk blijkt wel dat de monitoring zoals die in 1987 is gestart met het oog op mogelijk toekomstige zeespiegelstijging een goede indicatie vormt voor wat zou kunnen gebeuren in het hele waddengebied.

Voor de projecties naar de nabije toekomst en in dit rapport en het opstellen van een nieuw monitoringsplan voor na 2020 is uiteraard de vraag aan de orde welke scenario's in beschouwing moeten worden genomen. In het advies van 2008 werden verschillende scenario's voor zeespiegelstijging in beschouwing genomen, waaronder een toen extreem geacht scenario van 140 cm



per eeuw. Is dat echter voldoende concreet en realistisch en per wanneer gaat dat scenario dan in werking?

Nu heeft het onderzoek op dit gebied na 2008 niet stilgestaan en is er nog altijd veel discussie over toekomstige zeespiegelstijging. Zelfs of het zeespiegelniveau in de Noordzee niet gaat dalen als Groenland afsmelt door verandering van de gravitatie is geopperd.

Feit is in ieder geval dat aan het einde van het Eemian, het voorgaande interglaciaal, Groenland vrijwel afgesmolten was en de zeespiegel ook in Nederland circa 6 meter hoger stond dan nu het geval is. Ook is bekend dat de zeespiegel aan het einde van het Eemian nog even met hoge snelheid steeg (orde 2 meter per eeuw). De huidige voorspellingen voor het einde van deze eeuw variëren nog steeds tussen 60 cm per eeuw en 140 cm per eeuw. Het zou echter ook nog sneller en verder kunnen gaan. Een goede voorspelling voor de toekomstige zeespiegelstijging is echter nu nog niet te geven; het voorspellen van bodemdaling door gaswinning is hiermee vergeleken kinderspel.

Tot op dit moment (2017) vertoont de stijging van de zeespiegel langs de Nederlandse kust (nog) geen versnelling. De metingen van Rijkswaterstaat op diverse meetpalen zijn zeer nauwkeurig en betrouwbaar. Een analyse van deze waarnemingen van de meetpaal Nes, die maatgevend is voor de getijden aan de wadzijde van Ameland toont aan dat het gemiddeld zeeniveau over de afgelopen 30 jaar gestegen is met een snelheid van ruim 18 cm per eeuw en zelfs iets minder als gecorrigeerd wordt voor de natuurlijke astronomische cycli. Opgemerkt moet worden dat de hoogwaters te Nes meer toegenomen zijn, namelijk bijna 23 cm per eeuw over de afgelopen 52 jaar (zie elders in dit hoofdstuk voor een nauwkeurige uitwerking). Dit is uiteraard van belang voor het bepalen van de overstromingsfrequentie van de kwelders.

Hoewel voor de Nederlandse kust (en zuidelijke Noordzee) nog geen versnelling van de zeespiegelstijging is waar te nemen, betekent dat niet dat dit elders ook het geval is. Wie echter denkt dat alleen voorspellingen moeilijk zijn en veranderingen in het verleden wel makkelijk te bepalen, vergist zich. Het is zeer gecompliceerd om te komen tot een zuivere schatting van zeespiegelstijging. Niet alleen stijgen en dalen de continenten, ook ingrepen als baggeren en dijk aanleg verstoren de meetreeksen. De eerste betrouwbare signalen betreffen metingen met behulp van satellieten. Dan meet je integraal de hele wereld en hebt plotseling niets meer te maken met getijden en andere cycli als je maar lang en breed genoeg meet. Helaas valt de gehele Noordzee buiten de dekking van de daarvoor geëigende satellieten.

In mei 2015 werd een studie gepubliceerd van wereldwijde zeespiegelstijging met behulp van satellieten. Hiermee werden eerdere schattingen op basis van satellietgegevens verfijnd, want ook satellieten hebben zo hun beperkingen vanwege de benodigde correcties nodig voor atmosferische omstandigheden. De schatting kwam uit op een waarde tussen $+2.6 \pm 0.4$ mm jr⁻¹ en $+2.9 \pm 0.4$ mm jr⁻¹ (Nature Climate Change 5, 565–568 (2015)). Een tweede belangrijke doorbraak in het onderzoek naar recente zeespiegelstijging werd februari 2016 gepubliceerd door onderzoekers van de Rutgers University. Zij deden onderzoek naar zeespiegelstijging in de afgelopen 2800 jaar en kwamen tot de conclusie dat de mondiale stijging na 1993 is opgelopen tot 30 cm per eeuw. Lange tijd daarvoor was de mondiale stijging circa 14 cm per eeuw. Belangwekkend was het feit dat er nu voor het eerst een jaartal voor de omslag werd vastgesteld: 1993 en een goed onderbouwde snelheid van 3 mm per jaar. Op basis van de best beschikbare informatie moeten we dus wel concluderen dat wereldwijd de zeespiegel versneld stijgt, maar dat dit in de Noordzee en Waddenzee (op basis van zeer nauwkeurige metingen en analyses) niet meetbaar het geval was voor de periode van de monitoring van de bodemdaling op Ameland tot op heden. De reden hiervoor is niet bekend maar kan gelegen zijn in luchtdruk verdelingen en voortplanting van de getijdengolf in de Noordzee.

Tot op heden zijn er dus geen grote veranderingen opgetreden in het gemiddelde zeeniveau en het ligt niet in de verwachting dat dit nu plotseling zal gebeuren. Dat betekent dat aangenomen mag worden dat de huidige trendlijn zich binnen de looptijd van het monitoringsplan 2006-2020 niet sterk zal wijzigen. Voor een beeld van de toekomst moeten we dus vooral kijken naar wat deskundigen adviseren over de periode na 2020 waarbij voor de Nederlandse situatie die deskundigheid wat betreft toekomstscenario's is neergelegd bij het KNMI. Ten aanzien van de winning van Delfstoffen is TNO echter de belangrijkste adviseur van het ministerie van Economische Zaken. Vanwege de winning van onder andere aardgas van onder de Waddenzee heeft EZ (evenals in 2007 en 2011) een herzien advies gevraagd aan TNO betreffende de komende periode 2016-2021 en om dat advies uit te brengen in overleg KNMI en



Deltaris. Dat heeft geleid tot de volgende formulering van het geadviseerde beleidsscenario per 1.1.2016 voor de zeespiegelstijging voor delfstofwinning onder de Waddenzee (advies TNO aan EZ, dd 27 juni 2016, referentie AGE 16-10.066).

Beleidsscenario, actualisering per 1-1-2016

De snelheid van relatieve zeespiegelstijging (Z):

- tot 2021: $Z(J) = Z(2007) + (J - 2007) \cdot A1$
- met $Z(2007) = 2,181$ mm/jaar
- en $A1 = 0,0076$ mm/(jaar)²
- m.i.v. 2021 $Z(J) = Z(2021) + (J - 2021) \cdot A2$
- met $A2 = 0,058$ mm/(jaar)²

De waarden voor $Z(J)$ gelden aan het begin van het kalenderjaar J.

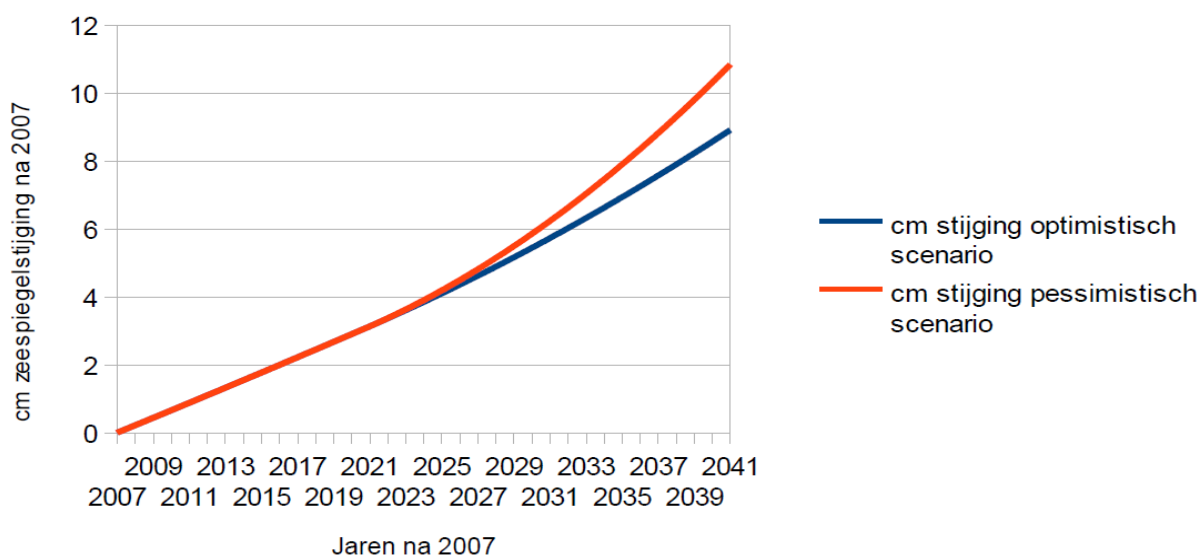
De coëfficiënten A1 en A2 representeren acceleratie in de zeespiegelstijging.

Het scenario-gedeelte 'm.i.v. 2021' wordt tot 1.1.2021 beschouwd als een richt-scenario. Per die datum zal op grond van de dan bestaande informatie en inzichten over het gedrag van de zeespiegel het scenario voor (tenminste) de dan komende 5 jaar worden vastgesteld, alsmede een nieuw richtscenario voor de periode daarna.

Bovenstaand scenario is redelijk optimistisch-realistisch en gaat uit van een zeespiegelstijging van circa 40 cm in het jaar 2100. Voor de periode na 2021 is er dus nog veel onduidelijkheid. Om die reden is besloten ook uit te gaan van een meer pessimistisch scenario, namelijk een zeespiegelstijging van circa 70 cm in 2100. Dit is het midden van het hoge scenario van KNMI 2014 en geeft dan een bandbreedte waarbinnen toekomstige monitoringactiviteiten (monitoringsplan 2020-2030) bijgesteld, dan wel opgezet kunnen worden. Dit laatste scenario kan in beeld gebracht worden door de volgende toevoeging.

- m.i.v. 2021 $Z(J) = Z(2021) + (J - 2021) \cdot A3$
- met $A3 = 0,15$ mm/(jaar)²

De berekende trendlijnen zijn weergegeven in onderstaande figuur 2.66 voor de periode 2007 tot 2040.



Figuur 2.66 Zeespiegelstijging scenario's waarmee in de in dit rapport gepresenteerde monitoring en effectbeoordeling rekening wordt gehouden.



Processen

Tot slot iets over processen van belang bij het middelen en berekenen van trends en bepalen en inschatten van effecten. Bij getijdebewegingen spelen vele processen een rol. Sommige van die processen vormen een vast patroon. De belangrijkste zijn de volgende 4 patronen.

Ten eerste is sprake van een basis-getijde. Een min of meer sinusoïde beweging van het water met een cyclus van gemiddeld 12 uur en 24 minuten. Dit is de basale getijdebeweging die wordt veroorzaakt door de omloop van zon, maan en de draaiing van de aarde zelf.

De volgende cyclus is springtij en doodtij. Deze volgt de maancyclus van 29.5 dagen. Springtij is in Nederland 3 dagen na volle maan. Hoogwaters bij Ameland variëren van +1.25 m NAP met springtij tot +0.80 m NAP met doodtij. Voor de regelmatige overfloeding van kwelders is dat een belangrijk gegeven; het betekent dat gebieden die lager liggen dan +1,25 m NAP regelmatig onder lopen, zelfs zonder effecten van lage druk en wind-opzet.

Daarop volgt de jaarcyclus. In de winter is de afstand zon-aarde het kleinst en zijn er gemiddeld veel perioden met lage luchtdruk. In die periode zijn de waterstanden gemiddeld hoger en zijn de getijden het heftigst. Hoogwaters tijdens springtij liggen dan rond de +1.35 m NAP en zomers circa 20 cm lager. Om die reden overstromen de kwelders 's winters vaker dan zomers en moet de zogeheten hoogwaterfrequentie om de invloed van overfloedingen op nesten en plantengroei te bepalen apart berekend worden voor de broedperiode en de periode van vegetatieontwikkeling.

Minder bekend is de 18.6 jarige cyclus ten gevolge van een cyclus in het maanvlak. Dit zou je kunnen beschouwen als een traag en minder drastisch spring- en doodtij. De hoogwaters nemen geleidelijk met 5 cm toe en de laagwaters met 5 cm af. Met de toename stijgt ook het gemiddeld zeeniveau met circa 2 cm. Het lijkt allemaal niet veel, maar het gaat wel om een toename in de overfloedingshoogte van 7 cm over een periode van 9 jaar. Dat is eenzelfde grootte orde als 30 jaar zeespiegelstijging. Om die reden moeten schattingen voor de snelheid van zeespiegelstijging rekening houden met deze periode van 18,6 jaar.

Tot slot moet opgemerkt worden dat zeespiegelstijging en met name de langzame cycli ook doorwerken naar het zoete grondwater. Zo kan de getijde beweging van de zee onder de kwelder gevolgd worden tot een afstand van 50 meter van de wadrand met een vertraging van maar enkele minuten om de eenvoudige reden dat het zoete water drijft op het zoute water daaronder en het verhang (de afstroming) afneemt met hogere zeestanden.

Een laatste opmerking betreft het weer. Het weer is veel moeilijker te voorspellen en voegt een variatie toe die zich slechts over jaren laat bepalen. Het gaat dan vaak om abrupte verschijnselen, zoals droge zomers of stormen die in het ene jaar heftiger zijn dan in het andere jaar en het beeld volledig kunnen overheersen. Mede om die reden is destijds besloten jaarlijks de resultaten van de monitoring met de commissie door te nemen en de monitoringsrapporten maar eens per circa 6 jaar uit te brengen.

2.11.1.5 Neerslag en verdamping

In de voorgaande rapportages zijn de gegevens van 1984-2010 gepresenteerd. In deze rapportage worden de gegevens van 2010-2015 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 decadecijfers, maandcijfers en jaartotalen.

Neerslag

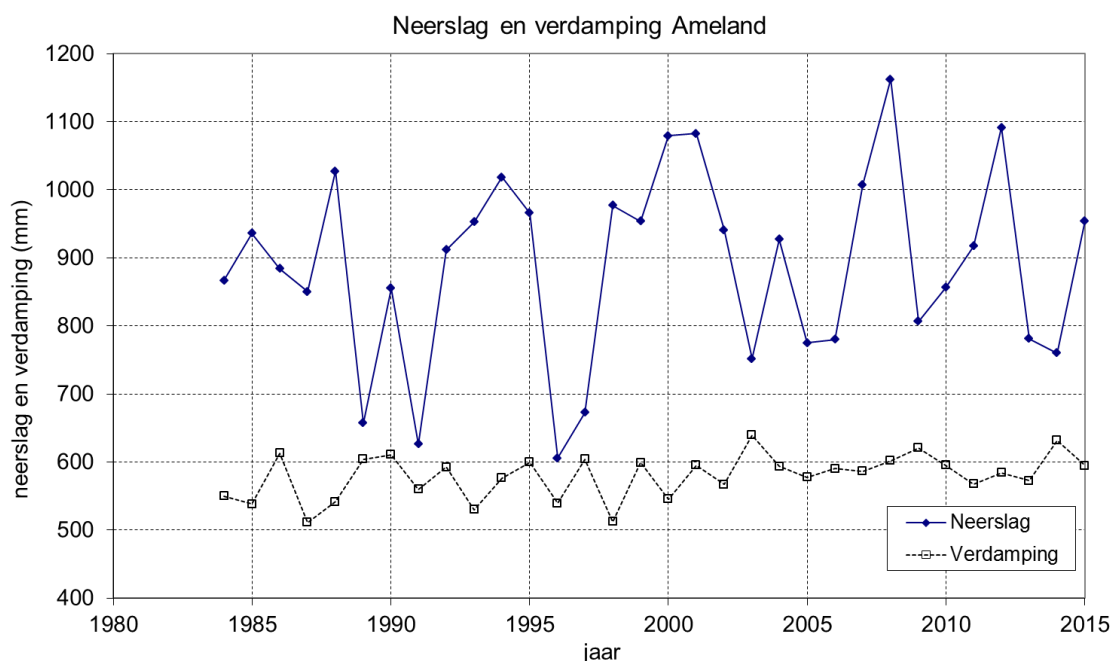
De gemiddelde neerslag in Nes in de periode 1984-2010 bedroeg 885,7 mm/jaar en was daarmee 91,8 mm hoger dan het lange termijn gemiddelde van 1951-1980. Gemiddeld over de periode 2011-2015 is de neerslag nog hoger, met 900,9 mm/jaar, wat ook gold voor de 5 jaar daarvoor (met 922,6 mm/jaar). Over de gehele periode 1951-2015 is er dus een toenemende trend te zien in het lange termijn gemiddelde van de jaarlijkse regenval in Nes (zie figuur x).

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 1984-2015 bedroeg 579,4 mm, wat praktisch



gelijk is aan het gemiddelde van 579,0 mm in Den Helder over de periode 1965-1985. De verdamping op Ameland in de periode 2011-2015 is iets hoger dan de gemiddelde verdamping, 590 mm/jaar. In het vrij droge jaar 2014 was ook de verdamping met een waarde van 631,6 mm relatief extreem. Het neerslagoverschot in dat jaar benaderde het geringe neerslagoverschot van de droge jaren 1989, 1991, 1996 en 1997 (figuur 2.67).



Figuur 2.67 Jaarlijkse neerslag en verdamping te Nes

2.12 Conclusies

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. Daarna worden de resumerende conclusies getrokken met betrekking tot de effecten van de bodemdaling door gaswinning.

2.12.1 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 15 miljoen m³ door gaswinning ten opzichte van de natuurlijke volumeveranderingen significant is.

2.12.2 Noordzeekust en kustsuppletie

De eerder getrokken conclusie blijft gerechtvaardigd dat de bodemdaling door gaswinning echter 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.

2.12.3 Zeegat en de Hon

De hoofdgeul van de Holwerderbalg heeft in 2012 op de buitendelta de functie van het Pinkegat overgenomen. Het ziet ernaar uit dat het Pinkegat versneld aan het verdwijnen (verzanden) is. Als de Holwerderbalg zich inderdaad tot een enkele geul zal ontwikkelen en het Pinkegat zal verdwijnen dan zal de situatie weer gunstig worden voor de groei van de oostpunt van Ameland. De geulontwikkeling in het zeegat toont ook dat verschuiving van de laagwaterlijn naar het westen in 2012 zich lijkt te hebben gestopt. Maar de ontwikkeling van de positie van de oostpunt van Ameland (Fig.2.4.7) in de periode 2012-2015 (gebaseerd op Jarkus gegevens) laat de omslag van afslag naar groei nog niet zien.

2.12.4 Waddenzee bekken

De laatst beschikbare Vakloding voor het gebied stamt uit 2012. Aan de hand daarvan is de totale toename van hoeveelheid sediment in de vloedkom van Pinkegat ten op zichte van 2006 bepaald op 1,96 miljoen m³, ondanks de bodemdaling voor de periode 2006-2012 (van hoeveel volume?). Dit komt overeen met een stijging van ruim 3 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 het 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. Bepaling van eventuele effecten van bodemdaling aan de hand van Lidar metingen is alleen mogelijk na een lange tijd meten.

2.12.5 Wadplaat sedimentatie

In het waddengebied ten zuiden van Oost-Ameland wordt de sedimentatie aan het wadoppervlak sinds 2000 gemeten door middel van spijkermetingen. In 2006 is een waddengebied ten zuiden van West-Ameland aan het meetprogramma toegevoegd als referentiegebied zonder bodemdaling.

Indien het plaatgebied Oost-Ameland waarin de meetstations liggen als geheel wordt genomen is er slechts bij 2 stations sprake van enige erosie in de periode 2000-2016 en is er sprake van een gemiddelde sedimentatie van 6,2 mm/jaar. Maar vanwege de diepe daling blijft daar netto gemiddeld 2,8 mm/jaar van over. In het gebied bij West-Ameland is geen bodemdaling en daar wordt een gemiddelde sedimentatie gemeten van 7,1 mm/jaar, wat overeenkomt met Oost-Ameland.

Slechts in een smalle strook van ongeveer 2 km lengte vlak langs de kust bij Het Oerd, waar de bodemdaling maximaal is, is de sedimentatie onvoldoende om de bodemdaling volledig te compenseren. De netto maaiveldverlaging bedraagt daar ongeveer 5 mm/j. Bij Oost-Ameland wordt erosie gemeten aan de rand van de wadplaat op de overgang naar de eerste geul die het onderzoeksgebied op ongeveer een km afstand van Ameland begrenst.

2.12.6 De erosie op de Engelsmanplaat

De erosie op de Engelsmanplaat is zeker niet veroorzaakt door de bodemdaling. Het is ook zeer onwaarschijnlijk dat de bodemdaling de erosie heeft versterkt.

De verlaging van de Engelsmanplaat komt door erosie. 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.

2.12.7 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.



2.12.8 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).

2.12.9 Conclusies m.b.t. effecten bodemdaling

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

- Conform de voorgaande rapportage uit 2011 is er geen merkbare effect geconstateerd op de ontwikkelingen van de kustlijn, de oostpunt van Ameland, de geulen en platen in het Waddenzeebekken.
- In tegenstelling tot de eerdere rapportage is er nu geconstateerd dat het werkelijke zandsuppletievolume voor het onderhoud van de Noordzeekust van Ameland hoger is geweest dan in 1987 in het kustlijnmodel was uitgegaan, namelijk 0,5 miljoen m³/jaar i.p.v. 0,2625 m³/jaar, mede als gevolg van bodemdaling door gaswinning. Dat is dus bijna 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 wel significant t.o.v. de ontwikkeling van het sedimentvolume van het gebied.

2.12.10 Literatuur

- Arens, B., 2007. Duurzame verstuiving in de Hollandse duinen: kans, droom of nachtmerrie: eindrapport fase 1. 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, Boschap, bedrijfsschap voor bos en natuur.
- BCA, 2008. Bodemdaling Ameland. <http://www.waddenzee.nl/Home.bodemdaling.0.html>. Bodemdalingscommissie Ameland.
- De Groot, A.V., A.P. Oost, R.M. Veeneklaas, E.J. Lammerts, W.E. van Duin, B.K. van Wesenbeeck, E.M. Dijkman & E.C. Koppenaal, E. C. (2015). Ontwikkeling van eilandstaarten: geomorfologie, waterhuishouding en vegetatie. Rapport 2015/OBN198-DK. VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren. 109 p.
- 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.
- Janssen, M. en Van Gelderen, N., 1993. Dynamisch kustbeheer: een verkennende studie naar de mogelijkheden voor herstel van natuurlijke processen in de zeereep. Duinbehoud, Leiden.
- 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.
- 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.
- 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. 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.
- Sanders, M.E. & P.A. Slim (2000). Monitoring kwelderrand Oerderduinen; een onderzoek naar de effecten van bodemdaling door gaswinning op de morfologie en vegetatie van de kuststrook ten zuiden van de Oerderduinen op Ameland-Oost. Alterra-rapport 007, Alterra Wageningen UR. 49 p.
- Slim, P.A., Heuvelink, G.B.M., Kuipers, H., Dirkse, G.M. en Van Dobben, H.F., 2005. Vegetatiemonitoring en geostatistische vegetatiekartering duinvalleien 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.
- Slim, P.A., R.M.A. Wegman, M.E. Sanders, H.P.J. Huisjes & H.F. van Dobben (2011). Monitoring kwelderrand Oerderduinen. In: Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost. Evaluatie na 23 jaar gaswinning. Deel 1: pp. 125-175.
- TAW, 2002. Leidraad Zandige Kust. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- 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.
- Vlas, J. de, 2005. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Evaluatie na 18 jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland. Assen, 2005.
- Vlas, J. de, 2011. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Evaluatie na 23 jaar gaswinning. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland. Assen, 2011.
- VWS, 1990. 1e Kustnota: Kustverdediging na 1990. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- VWS, 2000. 3e Kustnota: Traditie, trends en toekomst, [S.I.]. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.



Bijlage 2A. Meetdata Oost-Ameland.

DATUM	gemiddelde verschilmetingen cm																		
	S00	S10	S20	S30	S40	S50	S60	S70	S80	S90	S100	S110	S120	S130	S140	S150	S160	S170	S180
jul-00	0,00			0,00	0,00														
aug-00	0,08	0,00	0,00	-0,25	0,13														
sep-00	-0,65	0,10	-2,10	0,05	0,15														
nov-00	0,03	0,07	-2,50	0,65	0,07														
dec-00	-0,17	0,07	-2,80	0,93	0,57														
jan-01	0,48	0,55	-1,53	0,65	0,25														
mrt-01	0,68	3,05	-0,02	0,55	0,60														
aug-01	1,30			1,78	0,52	0,00													
okt-01	1,35	3,25		1,96	2,10	0,80													
nov-01	1,25	0,90	0,28	2,50	0,42														
jan-02	0,70		-1,34	1,64	-1,49	0,64													
mrt-02	-0,19	3,28	-1,16	1,64	-0,40	1,14	0,00			0,00	0,00	0,00							
jun-02	1,88	4,05	0,02	3,07	-2,64	1,59	3,63	0,00	0,00	1,76	-2,69	-1,70							
aug-02	1,59	2,83	0,13	3,39	-1,99	2,26	4,13	2,61	0,50	2,03	-1,40	-0,45							
okt-02	1,15	2,60	0,19	3,50	-2,19	2,50	4,77	3,01	1,09	2,86	-4,10	3,33							
nov-02	-0,21	2,24	-0,41	3,53	-1,84	2,61	3,03	2,76	1,10	4,63	-3,63	2,16							
jan-03	1,26	2,03	-0,21	4,14	-2,09	2,74	3,15	2,61	-0,64	4,10	-3,13	2,76							
mrt-03	0,95	4,29	0,13	4,11		5,39	3,92	2,66	-0,19	3,46	-2,30	0,32	0,00	0,00					
jun-03	2,24	6,65	0,45	4,23	-1,01	7,40	3,92	3,48	2,74	2,50	-1,66	2,35	1,43	1,98					
okt-03	1,51	6,20	2,81	3,90	-0,74	5,60	4,70	5,34	2,41	2,30	-1,68	2,58	1,68	2,54					
nov-03	1,86	6,29	1,80	4,77	-0,60	7,61	4,52	5,70	4,03	1,11	-1,73	-4,08	0,25	3,05					
dec-03	1,79	6,45	1,11	5,24	-0,47	7,69	4,18	5,75	3,94	0,74	-1,64	-5,44	1,39	3,13					
mrt-04	2,01	7,58	-0,43	5,91	-1,16	6,29	3,92	4,71	3,21	-0,01	-1,85	0,54	2,01	2,15	0,00	0,00			
mei-04	1,50	8,25	0,03	6,67	1,45	3,46	5,15	5,09	3,75	-0,40	-1,24	-0,24	2,53	2,64	0,40	0,74			
jul-04	2,61	7,65	0,58	8,24	2,23	5,59	4,83	5,15	2,80	0,14	-1,21	3,76	3,00	5,59	1,21	1,64			
aug-04	3,40	9,56	1,21	11,39	3,50	6,71	5,17	6,49	4,06	-0,16	-1,01	4,40	4,99	6,58	1,63	2,96			
okt-04	3,64	13,41	1,33	10,27	5,08	5,79	5,42	6,04	4,50	-0,80	-1,16	-2,59	5,80	6,48	1,23	3,36			
dec-04	3,74	13,46	1,36	11,27	5,33	5,54	5,68	6,09	4,28	-1,36	-0,65	-1,59	5,29	6,46	2,05	3,66			
feb-05	3,14	10,69	1,45	10,46	5,06	4,58	4,78	4,74	3,48	-3,34	-0,46	1,33	4,63	6,04	2,58	4,04			
apr-05	3,85	12,29	1,30	10,53	5,66	5,31	5,53	5,61	4,26	-3,64	-1,00	-1,51	5,45	6,38	2,75	4,34			
jun-05	5,21	11,98	3,63	11,81	5,93	6,80	9,77	6,00	5,04	-2,15	-0,01	-2,10	5,89	7,98	3,05	5,36			
aug-05	9,41	12,51	2,64	12,60	6,44	7,20	9,00	7,15	5,28	-2,16	1,89	-1,04	6,20	8,65	4,50	7,06			
okt-05	8,60	13,39	3,91	12,76	6,81	7,65	9,02	7,35	6,30	-2,78	0,59	0,90	6,31	7,98	4,10	7,31			
dec-05	7,76	13,10	3,13	12,80	6,45	7,50	8,15	6,59	5,73	-4,34	2,19	1,01	6,28	7,41	4,08	7,05			
mrt-06	6,63	13,38	2,88	12,51	6,43	7,25	7,83	9,23	5,63	-4,51	2,84	3,85	6,56	7,29	4,30	7,36			
apr-06	8,21	14,01	3,76	13,09	6,64	8,41	6,50	7,35	6,65	-4,76	2,35	4,38	7,09	8,36	5,85	7,40			
jun-06	9,71	14,81	6,21	13,87	6,73	9,18	6,38	7,06	6,65	-3,43	1,93	-0,44	7,19	9,26	5,50	8,78			
aug-06	6,60	14,98	5,74	13,37	6,89	9,01	7,25	8,06	5,64	-4,23	2,05	-0,56	6,83	8,34	5,74	8,31			
okt-06	4,90	14,36	5,26	13,53	6,78	8,78	6,30	7,63	6,04	-5,34	-1,90	-0,60	7,11	8,39	5,48	8,90			
dec-06	5,63	14,25	3,53	12,89	6,74	7,81	4,35	6,38	4,18	-5,16	-0,06	0,06	7,16	7,15	5,94	8,76			
feb-07	6,38	14,54	1,98	13,53	7,35	8,70	3,05	7,48	5,21	-3,88	-1,21	1,73	7,64	8,19	5,00	9,80			
apr-07	5,94	14,89	0,51	14,16	7,81	9,58	2,62	6,46	5,00	-4,28	-0,88	-1,61	7,94	6,63	5,40	10,29			
jun-07	5,98	15,20	1,61	13,43	7,84	9,66	1,50	6,46	4,61	-4,53	-1,29	-3,34	6,94	5,81	3,89	9,51			
aug-07	6,60	15,75	2,29	13,40	8,05	9,00	1,92	5,91	4,08	-6,01	-2,96	-3,73	7,79	6,80	3,14	9,91			
okt-07	6,70	15,84	2,56	13,94	7,73	9,55	1,90	6,10	4,79	-5,21	-0,69	-3,00	7,53	7,59	2,30	10,11			
dec-07	7,53	15,91	0,71	14,10	7,65	9,80	1,68	7,23	4,60	-5,75	1,06	-2,49	8,34	7,21	3,50	10,44			
feb-08	7,05	15,46	-0,21	14,87	7,55	9,85	1,17	5,98	4,85	-6,43	-3,23	-1,80	8,13	6,76	2,39	11,31			
apr-08	8,44	15,88	0,26	16,07	7,83	10,69	0,82	7,08	4,90	-6,30	-4,86	0,10	7,89	6,71	2,14	11,09			
jun-08	9,11	15,39	0,84	15,60	7,85	10,95	1,23	6,40	5,03	-7,86	-3,66	0,85	7,48	6,54	2,01	11,09			
aug-08	9,35	15,95	0,99	14,60	7,59	10,63	2,02	6,83	4,11	-8,01	-6,21	-1,89	7,66	6,05	0,90	10,85			
okt-08	9,14	15,51	1,33	14,14	7,69	10,75	1,95	5,88	3,81	-8,38		-0,91	7,61	5,63	0,40	11,01			
dec-08	8,99	15,55	0,39	14,49	7,53	10,64	1,08	5,45	3,38	-8,63		-0,85	7,60	5,66	0,29	11,06			
feb-09	8,45	14,73	0,24	14,70	6,65	11,39	0,82	5,74	3,75	-8,86	-7,40	0,15	7,20	5,78	-0,18	11,63			
apr-09	8,99	15,55	0,33	15,29	7,43	11,33	1,02	6,19	4,15	-9,39	-8,59	-1,59	7,58	6,28	-0,18	12,28			
jun-09	8,09	16,14	0,88	15,60	7,41	11,31	0,23	8,25	4,59	-10,49		-2,00	8,33	5,66	-0,14	12,24			
aug-09	7,11	17,45	1,09	15,77	7,54	10,69	1,93	8,46	3,98	-10,59		-1,69	8,84	6,03	-0,85	13,20			
okt-09	7,14	18,30	2,03	17,70	8,23	9,25	2,32	8,71	3,44	-11,60		3,74	9,60	8,03	-0,46	13,38			
dec-09	7,03	18,01	2,36	18,76	8,58	10,39	2,58	7,35	3,68	-11,69		0,31	10,44	10,31	-0,49	14,73			
feb-10	7,66	19,10	2,34	18,51	8,54	10,10	2,72	9,76	3,61	-10,95		-1,53	10,29	9,54	-0,57	14,33			
apr-10	7,00	18,40	2,44	18,27	9,06	10,95	2,52	9,50	2,63	-11,19		-2,60	10,40	9,55	-0,48	14,18			
jun-10	6,40	20,54	2,35	18,61	9,81	10,86	2,98	10,38	3,59	-15,95		-1,96	11,73	9,11	0,59	15,13			
aug-10	6,81	18,64	1,75	18,60	9,85	10,23	2,52	10,20	5,18	-17,06		5,51	11,46	8,80	0,51	15,09			
okt-10	6,13	18,38	2,05	17,24	9,30	10,38	-0,10	8,19	4,80	-17,71		3,15	11,44	8,28	0,34	14,86			
dec-10	6,24	17,90	2,15	17,26	9,45	10,44	-0,77	8,70	5,11	-17,28		1,63	10,87	8,60	-0,16	15,06			
feb-11	6,50	18,01	2,00	17,13	9,35	10,45	-0,97	8,11	4,56	-16,73		2,80	11,13	8,18	-0,10	13,73			
apr-11	6,50	17,99	2,10	18,10	10,05	10,81	-3,30	8,08	5,70	-17,41		2,46	11,84	8,74	0,09	14,88			
jun-11	4,88	17,74	1,89	17,70	9,9														

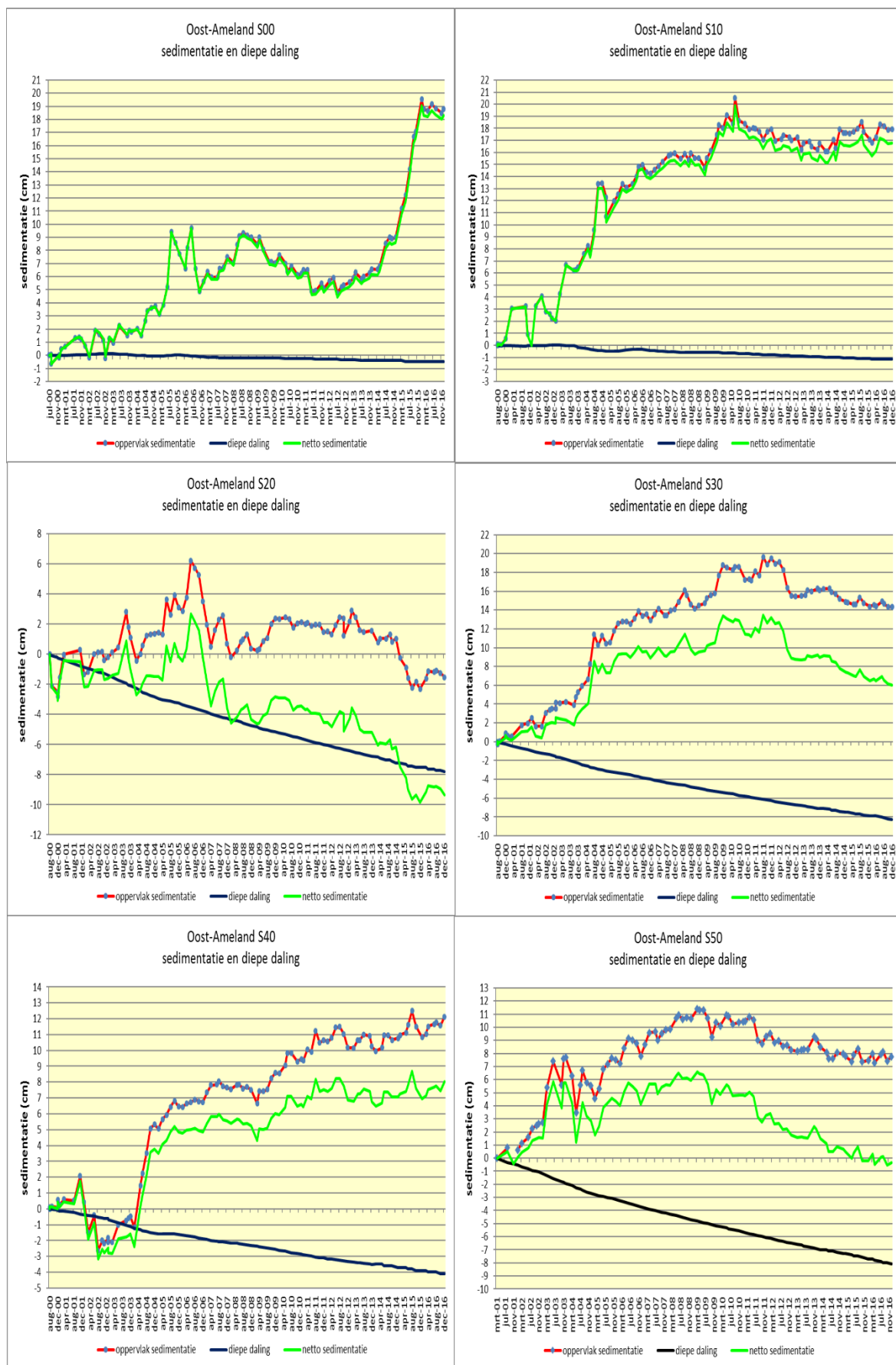


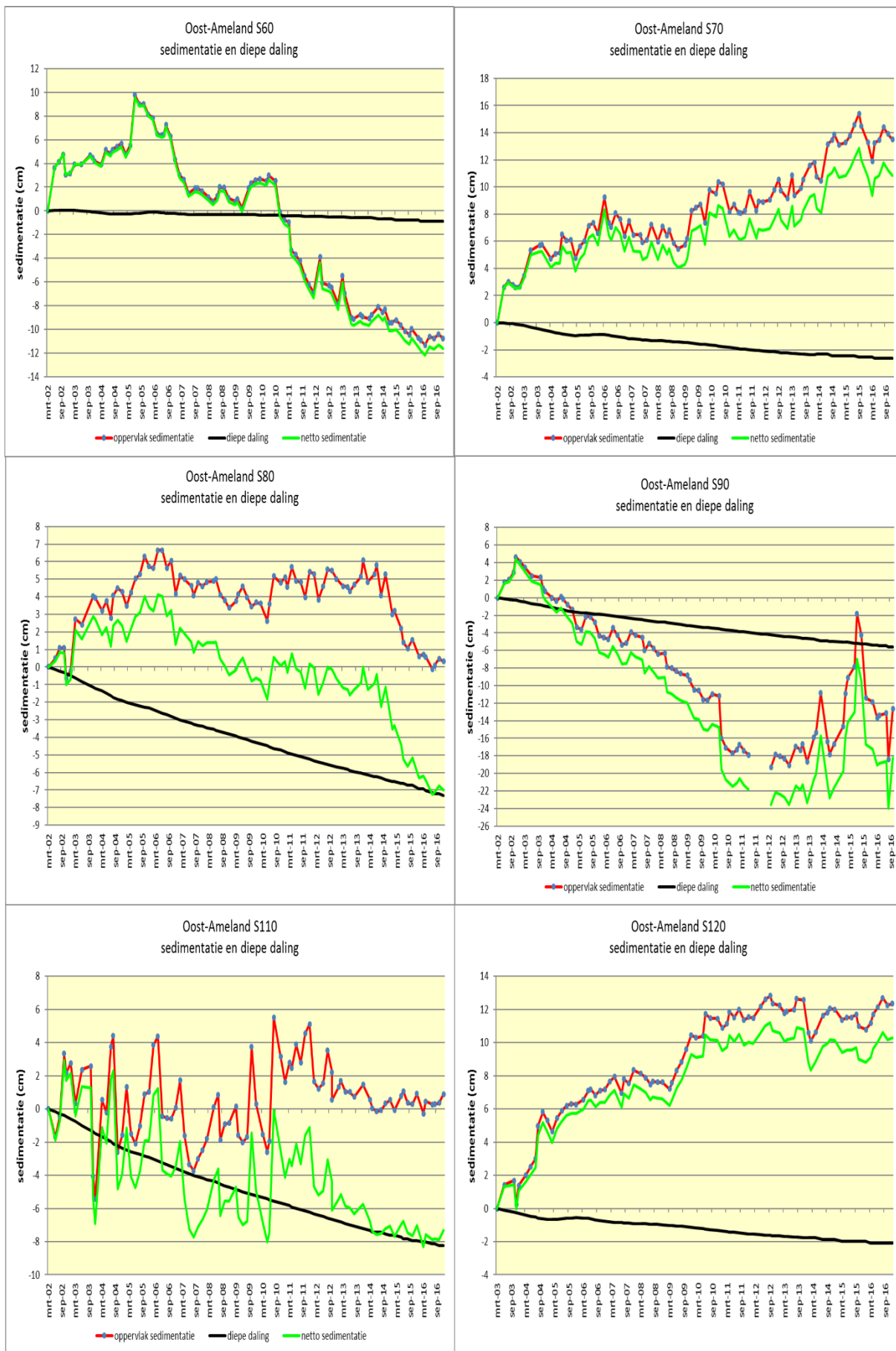
Bijlage 2B. Meetdata West-Ameland.

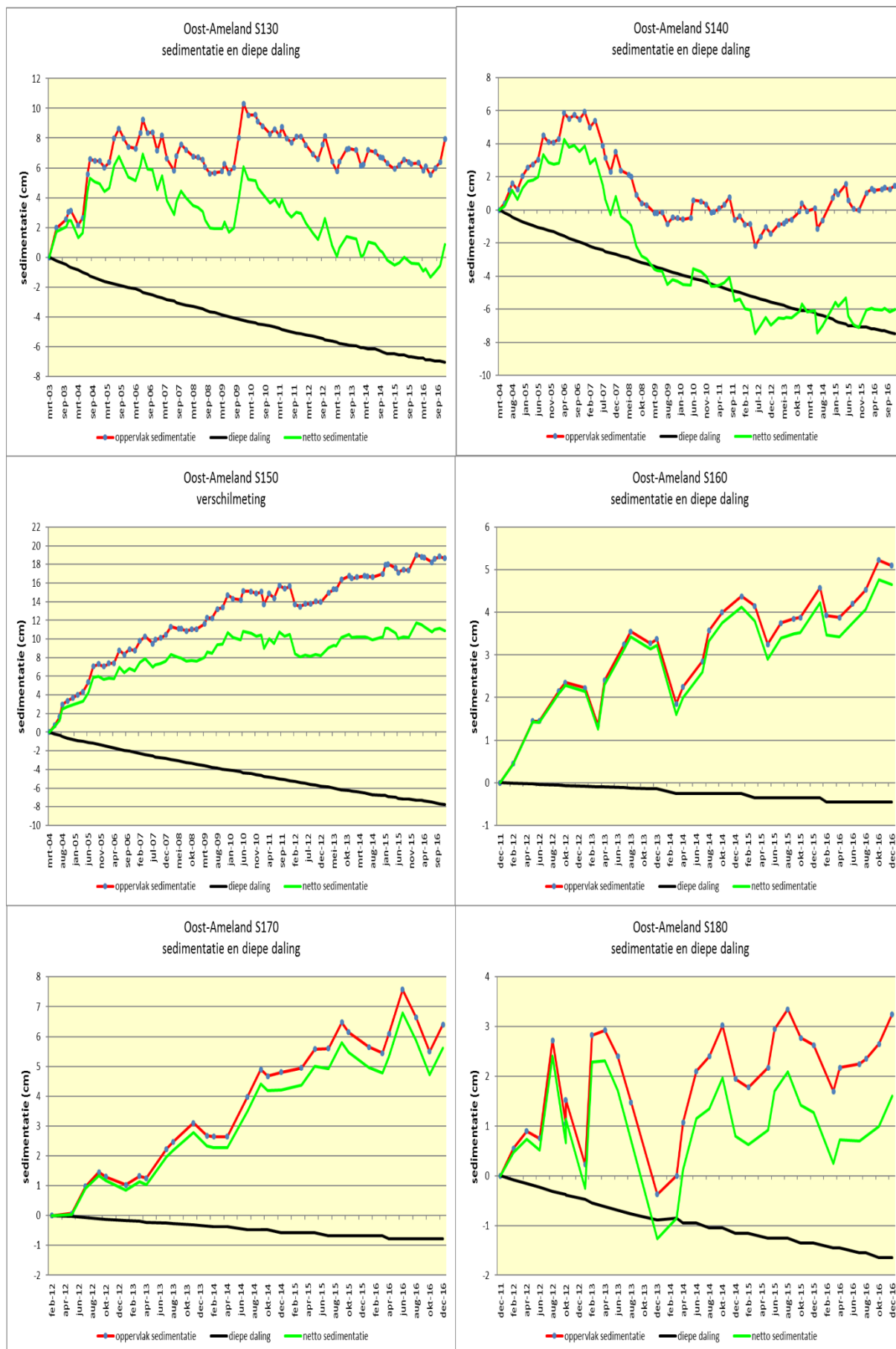
	gemiddelde verschilmetingen						
	H10	H20	H30	H40	H50	H60	H70
30-10-2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
22-12-2006	-0,15	1,48	0,52	0,73	1,48	-1,00	
28-2-2007	1,13	3,03	2,45	1,70	-0,03	-0,78	
24-4-2007	1,93	4,25	1,78	2,58	-0,10	0,28	
4-7-2007	2,70	4,30	1,40	2,23	-0,50	-0,82	
9-9-2007	2,88	4,78	0,35	3,35	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	5,83	0,80	1,35
2-5-2014	0,58	12,00	6,63	13,00	5,70	0,50	-0,07
30-6-2014	1,10	11,43	6,43	12,25	5,73	1,45	0,10
9-9-2014	0,25	11,85	6,55	13,75	5,95	0,45	-0,20
15-11-2014	-0,15	11,95	6,28	12,35	6,38	0,05	-0,22
31-12-2014	0,58	11,45	7,28	12,78	4,35	0,87	-1,38
25-2-2015	1,40	11,00	7,70	12,70	5,75	0,50	-0,97
29-4-2015	1,63	11,43	7,43	13,00	6,95	0,05	-1,53
3-7-2015	1,68	12,15	7,50	13,78	6,48	-0,73	-0,77
1-9-2015	1,25	11,65	7,45	13,43	5,98	-1,23	-1,60
29-10-2015	1,48	10,95	7,13	14,10	6,93	-0,13	-1,23
21-12-2015	1,58	11,53	8,50	12,10	6,10	-0,62	-1,10
24-2-2016	0,93	11,73	11,03	13,70	8,68	0,40	0,23
28-4-2016	0,93	11,63	11,58	14,08	14,45	-0,43	0,50
1-7-2016	1,28	11,18	11,03	13,80	13,80	-0,60	0,20
25-8-2016	1,35	12,25	11,95	14,03	12,93	0,10	-0,40
25-10-2016	1,10	11,73	11,38	13,78	12,08	0,30	-0,22
23-12-2016	1,00	11,43	12,48	14,33	9,48	0,48	0,48
Cumulatie cm	1,00	11,43	12,48	14,33	9,48	0,48	0,48
meetduur maand	121	121	121	121	121	121	60
snelheid mm/j	1,0	11,3	12,4	14,2	9,4	0,5	1,0



Bijlage 2C. Grafieken meetstations Oost-Ameland

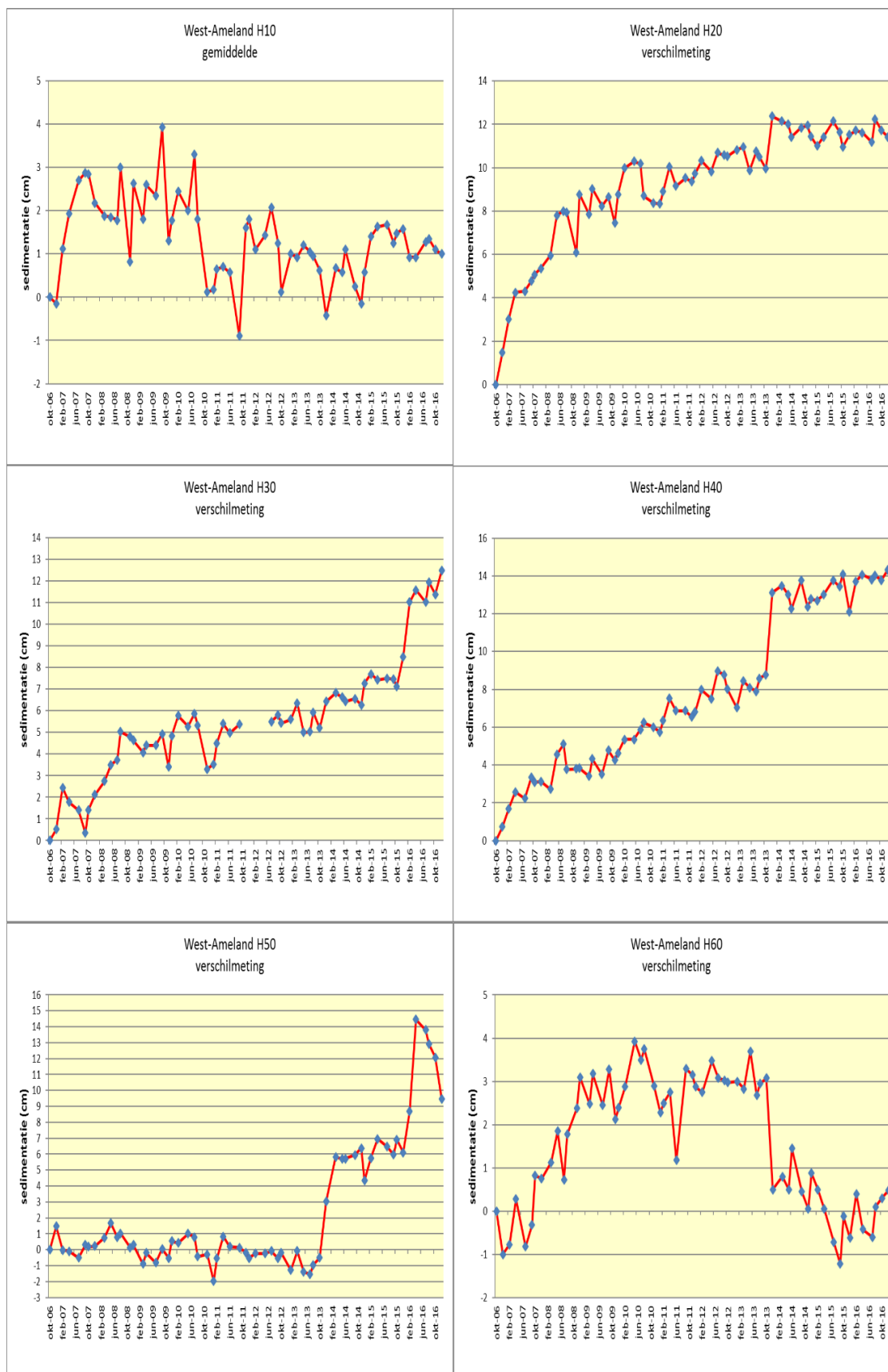


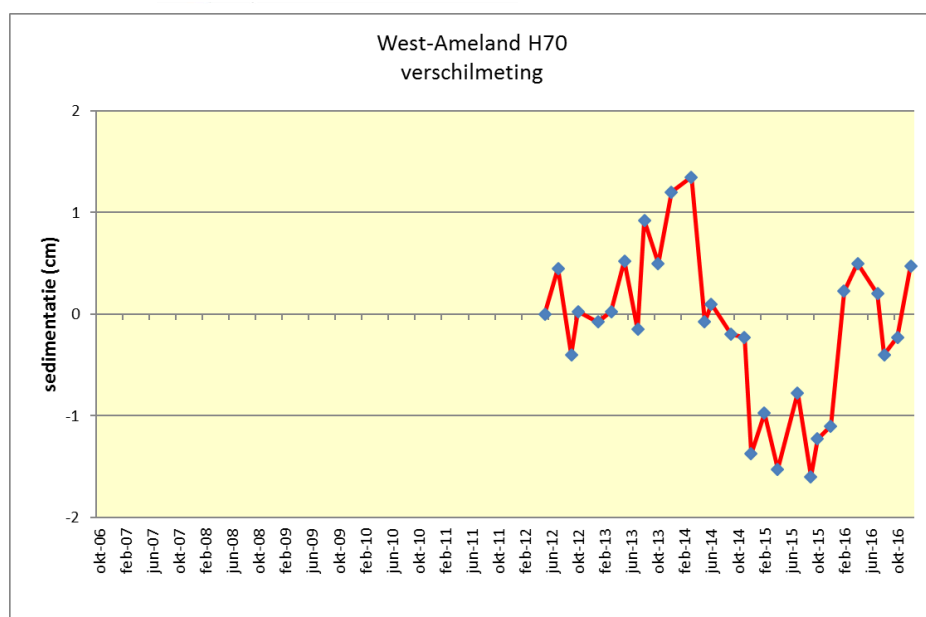






Bijlage 2D. Grafieken meetstations West-Ameland.







Bijlage 2E Google Earth opname van Oost-Ameland in 2005 en 2015



2005



2015



Bijlage 2F Neerslag- en verdampinggegevens Ameland 2010-2015

2010	Neerslag	(mm)		periode	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			856.6	jaar	totaal			917.4

2010	Verdamping	(mm)		periode	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			595.0	jaar	totaal			567.3



2012 decade 1	Neerslag decade 2	(mm) decade 3	maand	periode	2013 decade 1	Neerslag decade 2	(mm) 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			1091.4	jaar	totaal			781.0

2012 decade 1	Verdampin g decade 2	(mm) decade 3	maand	periode	2013 decade 1	Verdampin g decade 2	(mm) decade 3	maand
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			584.0	jaar	totaal			572.6



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			760.1	jaar	totaal			954.5

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			631.6	jaar	totaal			594.4