

## Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2022)



## Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2022)

Matthijs Gawehn

## Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2022)




<b>Opdrachtgever</b>	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
<b>Contactpersoon</b>	mevrouw G Ketelaar
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	LiDAR, Friesche Zeegat, monitoring

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.2
<b>Datum</b>	05-05-2023
<b>Projectnummer</b>	11206685-005
<b>Document ID</b>	11206685-005-ZKS-0002
<b>Pagina's</b>	72
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

Matthijs Gawehn		

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.2	Matthijs Gawehn 	Zheng Bing Wang  Bart Grasmeijer	Toon Segeren 	

# Samenvatting

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het gebied rond het Friesche Zeegat (tussen Ameland en Schiermonnikoog). Exploitatie van deze velden leidt tot een diepe bodemdaling van enkele millimeters per jaar. De gevolgen van bodemdaling op de morfologie en de ecologie in het Waddengebied worden periodiek gemonitord. Deltares voert jaarlijks een morfologische analyse uit voor het monitoringsprogramma. Deze resultaten worden gerapporteerd in het kader van het hand-aan-de-kraan principe en voorgelegd aan het ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de Auditcommissie Monitoring Waddengas (onderdeel van de Commissie voor de m.e.r.)

In deze monitoringstudie is onderzocht of de morfologie van het Friesche Zeegat (kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag) gevolgen ondervindt van diepe bodemdaling door gaswinning. De analyse wordt uitgevoerd op een dataset van hoogtekarten van het droogvallend wad in het Friesche Zeegat. Deze dataset bestaat uit LiDAR opnamen die sinds 2010 één- tot tweemaal per jaar worden ingewonnen. De huidige studie is een update van de monitoringsstudie die sinds 2010 wordt uitgevoerd, met toevoeging van een nieuwe LiDAR opname uit juli 2022.

De hoofdonderzoeksvraag van deze studie luidt: "Is het areaal droogvallend wad in het Friesche Zeegat sinds de start van de LiDAR metingen veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning?". Om deze vraag te beantwoorden worden de volgende vier onderliggende onderzoeksvragen behandeld:

## 1. Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?

De ontwikkeling van de wadplaten in de deelgebieden van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag laat grote variaties zien. Op de geaggregeerde schaal van een kombergingsgebied heffen deze variaties in oppervlak en hoogte elkaar op en is de conclusie dat de ontwikkeling van het totale plaatareaal en de plaathoogte binnen de onzekerheidsmarge van de LiDAR metingen vallen. Daarmee laten de LiDAR data geen effecten van bodemdaling zien.

## 2. Beïnvloeden mossel- en oesterbanken veranderingen in plaatareaal?

Relaties tussen jaarlijkse mossel-/oesterbank-karten met sedimentatie-erosie patronen en wadplaatveranderingen duiden erop dat deze schelpdierbanken geen merkbare invloed hebben op het plaatareaal. Het oppervlak van de mossel- en oesterbanken heeft maar een aandeel van 3-5% aan het totale wadplaatareaal in het kombergingsgebied waardoor deze schelpdieren geen grootschalige plaatveranderingen kunnen veroorzaken. Er zijn wel aanwijzingen dat veranderingen in plaatareaal tot veranderingen in mossel- en oesterbankareaal kunnen leiden. Hierbij spelen waarschijnlijk meerdere factoren een rol, zoals korte termijn erosie van platen en mosselbanken door stormen maar ook langere termijn plaat- en geulveranderingen die de schelpdierbanken dwingen om zich aan te passen of te verplaatsen.

## 3. In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?

Op de schaal van deelgebieden binnen de kombergingsgebieden zijn veranderingen in morfologie waar te nemen. Als deze veranderingen een direct gevolg zouden zijn van diepe bodemdaling, dan zouden zij het grootst moeten zijn in het gebied waar de meeste diepe bodemdaling optreedt, ten zuiden van Ameland-oost op basis van het geodetische bodemdalingsmodel. Hoewel op deze locatie een afname van plaatoppervlak is

geconstateerd, is de grootste afname van plaatoppervlak niet hier waargenomen. De natuurlijke morfologische dynamiek van geulen en platen leidt tot veranderingen in plaathoogte die het effect van bodemdaling op lokale schaal kunnen versluieren. Hierdoor komt geen eenduidig bodemdalingssignaal naar voren uit de LiDAR dataset.

#### 4. In welke mate is de dynamiek van het plaatgedrag in het Friesche Zeegat te correleren aan andere factoren die niet met bodemdaling samenhangen?

Het dynamische evenwicht van het platensysteem wordt bepaald door voortdurende opbouw en afbraak van wadplaten. Een opbouwende factor is het getij. In deze studie is ook een afbrekende factor gevonden: stormachtige condities uit westelijke richting. Deze condities leiden tot een afname in plaatareaal over het hele Friesche Zeegat. De fysische verklaring hiervoor is dat sterke westelijke wind de waterstanden in het gebied verhoogt, waardoor golven verder over de platen kunnen komen om sediment te eroderen.

#### Aanbevelingen

Het is aan te bevelen om de referentievlakcorrectie, met de voorjaarsmeting 2019a als referentie, verder te gebruiken voor vervolganalyses. In de analyse van de LiDAR data zijn significante relaties gevonden tussen veranderingen in plaatareaal en sterke westelijke wind. Tijdens deze condities zijn de waterstanden en de golven hoger waardoor wadplaten sterker eroderen. We bevelen aan deze relatie verder te onderzoeken met behulp van bestaande golfinformatie. Op deze manier kunnen we de verschillende invloeden op de verandering van het plaatareaal van elkaar onderscheiden. Hierbij is het ook van belang de nieuwste inzichten in de morfologische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat mee te nemen.

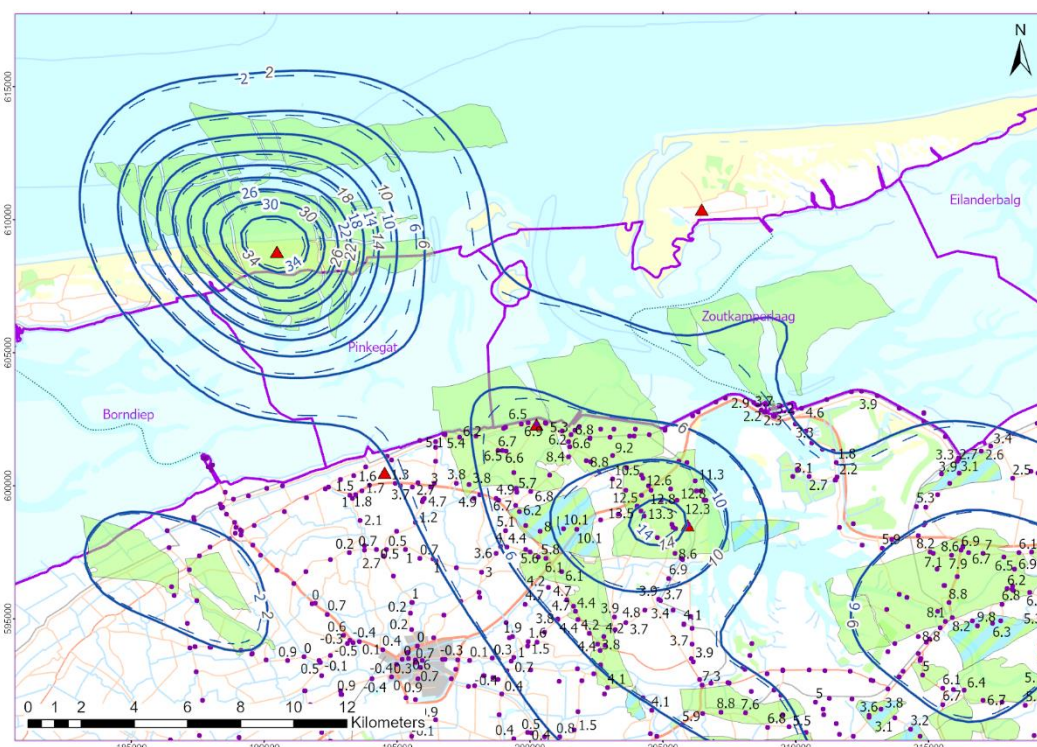
# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat</b>	<b>8</b>
1.1	Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat	9
1.1.1	Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2022	9
1.1.2	Status kennis morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat	10
1.2	Aanbevelingen MER commissie 2022	10
1.3	Onderzoeksvragen	11
1.4	Aanpak en leeswijzer	11
<b>2</b>	<b>Verwerken van LiDAR data</b>	<b>12</b>
2.1	Beschrijving opnamen 2022	12
2.2	Opwerkingsprotocol	13
2.2.1	LiDAR opwerking	13
2.2.2	Correctie systematische afwijking	14
2.2.3	Data overzicht	17
<b>3</b>	<b>Analyse areaalontwikkeling</b>	<b>19</b>
3.1	Weergave van onzekerheid	19
3.2	Kombergingsgebieden	19
3.3	Individuele platen	21
3.3.1	Pinkegat kombergingsgebied (A – F)	22
3.3.2	Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G-H)	22
3.3.3	Zoutkamperlaag(I-R)	24
3.4	Langetermijntrends	25
3.5	Effect van hogere grid resolutie op berekening plaatareaal	28
3.6	Conclusies areaalontwikkeling	28
<b>4</b>	<b>Analyse ontwikkeling plaathoogte</b>	<b>30</b>
4.1	Hypsometrie kombergingsgebieden	30
4.2	Hypsometrie individuele platen	31
4.3	Tijdsgemiddelde ontwikkeling	38
4.4	Profielen	39
4.5	Conclusies plaathoogte ontwikkeling	42
<b>5</b>	<b>Invloed van mossel- en oesterbanken op plaatareaal</b>	<b>43</b>
5.1	Detectie van mossel- en oesterbanken	43
5.2	Sedimentatie-erosie	45
5.3	Correlatie van mossel- en oesterbankarealen met wadplaatarealen	46

5.4	Conclusie invloed van mossel- en oesterbanken op plaatareaal	47
<b>6</b>	<b>Invloed hydrodynamische en meteorologische condities</b>	<b>48</b>
6.1	Invloed condities tijdens inwinning	49
6.2	Invloed stormachtigheid tussen opnamen	50
6.3	Invloed golfklimaat tussen opnamen	52
6.4	Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities	53
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>54</b>
7.1	Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?	54
7.2	Beïnvloeden mossel- en oesterbanken veranderingen in plaatareaal?	54
7.3	In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?	54
7.4	In welke mate is de dynamiek van het plaatgedrag in het Friesche Zeegat te correleren aan andere factoren die niet met bodemdaling samenhangen?	55
7.5	Aanbevelingen	55
	<b>Referenties</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Overzicht vluchtgegevens</b>	<b>58</b>
<b>B</b>	<b>NAM rapportage datareeks correctie</b>	<b>61</b>
	Samenvatting 61	
B.1	Introductie	61
B.2	Meetpunten voor de berekening van correctie parameters	61
B.2.1	Ground Control Point (GCP) grids	62
B.2.2	Harde topografie punten	63
B.2.3	Sediment grids	63
B.3	Correctie parameters	63
B.3.1	Berekening correctie parameters	63
B.3.2	Evaluatie correctie parameters	65
B.3.3	Effect correcties op de GCP en sediment grid hoogtes	66
B.4	Referenties	68
<b>C</b>	<b>Deelgebied veranderingen</b>	<b>69</b>
C.1	Tijdseries deelgebieden	69

# 1 Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het gebied rond het Friesche Zeegat. Bij Ameland vindt deze winning sinds 1987 plaats en in 2007 is de winning uitgebreid met gasvelden in de Waddenzee (Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen). Deze gaswinning leidt tot daling van de diepe ondergrond met enkele millimeters per jaar (Figuur 1-1).



Figuur 1-1 Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2022) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2021 volgens de M&R-rapportage over 2020. De rode driehoeken geven de posities van de GNSS stations aan. De paarse punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met de met InSAR gemeten hoogteverschillen vanaf eind 1997 tot eind 2020. (NAM, 2022).

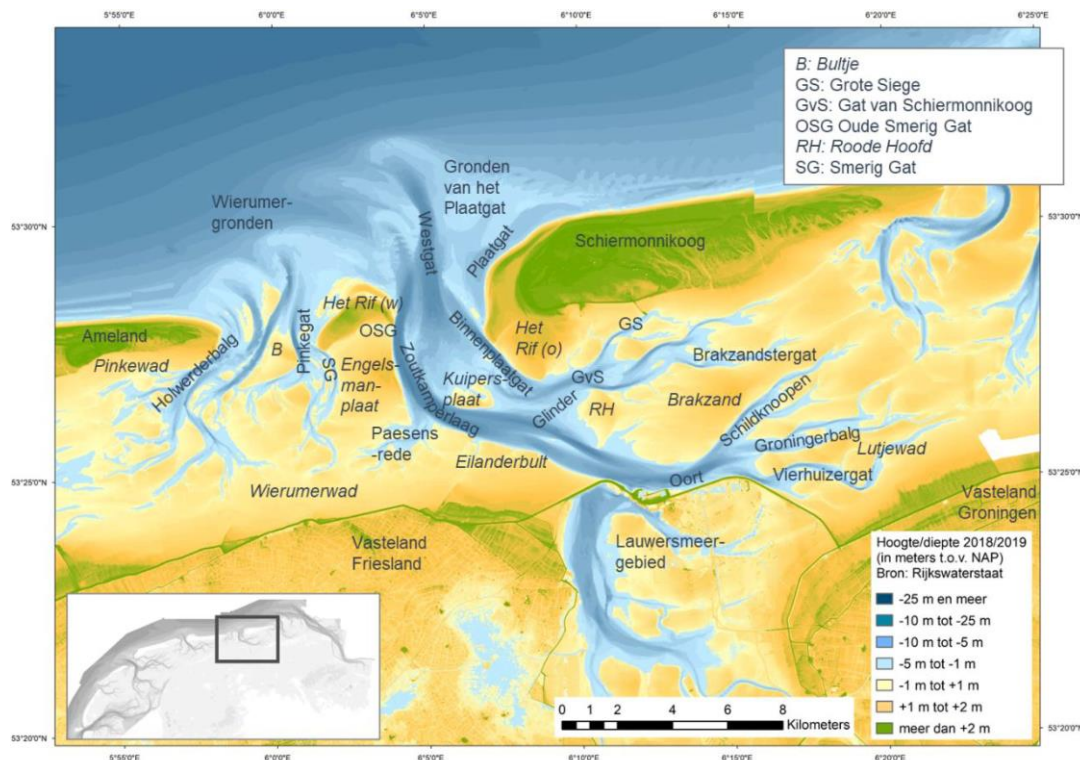
Voor de gaswinning geldt het hand-aan-de-kraan principe waarbij monitoring van veranderingen in het gebied een belangrijke rol speelt (NAM, 2007). De effecten van bodemdaling op morfologie en ecologie in het Waddengebied worden voortdurend onderzocht. Deltares voert jaarlijks een morfologische analyse uit. Het voorliggende rapport is onderdeel van de monitoringscyclus 2022. Leidend in deze rapportage is de vraag of de morfologie van de wadplaten gevolgen ondervindt van de diepe bodemdaling door gaswinning.

De morfologische analyse is gebaseerd op de hoogteontwikkeling van het droogvallend wad in het Friesche Zeegat. Deze ontwikkeling wordt afgeleid uit een reeks LiDAR opnamen van het gebied die sinds 2010 één- tot tweemaal per jaar worden ingewonnen. Sinds het vorige rapport (van der Vegt & van der Lugt, 2022) is één nieuwe opname uit juli 2022 toegevoegd aan deze dataset.



## 1.1 Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat

Bestaand onderzoek naar de morfologische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat wordt aangestuurd vanuit beheer- en beleidsvraagstukken van Rijkswaterstaat en de ministeries, maar ook specifiek vanuit de NAM monitoringscampagne naar de effecten van diepe bodemdaling door gaswinning. Hier lichten we kort het conceptuele model voor de morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat toe. Voor de volledigheid zijn de namen van de belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat weergegeven in Figuur 1-2.



Figuur 1-2 Kaart van het Friesche Zeegat met de namen van de belangrijkste geulen en platen (Oost et al. 2020).

### 1.1.1 Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2022

Van der Vegt en Van der Lugt (2022) constateerden dat over de meetperiode 2010-2021 zowel in het kombergingsgebied Pinkegat als in de Zoutkamperlaag de veranderingen in plaatareaal binnen de foutmarge van de metingen bleven. Daarmee liet de LiDAR data geen effecten van bodemdaling zien. Op de schaal van deelgebieden binnen de kombergingsgebieden zijn morfologische veranderingen groter dan de foutmarge van de metingen waargenomen. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen en het daarbij behorende sedimenttransport leiden tot veranderingen in plaathoogte die het effect van bodemdaling op lokale schaal versluieren. Een eenduidig bodemdalingssignaal in de morfologie kwam niet naar voren uit de LiDAR dataset. Dit kwam overeen met het feit dat geodetische modelberekeningen ook een verwaarloosbare invloed lieten zien ten opzichte van de natuurlijke morfodynamiek (Van der Vegt en Van der Lugt, 2022).

Om opeenvolgende LiDAR metingen nauwkeuriger met elkaar te kunnen vergelijken, is er de afgelopen jaren een correctiemethode ontwikkeld om systematische fouten weg te filteren aan de hand van de metingen op harde oppervlakten waarvan de hoogtes bekend zijn (Van der Lugt et al., 2019; Van der Lugt et al., 2020a; Van der Vegt & Van der Lugt, 2021). Door

toepassing van de correctie zijn de meetfouten gereduceerd, wat er toe heeft geleid dat de geconstateerde areaalveranderingen beter te interpreteren zijn.

### 1.1.2 Status kennis morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat

Het Friesche Zeegat bestaat uit twee kombergingsgebieden. De getijdegeul Pinkegat voedt een klein kombergingsgebied, met relatief ondiepe en dynamische geulen. De geul Zoutkamperlaag voedt een groter kombergingsgebied, met een dieper en stabiel geulsysteem. Geulmigratie in het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag wordt gedeeltelijk tegengehouden door geologische erosie-resistente lagen (Holocene klei- en veenlagen). Bij de ondiepere geulen van de Pinkegat spelen zulke lagen geen duidelijke rol. Het zeegat Pinkegat bestaat afwisselend uit één of meerdere (tot vier) geulen. De veranderingen in deze configuratie hebben invloed op de ontwikkeling van de oostpunt van Ameland. Deze veranderingen zijn niet duidelijk cyclisch, maar tonen wel een enigszins herhalend gedrag (Oost et al., 2020).

Geuldynamiek beïnvloedt de ontwikkeling van platen in een kombergingsgebied. Zo leidt de intensieve verplaatsing van geulen in het Pinkegat tot jongere platen die meer variëren in positie en hoogte. Bij geulmigratie is de nieuw gegenereerde plaat achter de geul lager dan de geërodeerde, oorspronkelijke plaat. Dit is terug te zien in de hoogte van de platen in het Pinkegat die gemiddeld lager zijn dan de platen in het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag. Daar is de positie en hoogte van de platen veel stabiel. Onder de plaat Brakzand is zelfs nog een veenlaag aanwezig, wat impliceert dat deze plaat nog nooit helemaal is omgewerkt sinds het ontstaan van de Zoutkamperlaag (Oost et al., 2020).

Van der Lugt et al. (2020b) analyseert het conceptuele model voor het morfologische systeem rond Ameland-oost in relatie tot diepe bodemdaling. Hierin wordt vermeld dat lokaal in het gebied ten zuiden van Ameland-oost de wadplaten lager zijn komen te liggen. Dit wordt niet gezien als een discrepantie met het conceptuele model van meegroeivermogen van het kombergingsgebied, omdat dit model de ontwikkeling van de wadplaten op kombergingsschaal beschrijft en niet op niveau van individuele plaatcomplexen.

## 1.2 Aanbevelingen MER commissie 2022

Deze paragraaf refereert naar het advies van de Auditcommissie “Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen” van 3 November 2022 (Commissie MER, 2022).

De Auditcommissie onderschrijft de conclusie van de NAM dat er geen aanwijzingen zijn voor een verband tussen wadplaatareaal en -hoogte enerzijds en de diepe bodemdaling anderzijds. Dit geldt ook voor de conclusie dat de natuurlijke morfologische veranderingen als geulmigratie en sedimentaanvoer in belangrijke mate het plaatgedrag bepalen.

Bij de mogelijkheden voor verdere verbetering op het gebied van morfologie worden de volgende onderwerpen genoemd:

- Ga voor de analyse van de LiDAR-data, vanwege haar grotere representativiteit, uit van de referentiedataset uit 2019.
  - In de LiDAR analyse beschreven in dit rapport is wederom de LiDAR survey uit het voorjaar van 2019 als referentie aangehouden.
- Ga na in hoeverre drones bruikbaar zijn en boven de Waddenzee ingezet kunnen worden als aanvulling op de LiDAR-metingen. De Auditcommissie acht het denkbaar dat morfologische effecten met drones in meer detail kunnen worden onderzocht (bijvoorbeeld in een gebied met een sterk microreliëf, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van ribbels of banken met biobouwers) en daarmee inzicht geven in de nauwkeurigheid van de LiDAR-metingen.

- Mede naar aanleiding van een opmerking tijdens de ‘Zeegse’ bijeenkomst d.d. 6 oktober 2022 in Leeuwarden is de mogelijke invloed van mossel en oesterbanken op veranderingen in het plaatareaal onderzocht. Daarbij is gestart vanaf de LiDAR data met originele (hoge) punt dichtheid (LAS formaat). Deze resultaten worden beschreven in hoofdstuk 5 van deze rapportage.
- Tevens is onderzocht of de resolutie van de data (1x1 m, 10x10 m) een effect heeft op de berekening van het plaatareaal.

Een verdere beschouwing van drones als aanvulling op LiDAR-metingen is opgenomen als bijlage in de Integrale Beoordeling over 2022.

De Auditcommissie heeft verder geadviseerd in komende rapportages zowel de gecorrigeerde als de ongecorrigeerde datasets te blijven tonen met betrekking tot het plaatoppervlak en -hoogte zodat de gevolgen van de toegepaste correcties zichtbaar zijn. Hier is opvolging aan gegeven in deze rapportage.

Daarnaast heeft de Auditcommissie opgemerkt dat in de tijdreeksen van het plaatareaal wordt uitgegaan van een onzekerheidsmarge van 3 cm voor iedere LiDAR hoogtesurvey. Het is echter onduidelijk waar deze (vaste) onzekerheidsmarge op gebaseerd is. Paragraaf 3.1 van dit rapport gaat in op de weergave van onzekerheid.

### 1.3 Onderzoeksvragen

De overkoepelende vraag achter de monitoring is: “Is het areaal droogvallend wad in het Friesche Zeegat (kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag) sinds de start van de LiDAR metingen veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning?”

Om deze vraag te beantwoorden behandelen we vier onderzoeksvragen:

1. Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?
2. Beïnvloeden mossel- en oesterbanken veranderingen in plaatareaal?
3. In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?
4. In welke mate is de dynamiek van het plaatgedrag in het Friesche Zeegat te correleren aan andere factoren die niet met bodemdaling samenhangen?

### 1.4 Aanpak en leeswijzer

Om deze onderzoeksvragen te beantwoorden analyseren we de verlengde meetreeks. Hoofdstuk 2 bespreekt de opwerking van de ruwe datasets tot hoogtekaarten. Hierbij wordt voortgebouwd op het opwerkingsprotocol van de voorgaande rapportages. Hoofdstuk 3 beschrijft de analyse van de ontwikkeling van het plaatareaal boven NAP-0.5 m. Uit de hypsometrische curven in Hoofdstuk 4 kan dan worden afgelezen hoe de sedimentverdeling in de verticaal (boven NAP-0.5 m) verandert. Het mogelijke effect van mossel- en oesterbanken op plaatveranderingen wordt in Hoofdstuk 5 besproken. Hoofdstuk 6 beschrijft de correlatie van de ontwikkeling van het plaatareaal in de verlengde meetreeks met meteorologische factoren. Tenslotte worden in Hoofdstuk 7 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

## 2 Verwerken van LiDAR data

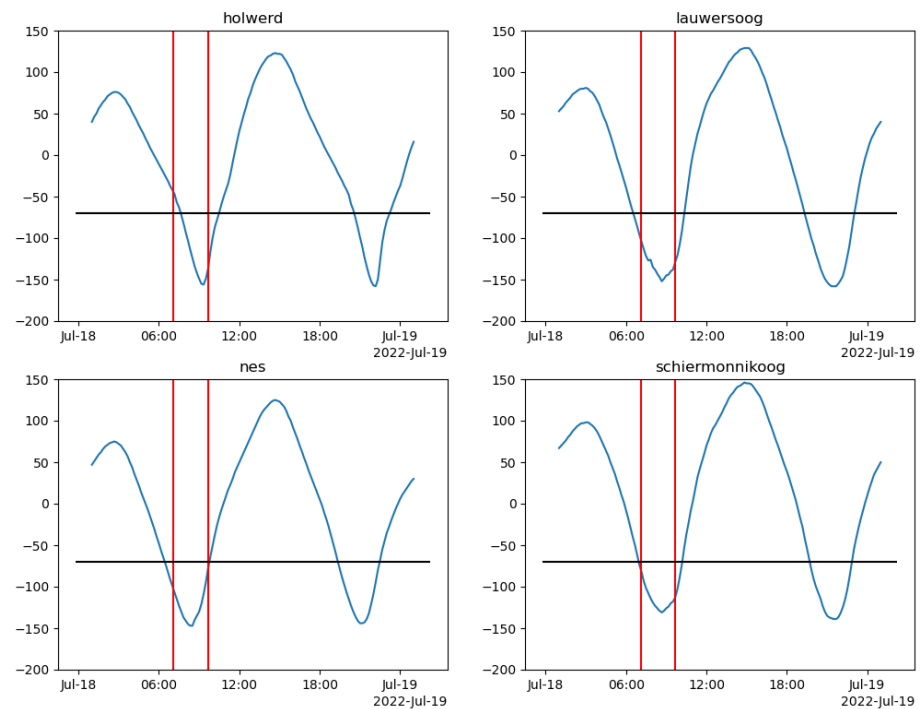
In dit hoofdstuk wordt de kwaliteit van de nieuwste LiDAR opnamen besproken. Daarnaast wordt de methodiek beschreven van opwerking van de LiDAR data tot een geschikte dataset voor het analyseren van plaatareaalveranderingen.

### 2.1 Beschrijving opnamen 2022

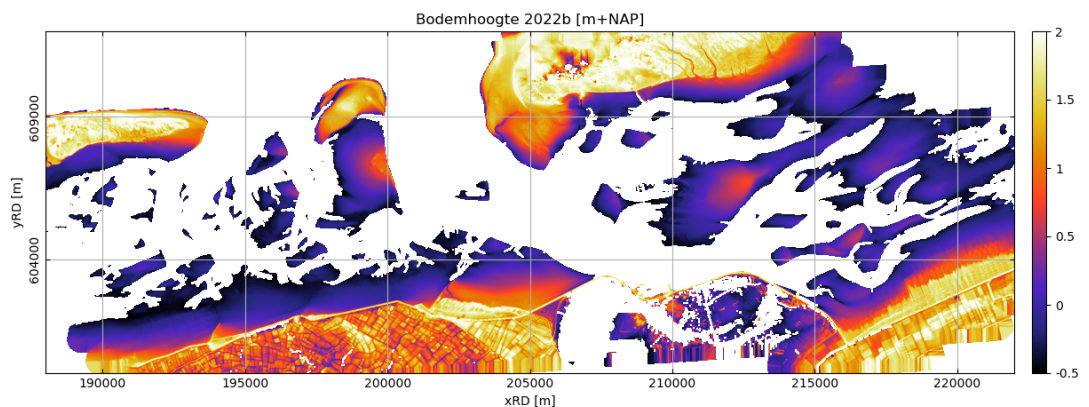
Op 18 Juli 2022 heeft Terratec wederom LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat gemaakt. Het rapport van Terratec (2022) beschrijft het vliegplan, de vlakdekking, puntendichtheid en de kwaliteitscontrole. Net als in de jaren 2020 en 2021 is ook in 2022 een vluchthoogte van 1750 m aangehouden. De minimale puntendichtheid geassocieerd met deze hoogte is nog steeds 5.7 punten/m<sup>2</sup>, wat voldoende is voor het opwerking naar rasters van 1x1m en 10x10m.

Het vluchtplan is gebaseerd op het getijvenster van de stations Lauwersoog, Nes, Schiermonnikoog en Holwerd, waarbij de waterstand op al deze stations lager dan NAP -0.7 m moet zijn. Hierdoor ligt er zoveel mogelijk plaatareaal droog tijdens de metingen. De opname in september 2022 viel niet helemaal binnen het getijvenster bij station Holwerd (Figuur 2-1). Dit was geen probleem omdat de vlieglijnen van noord naar zuid zijn ingewonnen en de zuidwestelijke hoek van het gebied niet in het eerste uur werd opgenomen.

De vlakdekking van de 2022 LiDAR opname bevat het gehele Friesche Zeegat (zie Terratec AS. (2022) en Figuur 2-2) en is vergelijkbaar met eerdere metingen. Een samenvatting van gegevens over meetdienst, instrumentgebruik en inwinduur bij elke opname is getabuleerd in Bijlage A.



Figuur 2-1 Waterstand (blauw) gemeten bij Holwerd, Lauwersoog, Nes en Schiermonnikoog meetstations, met start en stop tijden van de metingen (rood) en het waterstandscriterium van -0.7m (zwart).



Figuur 2-2 Hoogtekaart van de ingewonnen data in najaar 2022, na toepassing van correctievlak.

## 2.2 Opwerkingsprotocol

Voor de interpretatie van de NAM meetreeks is de 2022 opname opgewerkt volgens het standaard protocol (zie Van der Lugt et al., 2019; 2020a). Hierbij is ook het correctievlak meegenomen, zoals uitgewerkt door de NAM (Van der Lugt et al., 2020a; Van der Vegt & Van der Lugt, 2021, 2022).

### 2.2.1 LiDAR opwerking

Deltares hanteert het opwerkingsprotocol voor verwerking van laser (LAS) puntenwolken uit de LiDAR opname tot hoogtekaarten zoals beschreven in Van der Lugt et al. (2019). Dat is kort samengevat:

- Wegfilteren van LAS punten uit (controle) dwarslijnen.
- Wegfilteren van LAS punten boven NAP+2m.
- Wegfilteren van vlieglijnen waarvan uit de rapportage blijkt dat deze buiten het getijdenvenster zijn gevlogen (niet toegepast op 2022 data m.b.t. het getijdenvenster bij Holwerd omdat het geen zichtbaar effect had op opnamen).
- Mediaan van de LAS punten binnen een roostercel bepalen op standaard 1x1m, 10x10m en 20x20m rooster, waarbij geen minimum aantal punten wordt aangehouden.
- Wegfilteren van roostercellen met minder dan 3 LAS punten uit het 10x10m rooster.

### 2.2.2 Correctie systematische afwijking

In de recente rapportages bleek een deel van de verschillen tussen opeenvolgende LiDAR opnamen te kunnen worden verklaard door systematische verschillen in het referentievlak van de puntenwolk. Door verschillen tussen opeenvolgende opnamen op 'harde oppervlakken' te minimaliseren, kan voor de systematische fout worden gecorrigeerd. Deze correctie wordt door NAM afgeleid. Hiervoor hanteren zij de hoogtekaarten op 1x1m van alle opnamen (2010-2022) als uitgangspunt.

In 2021 is ervoor gekozen om de LiDAR opname uit het voorjaar van 2019 te gebruiken als referentiedataset, gezien deze een normale verdeling van residuen laat zien (Van der Vegt & Van der Lugt, 2022). In de huidige rapportage is de zelfde voorjaarsmeting 2019a als referentie aangehouden. Voor een uitgebreid verslag van de totstandkoming van de correctie, zie Bijlage B.

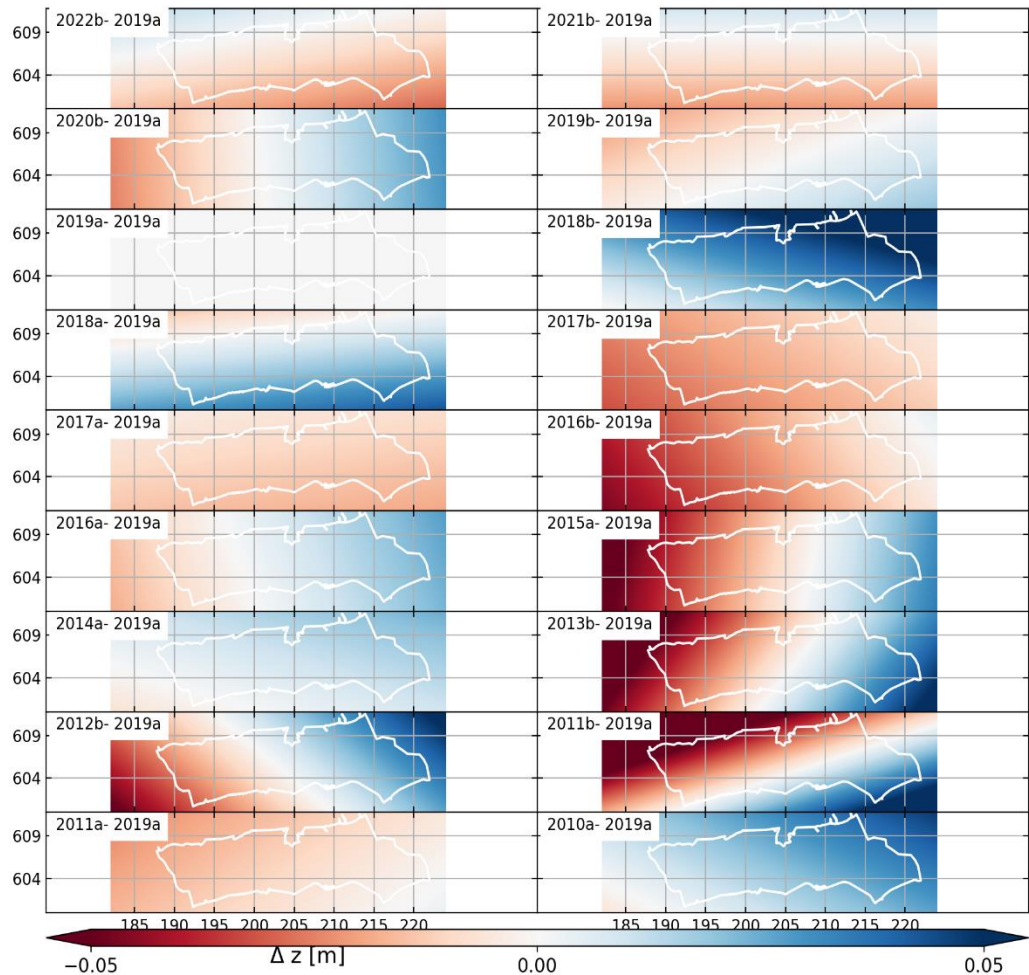
Hier vatten we het uiteindelijke stappenplan waartoe NAM is gekomen samen:

- Punten op 'harde oppervlakken' zijn geïdentificeerd.
- Voor elke opname is de LiDAR hoogte op deze punten geëxtraheerd uit de 1x1 m roosters, deze set is  $Y_{Lidar}(t)$  genoemd.
- Voor de jaren waar sedimentgridmetingen zijn ingewonnen zijn deze toegevoegd aan de LiDAR hoogtemetingen, als ook Ground Control Point (GCP) metingen:  
 $Y(t) = Y_{Lidar}(t) \cup Y_{sedgrid}(t) \cup Y_{GCP}(t)$ .
- Voorjaar 2019 (dataset 2019a) is gekozen als referentiemeting.
- Voor ieder jaar  $t \in T$  is voor alle punten in de set  $Y$  het verschil met de 2019a opname berekend:  $\epsilon(t) = Y(t) - Y_{2019a}$ .
- Deze fouten liggen ruimtelijk verdeeld door het projectgebied. Voor elk jaar is een lineair vlak ( $\epsilon(x, y, t) = a(t) \cdot x + b(t) \cdot y + c(t)$ ) gefit door deze verschillen, waarbij  $\epsilon$  in m, en  $x$  en  $y$  in km.

In Tabel 2.1 zijn de waarden van de vlakcoëfficiënten zoals berekend door NAM getabuleerd. Figuur 2-3 toont een visuele weergave van de correctievlakken om deze beter te kunnen interpreteren. De voorjaarsmeting wordt aangegeven met een achtervoegsel a, een najaarsmeting met b. Voor de opname 2019a is het vlak logischerwijs helemaal horizontaal door 0, omdat dit het referentiejaar is. Andere opnamen vertonen soms zowel blauwe als rode vlakken, wat wil zeggen dat delen van de opname moeten worden verlaagd ten opzichte van opname 2019a, en andere juist verhoogd. Opnamen waar een positieve afwijking (blauwe kleuren) domineert liggen ten opzichte van 2019a dus hoger en worden door de correctie naar beneden bijgesteld (zoals 2010a, 2018b). Opnamen waar een negatieve afwijking (rode kleuren) domineert liggen ten opzichte van 2019a lager en worden door de correctie naar boven bijgesteld (zoals 2016b, 2017a, 2017b). Verder blijkt bijvoorbeeld voor opnamen 2011b en 2012b een rotatie-as te bestaan die duidelijk anders ligt dan Noord-Zuid of Oost-West.

Tabel 2.1 Correctievlak coëfficiënten per survey.

survey	a	b	c
2010a	0.00079	0.00177	-1.21219
2011a	0.00047	-0.00071	0.32377
2011b	0.00217	-0.00704	3.81012
2012b	0.00188	0.00241	-1.84041
2013b	0.00254	-0.00212	0.76041
2014a	0.00039	0.00129	-0.85203
2015a	0.00208	-0.00044	-0.16688
2016a	0.00098	0.00040	-0.43654
2016b	0.00100	0.00080	-0.70922
2017a	-0.00012	0.00092	-0.54422
2017b	0.00048	0.00077	-0.58178
2018a	0.00040	-0.00368	2.16173
2018b	0.00081	0.00321	-2.07550
2019a	0.00000	0.00000	0.00000
2019b	0.00057	-0.00155	0.82160
2020b	0.00129	0.00014	-0.34398
2021b	0.00002	0.00261	-1.59190
2022b	-0.00037	0.00236	-1.36229

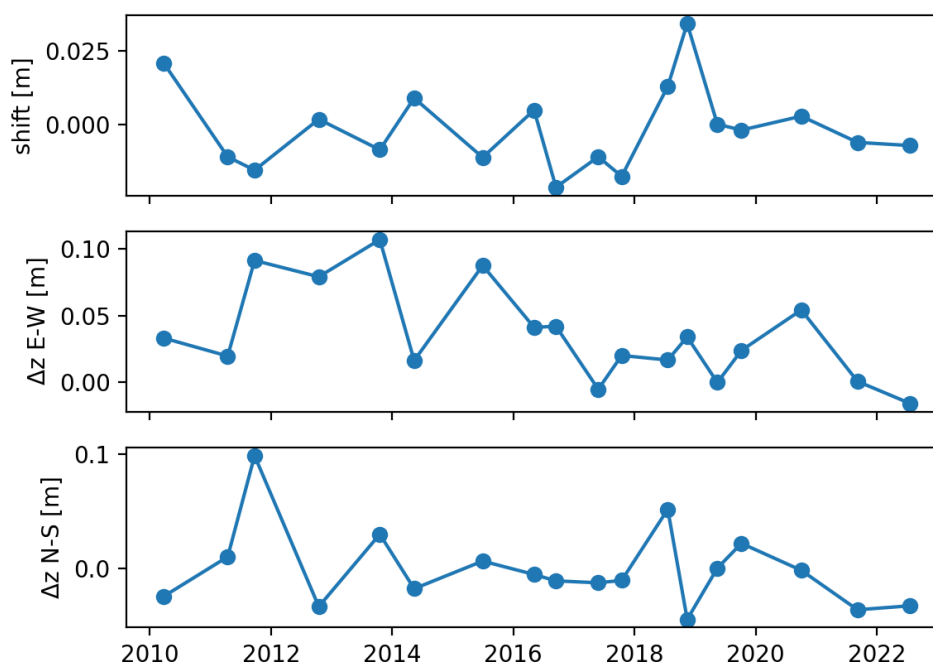


Figuur 2-3 Visualisatie van de correctievlakken per jaar berekend door NAM op basis van sedimentgridmetingen, Ground Control Points en harde oppervlakken aan de randen van het projectgebied.

De effecten van de correctie zijn samengevat in Figuur 2-4. De vastgestelde effecten in dit rapport zijn consistent met de studie van 2022 (Van der Vegt & Van der Lugt, 2022), omdat het zelfde referentiejaar 2019a wordt gehanteerd. Opnamen worden gemiddeld genomen bijgesteld met -1.5 tot 3 cm (Figuur 2-4, bovenste paneel) en centreren rond 0 cm. Het verschil in de correctie tussen de oostrand van het domein en de westrand kan oplopen tot 10 cm (zie 2013b, middelste paneel Figuur 2-4), net als het verschil tussen de noordrand en de zuidrand (zie 2011b, onderste paneel Figuur 2-4). Voor de opname van 2022b zijn de correcties relatief klein en vergelijkbaar met de opnamen van 2021b (Figuur 2-3 en Figuur 2-4).



## plane coefficients wrt 2019a



Figuur 2-4 Overzicht van de effecten van de correctie op gemiddelde hoogte in het Friesche Zeegat (boven), het verschil in correctie van de oostgrens en de westgrens van het projectgebied (midden), en het verschil in correctie van de noordgrens en de zuidgrens van het projectgebied (onder).

### 2.2.3 Data overzicht

Voor de verdere analyse zijn in deze studie 3 datasets gebruikt:

1. de gecorrigeerde hoogtekaarten
2. de originele hoogtekaarten
3. mossel- en oesterbank kaarten

Binnen beide gemeten datasets (1 en 2 hierboven) bestaan ook nog roostercellen waar in sommige jaren geen LAS punten in zijn gevallen en dus geen waarde toegekend hebben gekregen. In recente jaren is het aantal lege roostercellen sterk gereduceerd. Voor de berekening van tijdreeksen van areaal en hypsometrie zijn deze kaartbeelden nog opgevuld door middel van lineaire driehoeksinterpolatie.

In lijn met de rapportages van de drie voorgaande jaren worden de opnamen 2014b en 2015b weggelaten uit de analyse. In deze opnamen zijn teveel vlieglijnen buiten het getijdenster gevlogen, waardoor opvullen van het beeld met voorgaande metingen en omliggende observaties niet nuttig bleek. Voor een visueel overzicht van de kaartbeelden 2010-2018 verwijzen we naar Van der Lugt et al. (2019), voor 2019 naar Van der Lugt et al. (2020a) en voor de nieuwe dataset van 2022 naar Figuur 2-2.

Ter referentie worden de analyses van areaalontwikkeling (Hoofdstuk 3) en hypsometrie (Hoofdstuk 4) zowel mét als zonder correctie gerapporteerd.

Om inzicht te krijgen in het effect van mossel- en oesterbanken op de plaatarealen zijn voor de periode 2010-2022 jaarlijkse kaarten van Wageningen Marine Research (WUR) gebruikt. De data zijn verzameld door de WUR in opdracht van het ministerie van LNV (Landbouw,

Natuur en Voedselkwaliteit) als onderdeel van de wettelijke onderzoekstaken op het gebied van visserij (het WOT-Visserij programma) (Troost et al., 2022). De mossel- en oesterbankcontouren zijn gecorreleerd met de jaarlijkse LiDAR surveys om mogelijke effecten in kaart te brengen.

## 3 Analyse areaalontwikkeling

In dit hoofdstuk rapporteren we de ontwikkeling van het plaatareaal voor zowel de kombergingsgebieden als individuele platen op basis van 10x10 m grids van de LiDAR opnamen van 2010 tot en met 2022. Ook plaatsen we deze observaties in de context van de Vaklodingen dataset van Rijkswaterstaat. Ten slotte bekijken wij de mogelijke invloed van een hogere grid resolutie op plaatareaal berekeningen. Als eerste bespreken we de weergave van onzekerheid na aanleiding van de vraag naar verdere onderbouwing door de commissie MER 2022 (zie paragraaf 1.2)

### 3.1 Weergave van onzekerheid

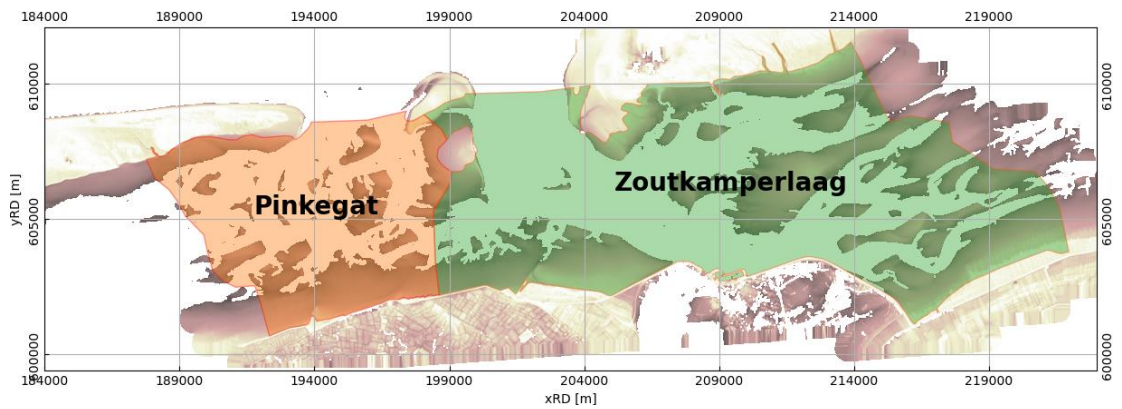
De weergave van onzekerheid is gebaseerd op de residuele hoogteverschillen op harde topografie en sedimentgrids na correctie van de referentievlakken (Van der Lugt et al., 2020a). In voorgaande rapportages is de onzekerheidsmarge gekwantificeerd met een vaste waarde van  $\sigma=3$  cm, welke een samenvattend beeld gaf van residuele hoogteverschillen in de correcties van de periode 2010-2019 (Van der Lugt et al., 2020a). Residuele hoogteverschillen in de correcties voor de jaren 2010-2012 domineerden, waardoor de waarde van  $\sigma=3$  cm de onzekerheid overschatte voor de periode daarna (vanaf 2013b, zie corresponderende percentielen in Tabel C.2 in Van der Lugt et al., 2020a).

In deze rapportage is de onzekerheidsmarge aangepast naar het 95% onzekerheidsinterval, gegeven door de 2.5 en 97.5 percentielen van individuele correcties (zie bijlage, Tabel B-3). De voordelen van deze weergave van onzekerheid zijn dat (1) de residuele verschillen per correctie niet normaal verdeeld hoeven te zijn, (2) de mate van onzekerheid kan variëren per correctie, en (3) een 95% onzekerheidsinterval correspondeert met het  $(-2\sigma, +2\sigma)$  interval (voor een normale verdeling) en geeft daarmee een ruimer beeld van onzekerheid. Zoals in paragraaf 7.5B.3.2 is aangegeven, is er een selectie van harde topografie punten gemaakt en zijn uitschieters verwijderd, waardoor de onzekerheidsbanden relatief strak gedefinieerd zijn.

De onzekerheden in de hoogteligging worden vertaald naar een onder- en bovengrens voor berekend plaatareaal. Merk op dat in recente rapportages (Van der Lugt et al., 2020a; Van der Vegt en Van der Lugt, 2021,2022) de ondergrens voor plaatareaal werd overschat door een rekenfout (e.g., negatieve onzekerheid is groter dan positieve onzekerheid in Figuur 3-2 van Van der Vegt en Van der Lugt, 2022). De fout is in deze rapportage gecorrigeerd.

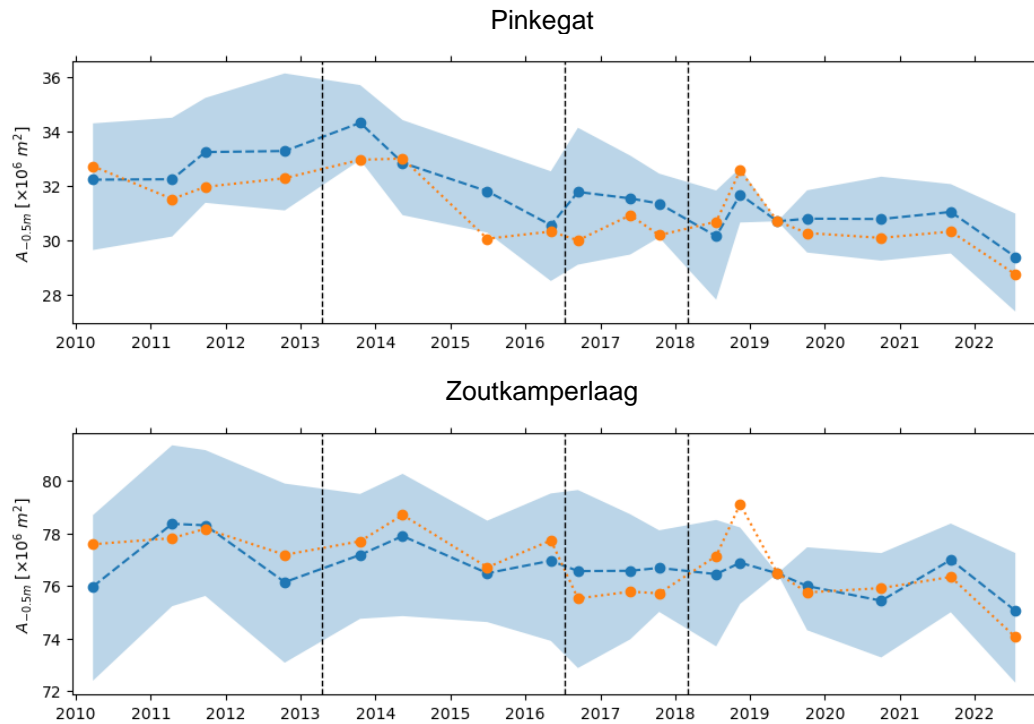
### 3.2 Kombergingsgebieden

Het Friesche Zeegat bestaat uit twee kombergingsgebieden, Pinkegat en Zoutkamperlaag, zoals aangegeven in Figuur 3-1. Voor deze kombergingsgebieden zijn integrale tijdsreeksen van plaatareaal gelegen boven NAP-0,5m geplot voor zowel de originele als de gecorrigeerde dataset (Figuur 3-2). Ook wordt de onzekerheidsmarge weergegeven voor de gecorrigeerde reeks.



*Figuur 3-1 Analysepolygonen voor areaalontwikkeling op kombergingsschaal. Deze polygonen zijn hetzelfde als in voorgaande jaren.*

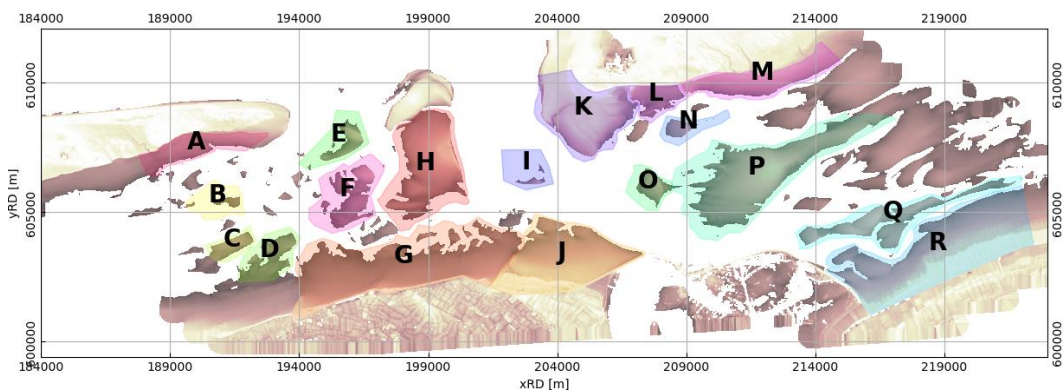
De correctie op de dataset leidt tot een verkleining van onregelmatigheden in plaatareaal van de Zoutkamperlaag. De plaatarealen van zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag blijven grotendeels constant met geringe fluctuaties ten opzichte van de onzekerheidsmarge (blauwe band in de figuur). Voor het Pinkegat blijkt dat de sprong in plaatareaal tussen 2014 en 2015, waarvoor Van der Lugt et al. (2019) geen verklaring konden vinden, een gevolg was van de systematische verschillen tussen referentievlakken van de opnamen onderling. In de gecorrigeerde tijdreeks is de ontwikkeling geleidelijk. De correctie verwijdert niet de fluctuaties in de meetreeks, ze worden alleen gelijkmatiger over de tijd verdeeld. Voor het Pinkegat lijkt een licht dalende trend in het signaal te zitten, echter voor de recente periode 2016 tot 2022 is het areaal vrij stabiel. De dip in de meting van 2022 is vergelijkbaar met eerder geobserveerde fluctuaties (2015, 2016, 2018) en signaleert op zichzelf geen trendbreuk. Alle fluctuaties zijn relatief klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge. In paragraaf 4.3 gaan wij in meer detail in op plaathoogteontwikkelingen.



Figuur 3-2 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP -0.5m voor de kombergingsgebieden Pinkegat (boven) en Zoutkamperlaag (onder). De oranje reeks (---) toont de originele data en de blauwe reeks (-.-.-) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale streepjeslijnen geven de wisseling van type laserscanner weer.

### 3.3 Individuele platen

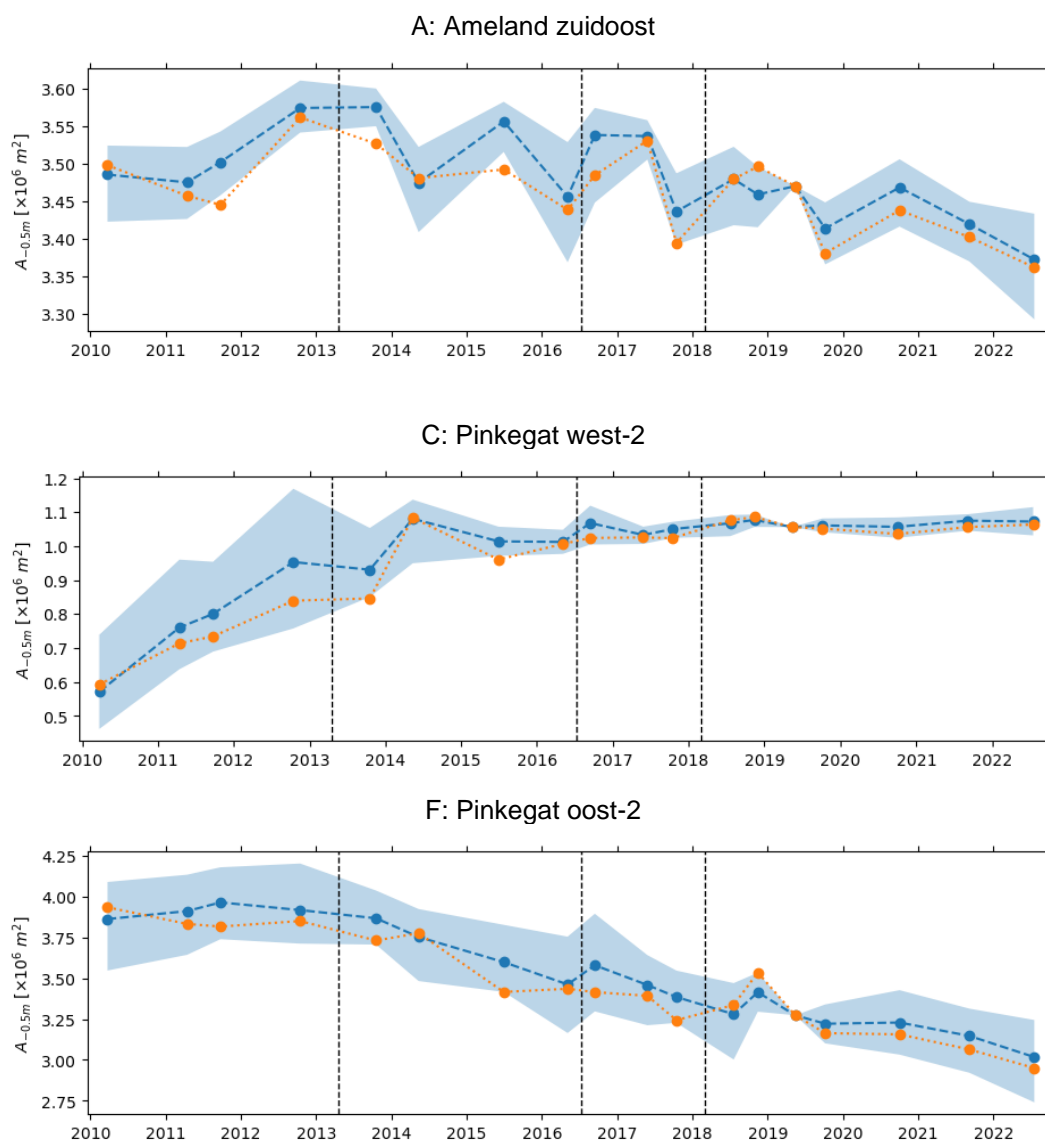
Op geaggregeerd kombergingsniveau is geen duidelijke ontwikkeling in areaal af te leiden. Dit komt deels door de meetonzekerheid, maar ook omdat op geaggregeerde schaal de ontwikkeling van verschillende platen tegen elkaar wegvallen. Op het niveau van individuele platen vinden wel significante ontwikkelingen plaats, die ook met de LiDAR opnamen waar te nemen zijn. Om deze ontwikkelingen te onderzoeken, is een aantal platen (plaatsystemen) nader beschouwd. Deelgebieden (Figuur 3-3) zijn geselecteerd aan de hand van eerdere rapportages en zijn geoptimaliseerd om, waar mogelijk, migrerende platen volledig te omvatten gedurende de tijdreeks. In gebieden met veel dynamiek en kleinere geulen is dat niet eenvoudig, bv. in het westen van het Pinkegat kombergingsgebied (B, C, D). Hier kunnen ook meerdere platen gedeeltelijk door een deelgebied migreren gedurende de tijd die de LiDAR dataset beslaat.



Figuur 3-3 Overzicht van (delen van) platen die individueel zijn bestudeerd.

### 3.3.1 Pinkegat komberginsgebied (A – F)

De areaalontwikkeling van individuele platen in het Pinkegat verschilt en kan stijgen en dalen (Figuur 3-4). Bijvoorbeeld in deelgebied A schommelt het plaatareaal sterk, met grote onzekerheid, maar het areaal daalt licht. In het westen (B, C, D) en oosten (E, F) van het Pinkegat zijn zowel platen te vinden die groeien (C, E) als krimpen (B, F) (zie voorbeelden C,F in Figuur 3-4; voor andere deelgebieden zie Appendix C.1). Deze veranderingen horen bij de dynamiek van het Pinkegatsysteem.

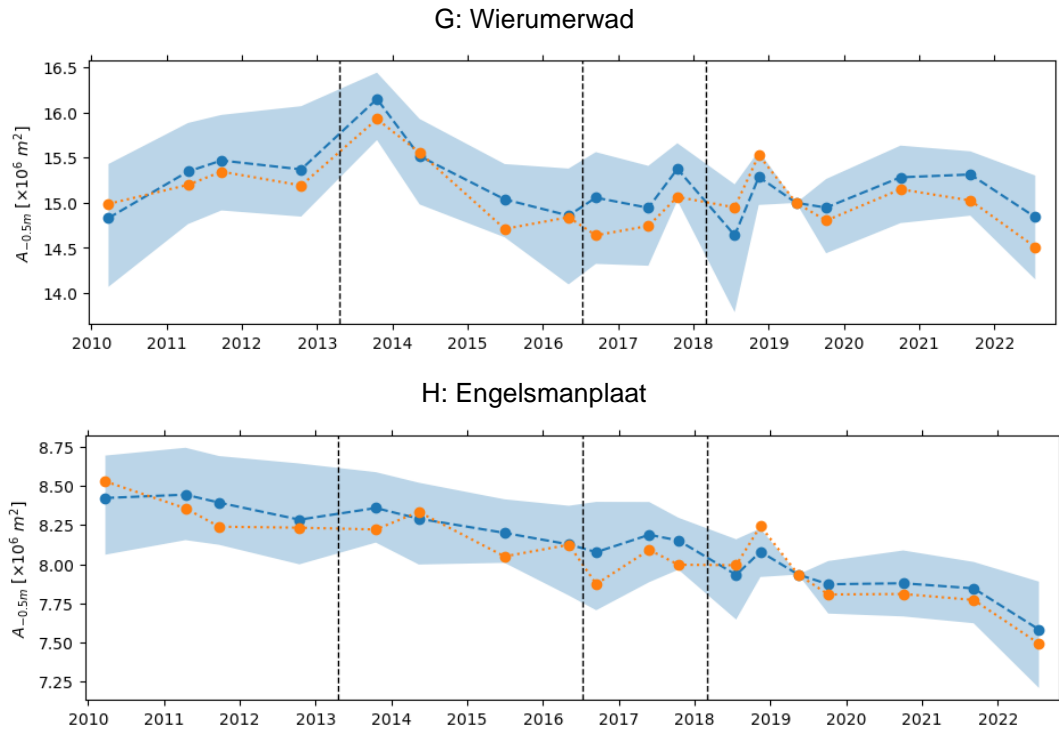


Figuur 3-4 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor enkele voorbeelden van platen in het Pinkegat (A,C,F in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toont de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

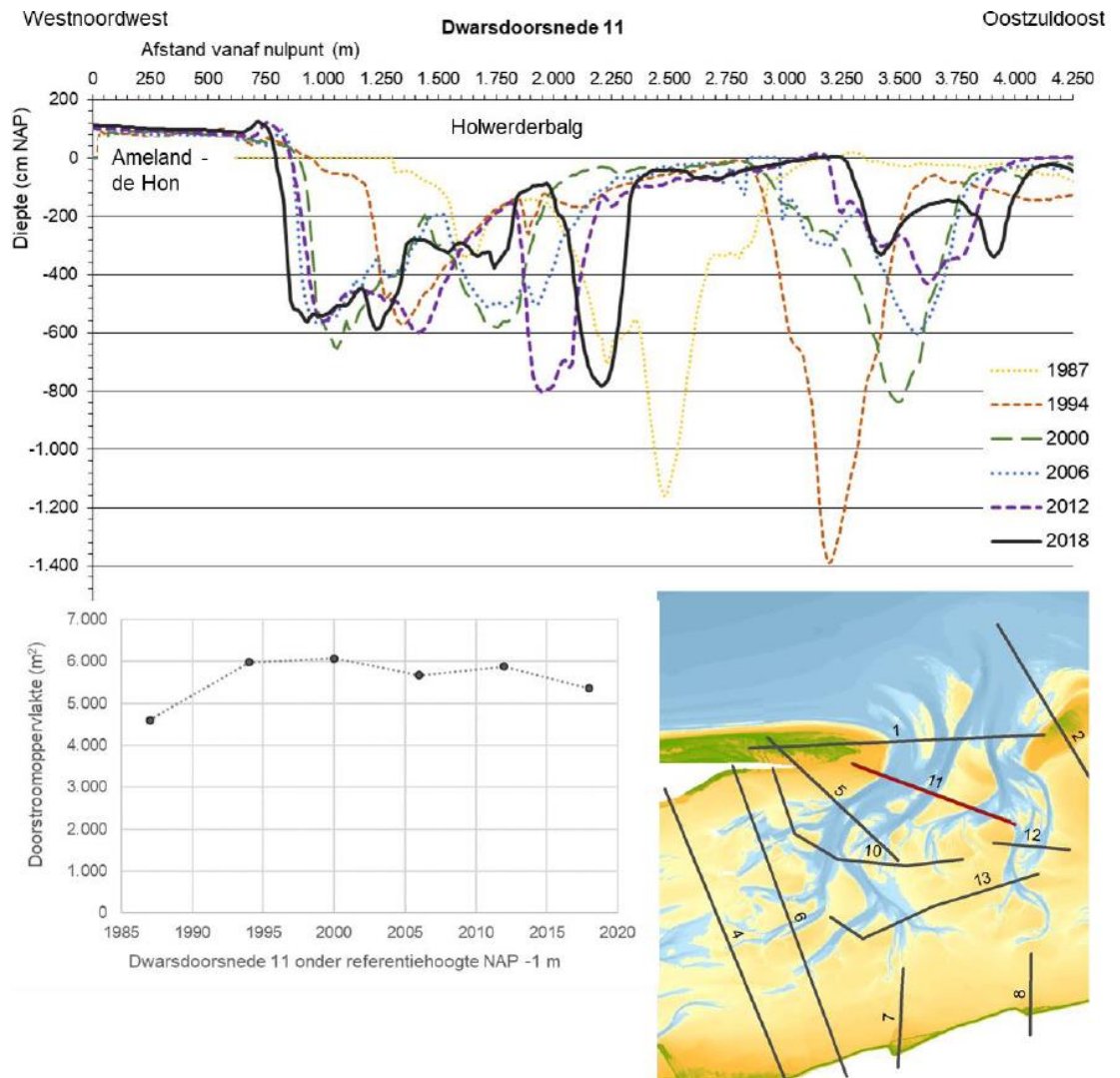
### 3.3.2 Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G-H)

Het plaatareaal op het Wierumerwad (G, Figuur 3-5) blijft grotendeels constant met geringe fluctuaties ten opzichte van de onzekerheidsmarge. Het areaal van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5) krimpt licht. Kijkend naar de lokale geuldynamiek (Figuur 3-6) blijkt dat dit een

gevolg is van de uitbochting van de geul ten westen van deze plaat, en daardoor onderdeel is van de natuurlijke morfologische dynamiek.



Figuur 3-5 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor platen op het Wierumerwad en de Engelsmanplaat (G-H in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toont de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

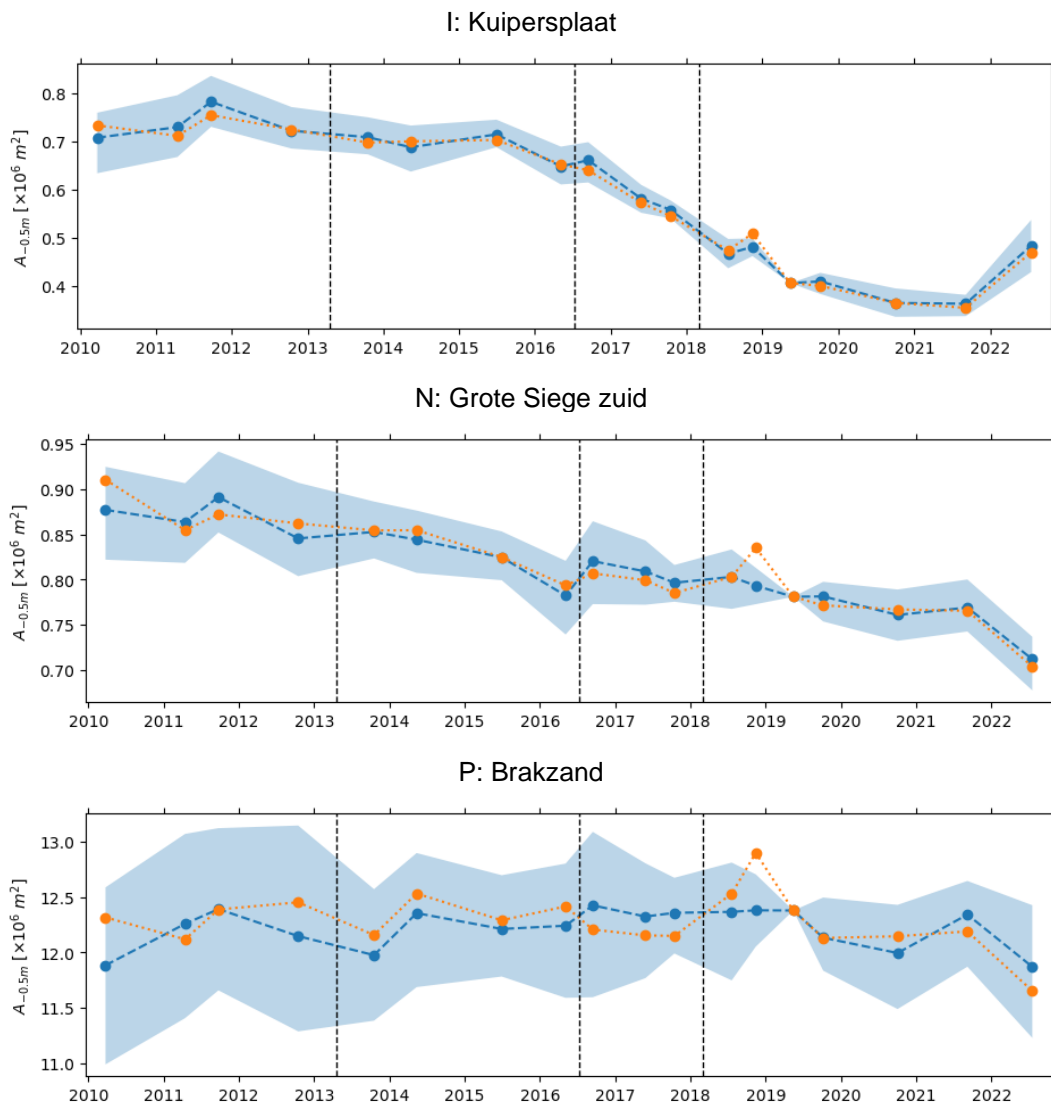


Figuur 3-6 Profielontwikkeling bij de Holwerderbalg ten oosten van Ameland op basis van de Vaklodingendataset uit Oost et al. (2020).

### 3.3.3 Zoutkamperlaag(I-R)

De platen in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag vallen buiten het sterkste bodemdalingsgebied en worden hier ter referentie besproken. Ook in de Zoutkamperlaag zien we hoe natuurlijke dynamiek kan bijdragen aan het krimpen van platen, voornamelijk in de buurt van de grotere geulen, zie bijvoorbeeld de Kuipersplaat (Figuur 3-7 I) en het gebied direct ten zuiden van Schiermonnikoog (voorbeeld Figuur 3-7 N; verdere voorbeelden K, L, M in Appendix C.1). Voor het jaar 2022 laat de Kuipersplaat een stijging van plaatareaal zien, of deze stijging tijdelijk is of een omslag naar sedimentatie aangeeft is nog onduidelijk. De arealen van de grootste platen in het westen van het gebied (voorbeeld Figuur 3-7 P; verdere voorbeelden O, R in Appendix C.1) vertonen dezelfde ontwikkelingen als het plaatareaal van het gehele kombergingsgebied en blijven grotendeels constant met geringe fluctuaties ten opzichte van de onzekerheidsmarge. De arealen van enkele kleinere platen nemen licht af (voorbeeld Figuur 3-7 N; ander voorbeeld Q in Appendix C.1).

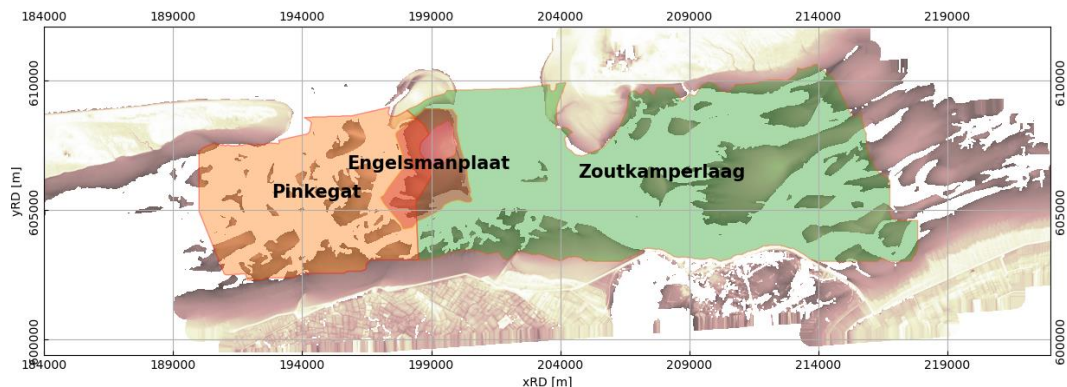




Figuur 3-7 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor enkele voorbeelden van platen in het Zoutkamperlaag kobergingsgebied (I,N,P in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toon de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

### 3.4 Langetermijntrends

Naast de opnamen van het Friesche Zeegat die in opdracht van NAM sinds 2010 worden gemaakt, zijn er langer lopende meetreeksen door Rijkswaterstaat (RWS) beschikbaar, de zogenoemde Vaklodingen. Hoewel de onzekerheid die gepaard gaat met Vaklodingen vele malen groter is dan die met de NAM LiDAR datareeks wordt bereikt, is het waardevol om resultaten op basis van de twee datasets te vergelijken. Van der Lugt et al. (2019, 2020a) hebben een methode voorgesteld om de twee datareeksen met elkaar te vergelijken, en deze wordt dit jaar weer gehanteerd. In de meeste jaren dekken de Vaklodingen niet het hele gebied tot en met de eiland- en vastelandsranden. Daarom is er een omhullende polygoon gedefinieerd waarin voor alle opnamejaren Vaklodingendata beschikbaar zijn, en deze omhullende is gebruikt bij de definitie van de deelgebieden Pinkegat, Zoutkamperlaag en Engelsmanplaat (Figuur 3-8). Dit voorkomt dat er bathymetrie moet worden geëxtrapoleerd. Er zijn geen nieuwe Vaklodingen beschikbaar gekomen sinds 2019.

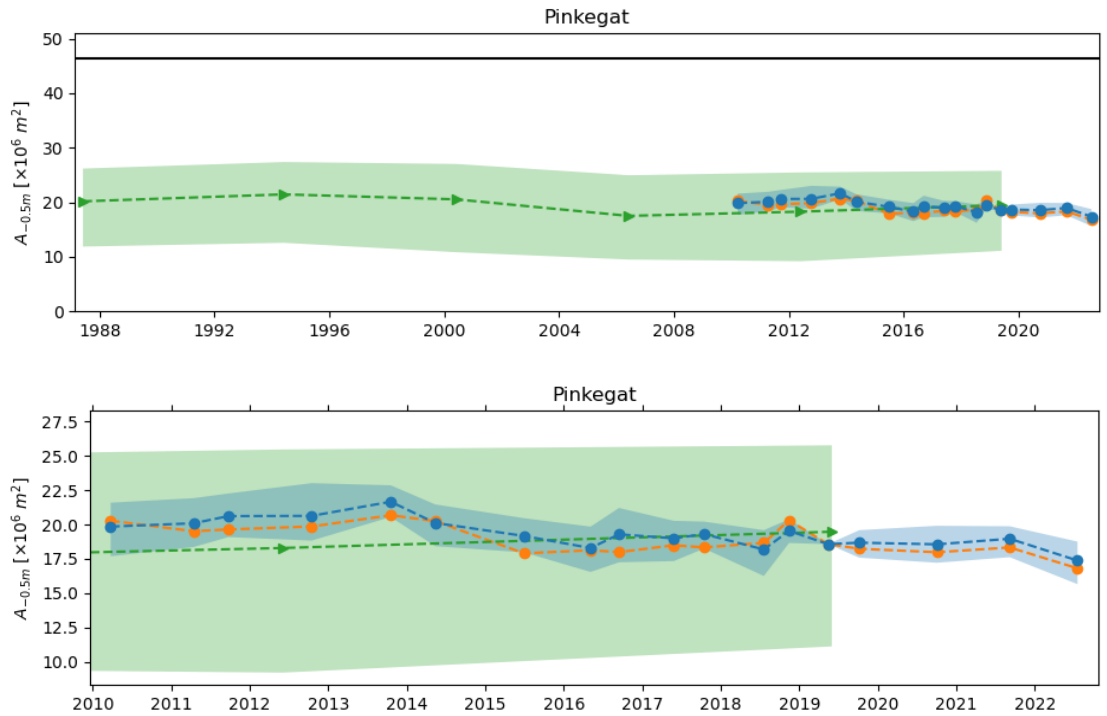


*Figuur 3-8 De bijgesneden polygonen voor de analyse van langetermijntrends. Bijsnijding heeft plaatsgevonden op basis van de vlakdekking van de Vaklodingenreeks.*

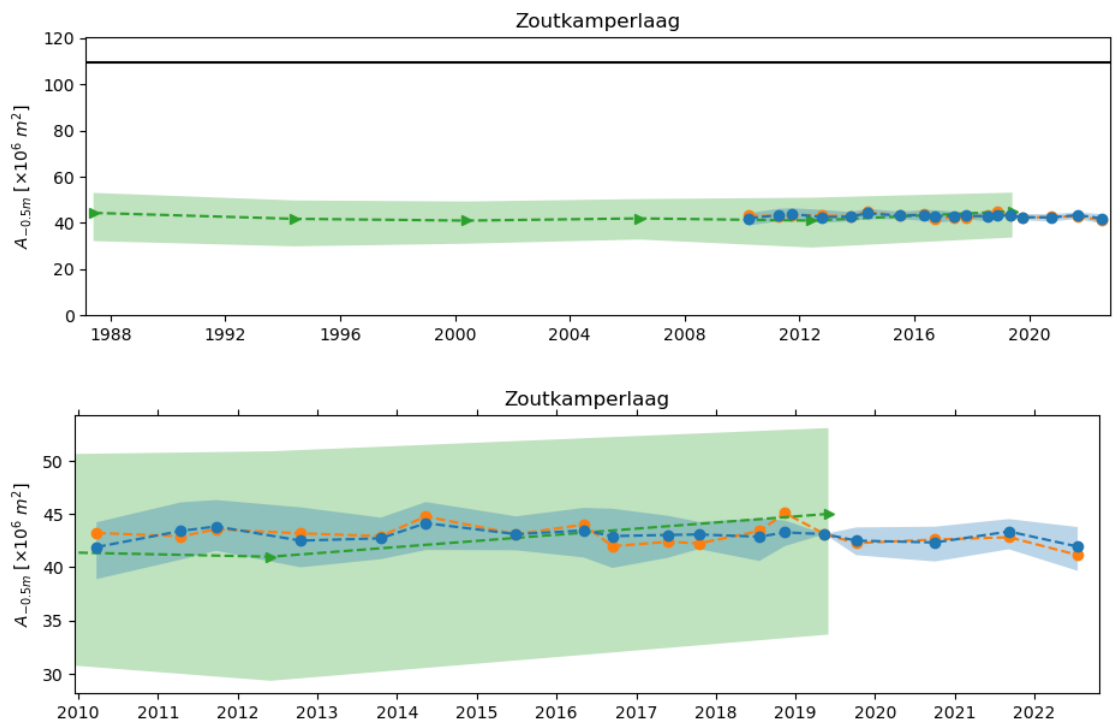
Een vergelijking van areaalontwikkeling op basis van de RWS Vaklodingen voor de periode 1987-2019 en een uitsnede van de NAM LiDAR data gedurende de monitoringsperiode sinds 2010 wordt weergegeven in Figuur 3-9, Figuur 3-10 en Figuur 3-11. Er zijn twee RWS opnamen die binnen de monitoringsperiode vallen: een opname in 2012 en een opname in 2019. Deze opnamen sluiten aan op de NAM data voor beide kombergingsgebieden. Het plaatareaal in 2012 berekend uit de Vaklodingen wijkt in beide kombergingsgebieden iets meer af van de NAM datareeks dan het 2019 areaal, maar dit verschil is klein en valt binnen de onzekerheidsmarge van de NAM dataset (Figuur 3-9, Figuur 3-10).

De uit de Vaklodingen afgeleide arealen vallen binnen de onzekerheidsmarge van de LiDAR metingen. In Vaklodingen zijn de gegevens voor plaatgebieden eveneens gebaseerd op LiDAR opnamen. Verschillen met de NAM LiDAR kunnen, naast inherente verschillen in de opwerking van LiDAR beelden door verschillende meetdiensten, ook veroorzaakt zijn door een ander moment van inwinning of het verschil in resolutie tussen de Vaklodingen en de NAM data.

Op basis van de NAM data bleek de variabiliteit in de ontwikkeling van het plaatareaal boven NAP-0.5m in het Pinkegat groter te zijn dan in de Zoutkamperlaag. In de RWS dataset is dit verschil in variabiliteit ook te zien, zij het dan op een langere termijn.

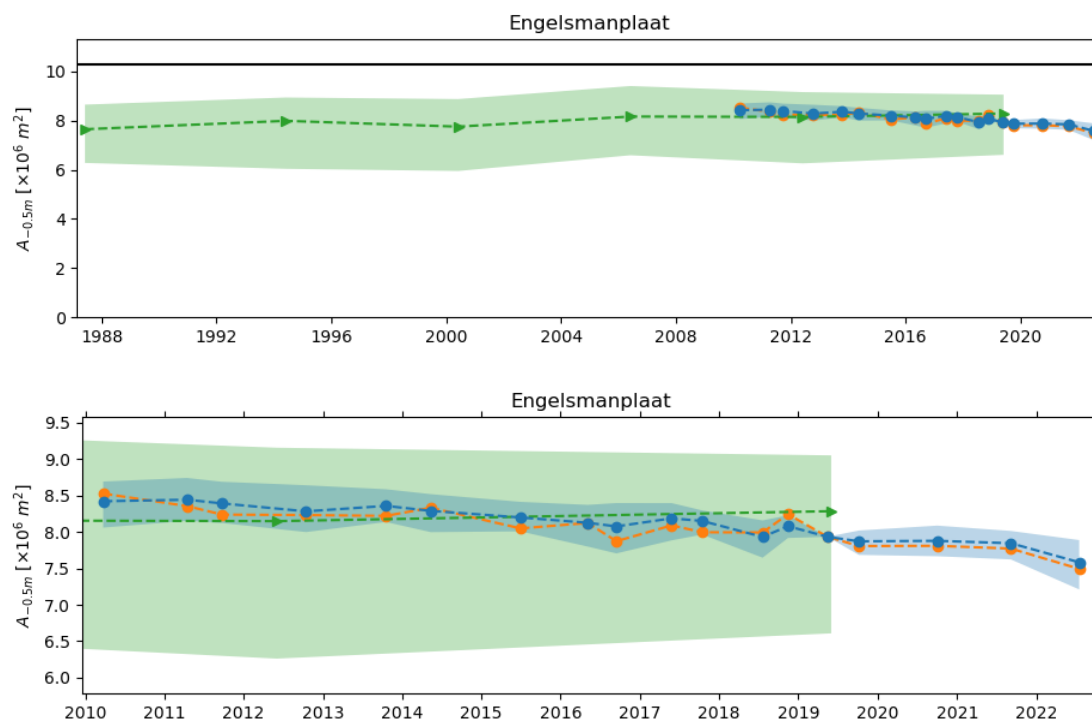


Figuur 3-9 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m voor het Pinkegat kombergingsgebied tussen Vaklodingen (groen  $\dashrightarrow$ ), de originele NAM LiDAR data (oranje,  $\dashrightarrow$ ), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw,  $\dashrightarrow$ ). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van de controlepolygoon (boven). De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de LiDAR correctie, de groene onzekerheidsband toont de onzekerheidsmarge van de Vaklodingen. Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).



Figuur 3-10 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m voor het Zoutkamperlaag kombergingsgebied tussen Vaklodingen (groen  $\dashrightarrow$ ), de originele NAM LiDAR data (oranje,  $\dashrightarrow$ ), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw,  $\dashrightarrow$ ). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van de controlepolygoon (boven). De

blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de LiDAR correctie, de groene onzekerheidsband toont de onzekerheidsmarge van de Vaklodingen. Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).



Figuur 3-11 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m voor de Engelsmanplaat. Vaklodingen (groen ->--), de originele NAM LiDAR data (oranje, --o--), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, --o--). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van de controlepolygoon (boven). De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de LiDAR correctie, de groene onzekerheidsband toont de onzekerheidsmarge van de Vaklodingen. Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).

### 3.5 Effect van hogere grid resolutie op berekening plaatareaal

Aansluitend op het advies van de Auditcommissie met betrekking tot de mogelijkheden om morfologische effecten in meer detail te onderzoeken, is getest of de berekeningen voor plaatareaal gevoelig zijn voor een hogere grid resolutie van de LiDAR data.

Als test zijn de arealen van de Engelsmanplaat en het Rode Hoofd nogmaals berekend op basis van een 1x1 m grid resolutie. De berekende resultaten verschillen slechts 0.1-0.2% met de eerder berekende arealen op basis van de 10x10 m grids. Het is verwacht dat de verschillen miniem zijn, gezien beide grid resoluties (1x1 m als ook 10x10 m) een hoog detail niveau voorstellen relatief tot de schaal van de platen (schaal van kilometers).

### 3.6 Conclusies areaalontwikkeling

Het gerapporteerde plaatareaal in de Zoutkamperlaag is constanter dan in het Pinkegat. Voor het Pinkegat laat de LiDAR meetreeks 2010-2022 een lichte afname van plaatareaal zien. De deelgebiedsanalyse toont aan dat dit met name komt door kleiner wordende platen in de centraal gelegen gebieden, Pinkegat west-1 (B, Figuur 3-4), Pinkegat oost-2 (F, Figuur 3-4) en het westelijke deel van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5) waar een verbreding en uitbochtiging van de geul optreedt. Deze afname is klein ten opzichte van de 95%

onzekerheidsmarge in de gecorrigeerde bodemhoogte. De opname van 2022 laat een kleine afname van de plaatarealen zien van zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag, echter is deze afname vergelijkbaar met fluctuaties in voorgaande jaren en relatief klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge. Wanneer de LiDAR metingen tussen 2010-2022 worden geplaatst in de context van lange termijn ontwikkelingen in de Vaklodingen tussen 1987-2019 dan zijn de geobserveerde plaatveranderingen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag insignificant.

Hoewel de ontwikkeling van het plaatareaal op kombergingsniveau geen significante verandering laat zien, toont de analyse van deelgebieden aan dat veranderingen in plaatareaal in actieve (deel)gebieden wel degelijk kunnen worden gemonitord met LiDAR. Hieruit concluderen we dat de eventuele trend op kombergingsniveau zo klein is dat het totale plaatareaal zich niet buiten de onzekerheidsband ontwikkelt. Er vindt geen significante aangroei van totaal plaatareaal plaats, en ook geen significante afname.

De berekening van wadplaatarealen is ongevoelig voor grid resoluties hoger dan 10x10 m. Areaalberekeningen zijn op hoge grid resolutie veel rekenintensiever terwijl de gewonnen nauwkeurigheid verwaarloosbaar klein is.

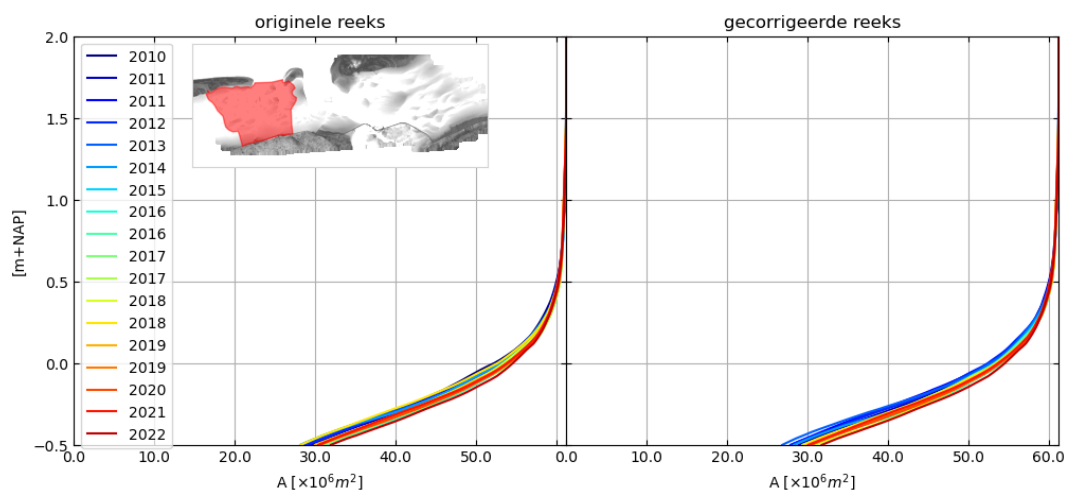
## 4 Analyse ontwikkeling plaathoogte

De ontwikkeling van plaathoogte in het Friesche Zeegat wordt op een aantal manieren onderzocht. Als basis zijn wederom de hoogtedata op 10x10 m grid resolutie gebruikt. Als eerste geven hypsometrische curven de cumulatieve areaalverdeling in relatie tot hoogte weer (dat wil zeggen, de curve verdeelt voor iedere referentiehoogte de totale oppervlakte van een gebied in een gebied onder en boven de betreffende referentiehoogte). De curven geven het totale overzicht van de sedimentverdeling over de verticaal, en zijn dus veelzeggender dan tijdreeksen op NAP-0,5m alleen. De trend van de hypsometrie, bepaald op kombergingsschaal, wordt vergeleken met de hypsometrische ontwikkelingen van de deelgebieden, om zo de veranderingen in de hypsometrie beter te verklaren. Daarnaast wordt een aantal dwarsdoorsnedes gepresenteerd om lokale veranderingen in kaart te brengen. Dezelfde kombergings- en deelgebieden als in Hoofdstuk 3 worden geanalyseerd, zie Figuur 3-1 voor de kombergingsgebieden en Figuur 3-3 voor de deelgebieden.

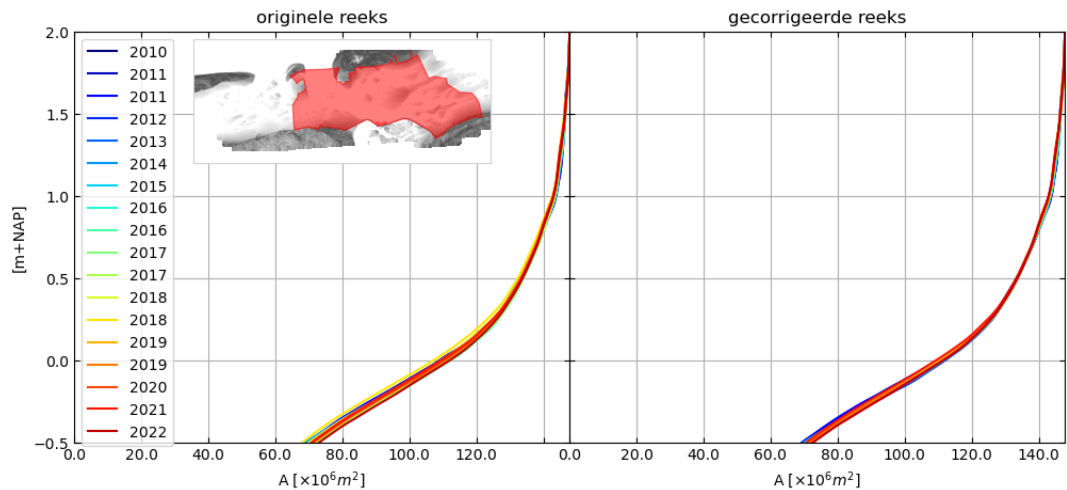
### 4.1 Hypsometrie kombergingsgebieden

De platen in het kombergingsgebied Pinkegat (Figuur 4-1) liggen gemiddeld genomen lager dan in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag (Figuur 4-2). In het kombergingsgebied Zoutkamperlaag blijkt ongeveer de helft van het plaatareaal gelegen boven de NAP-0,5m contour ook hoger dan NAP+0m te liggen. De andere helft ligt tussen NAP-0,5m en NAP+0m. In het kombergingsgebied Pinkegat is de verhouding ongeveer 25% boven NAP+0m, en 75% daaronder.

Kijkend naar de ontwikkeling door de jaren heen, tonen de hypsometrische curven dat waar blauwe curven boven rode curven liggen, er een afname in hoogte heeft plaatsgevonden. Deze afname is binnen het Pinkegat en Zoutkamperlaag echter gering.



Figuur 4-1 Hypsometrische curven voor het Pinkegat kombergingsgebied. Op de horizontale as is het wateroppervlak horende bij een hoogte op de verticale as geplott. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0,5. De originele data (links) en de gecorrigeerde data (rechts) worden vergeleken.



Figuur 4-2 Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Op de horizontale as is het wateroppervlak horende bij een hoogte op de verticale as geplot. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0,5. De originele data (links) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).

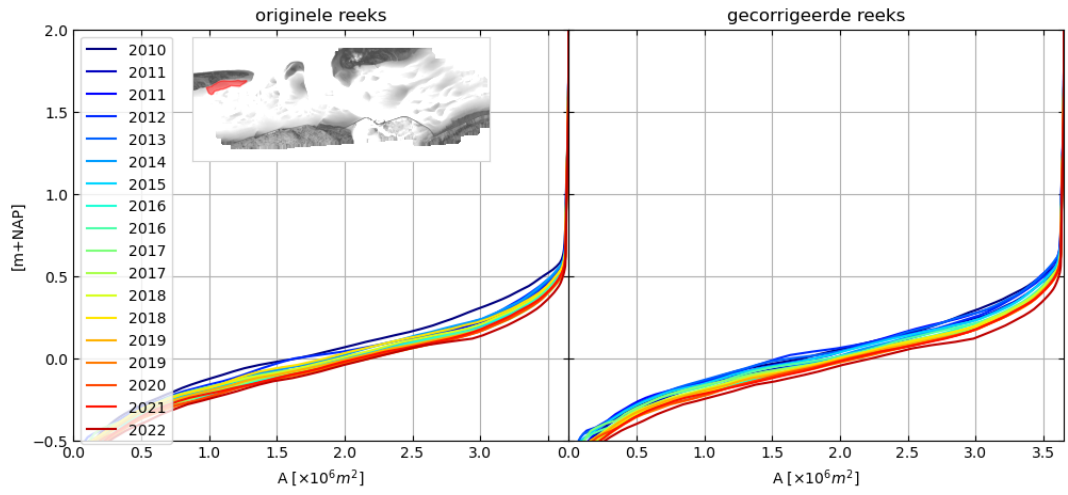
## 4.2 Hypsometrie individuele platen

De hoogteontwikkeling van een aantal platen in het Pinkegat analyseren we in detail om tot een beter begrip van het geaggregeerde beeld van het Pinkegat te komen (Figuur 4-3).

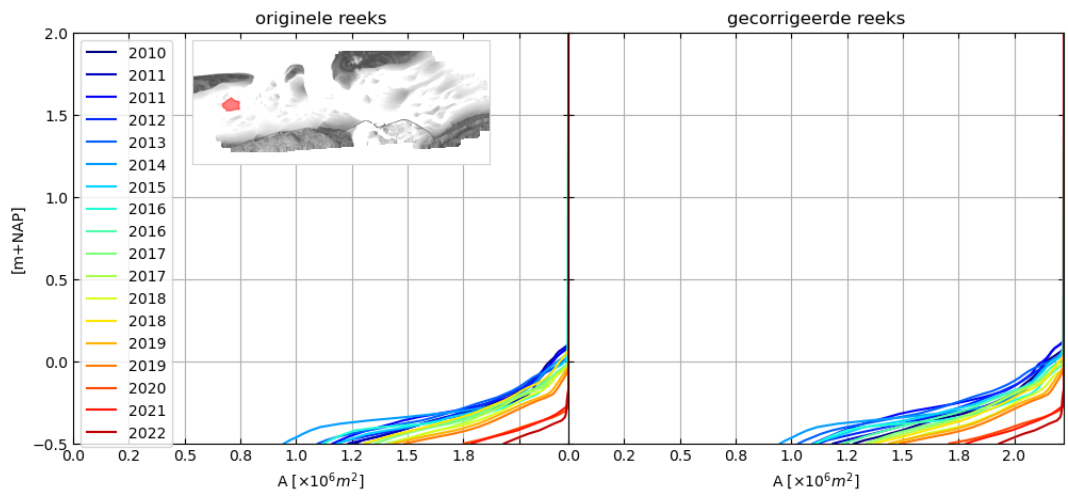
Uit de areaalontwikkeling van platen boven NAP-0,5m leiden we af dat de bodemdaling invloed had op de areaalontwikkeling in het gebied ten zuiden van Ameland-oost (A). De hypsometrische curven laten zien dat bij iedere te kiezen referentiehoogte in gebied A het plaatareaal vrij monotoon afneemt. Hoger in de verticaal betekent bij deze platen ook dichter bij de kwelder gelegen en daarmee ook dichter bij het midden van de bodemdalingsskom.

De drie meest westelijke platen, pal tegen het wantij gelegen (B, C, D), liggen voornamelijk onder NAP+0m en laten een duidelijke verlaging (B), ophoging (C) of een vrij stabiele ontwikkeling (D) zien. Het areaal van deze platen verandert over de hele tijdsduur van de dataset. Terwijl het areaal van de meest noordelijke van deze platen (B) duidelijke afneemt, vooral in de meest recente jaren, is de centrale plaat (C) in de monitoringsperiode duidelijk gegroeid: een hoogtetoename van 30-40 cm heeft er voor gezorgd dat deze plaat bijna verdubbelde in oppervlak (contour NAP-0,5m; Figuur 4-3 C). De twee platen in het oosten van het kombergingsgebied Pinkegat (E, F) laten een ander soort ontwikkeling zien. Plaat Pinkegat oost-1 (E) neemt beneden ca. NAP-0,1m in oppervlakte toe, terwijl daarboven de oppervlakte en hoogte afnemen. Plaat Pinkegat oost-2 (F) laat een tegenovergestelde ontwikkeling zien: beneden ca. NAP+0,2m neemt het plaatoppervlak af, daarboven groeit het oppervlak en neemt de hoogte toe. De eerste plaat vlakt als het ware af, de tweede plaat versteilt.

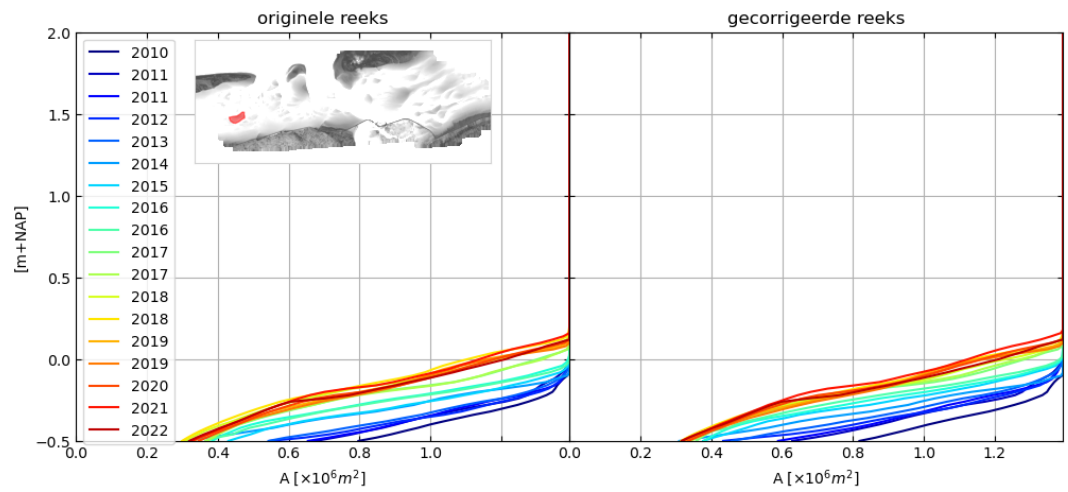
### A: Ameland zuidoost



### B: Pinkegat west-1

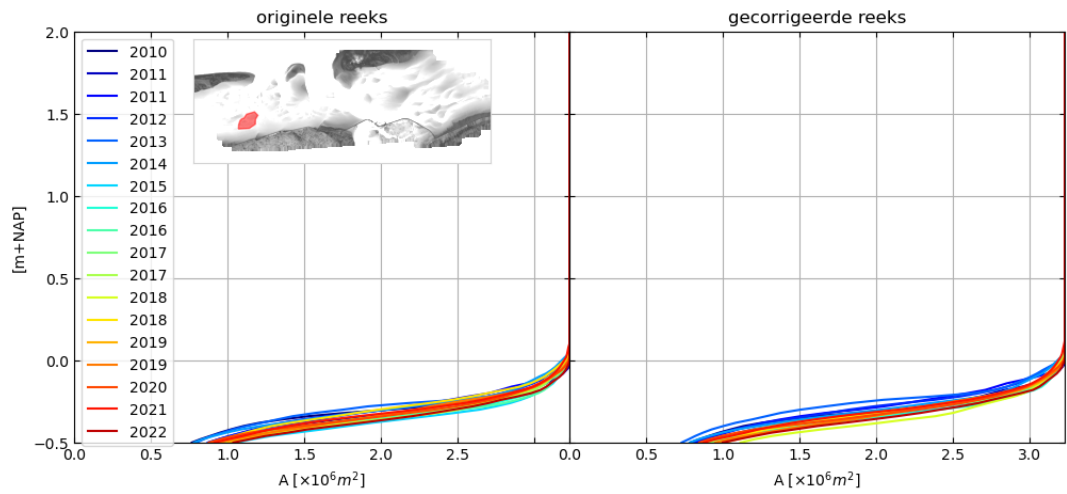


### C: Pinkegat west-2

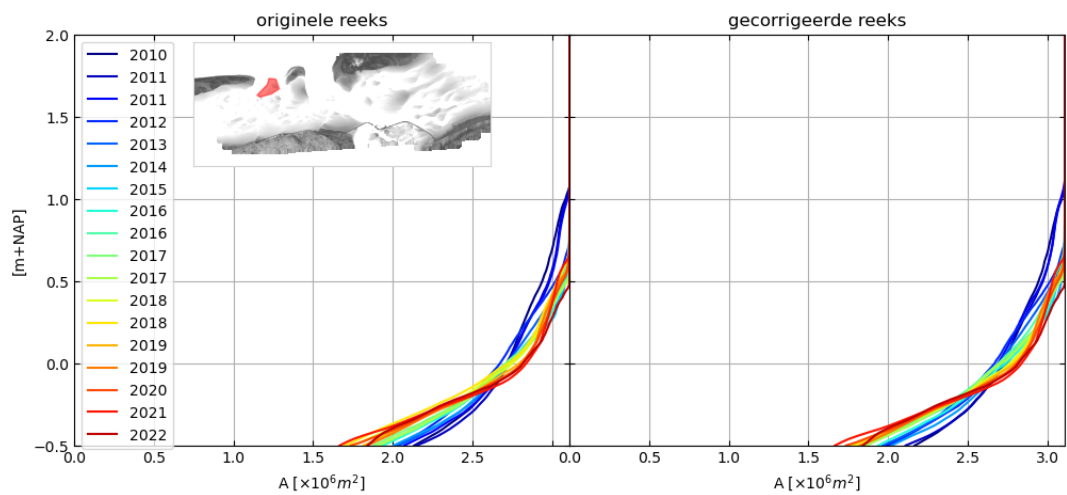




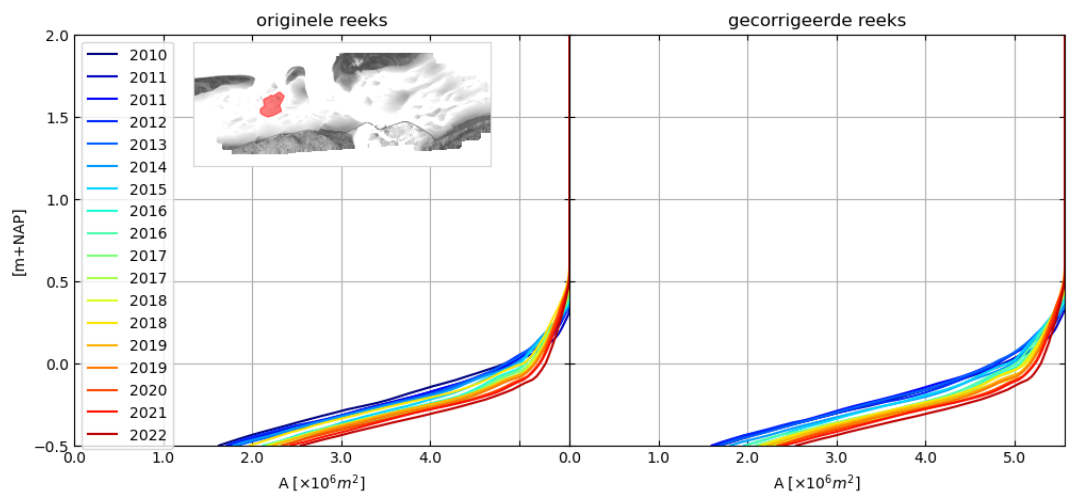
### D: Pinkegat west-3



### E: Pinkegat oost-1

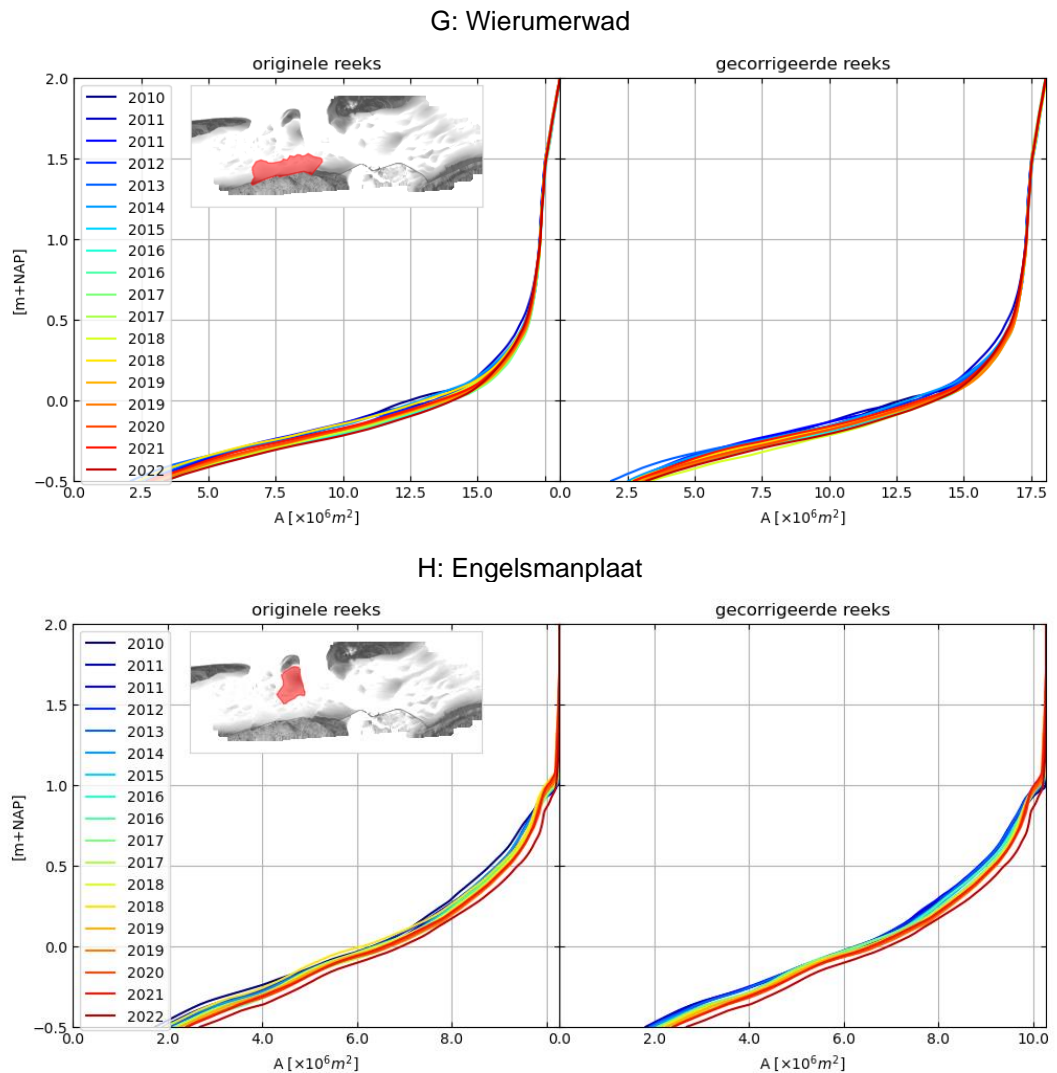


### F: Pinkegat oost-2



Figuur 4-3 Hypsometrische curven voor de platen van het Pinkegat kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij een hoogte op de verticale as. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0.5. De originele data (links) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).

Ter plaatse van het Wierumerwad (G, Figuur 4-4) is de plaathoogte vrij constant. Voor de Engelsmanplaat (H, Figuur 4-4) laat de hypsometrie op basis van de gecorrigeerde dataset zien dat de sedimentatie varieert over de verticaal. Op en net onder NAP+0m liggen de curves dicht op elkaar en over elkaar heen. Hoger en lager dan NAP+0m is er meer differentiatie in de curves van de opeenvolgende jaren, en wordt de plaat iets lager met de tijd.



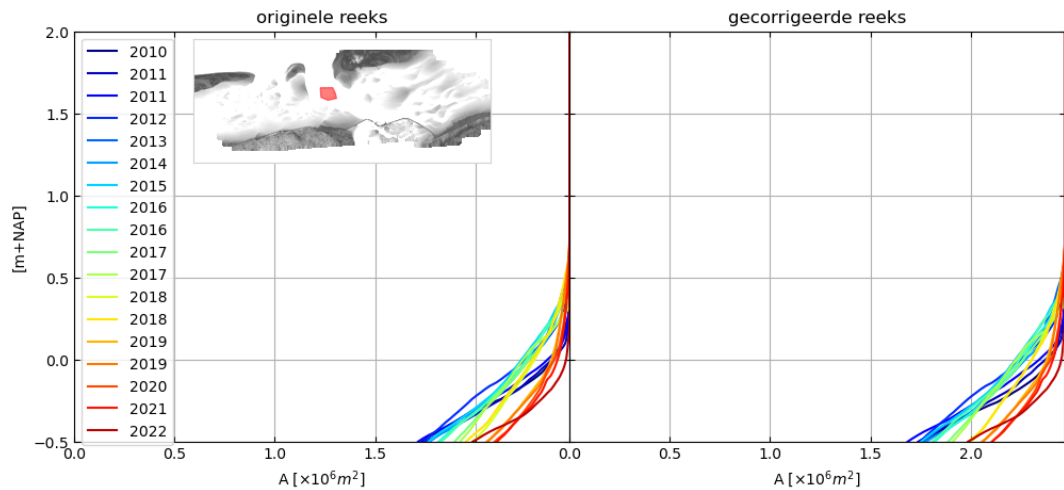
*Figuur 4-4 Hypsometrische curven voor de platen tussen de Pinkegat en Zoutkamperlaag kombergingsgebieden. Op de horizontale as is het wateroppervlak horende bij een hoogte op de verticale as geplott. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0,5. De originele data (links) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).*

Als laatste beschouwen we hier ook de platen binnen het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (Figuur 4-5). Individuele platen binnen dit gebied vertonen wisselend gedrag. Bijvoorbeeld voor de Kuipersplaat (I) is het signaal van plaatveranderingen veel sterker dan die van het geaggregeerde kombergingsgebied. De plaat liet de afgelopen jaren een afname van areaal zien en werd steiler tot de meting 2022 waarin een trendbreuk te zien is, waarbij het plaatareaal onder -0.3m is toegenomen en de plaat weer lijkt af te vlakken. De platen tussen Eilanderbult en Paesens (J) vertonen een lichte groei in hoogte tussen NAP-0,5m en NAP+1m. In tegenstelling hiermee, vertonen Schiermonnikoog zuid-1 (K), Grote

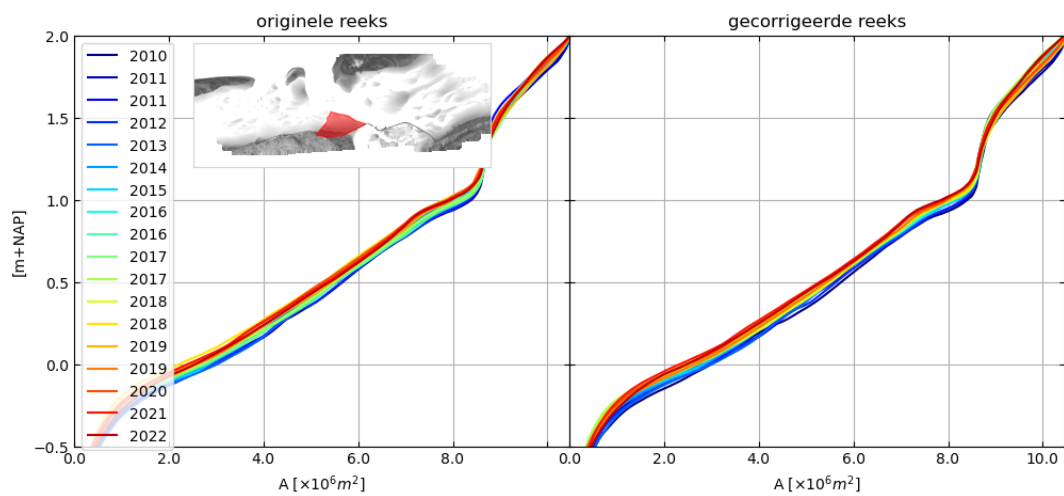
Siege Zuid (N) en Zoutkamperlaag zuidoost-1 (Q) groei in hoogte boven NAP+1m , NAP+0m en NAP-0,25m respectievelijk, en een afname in hoogte daaronder.

De correctie van de datareeks leidt er voor de platen ten zuiden van Schiermonnikoog (K, L, M) toe dat de spreiding in de hoogtes van de hypsometrische curves afneemt. Voor het Brakzand (P) neemt de bandbreedte rond de hypsometrische curven ook af door de voorgestelde correctie. De trend van geringe plaatverhoging over de gehele verticaal blijft onveranderd door toepassing van de correctie. Ook bij platen N, O, Q en R laat de referentievlakcorrectie het signaal van de deelgebieden meer gelijkmatig veranderen.

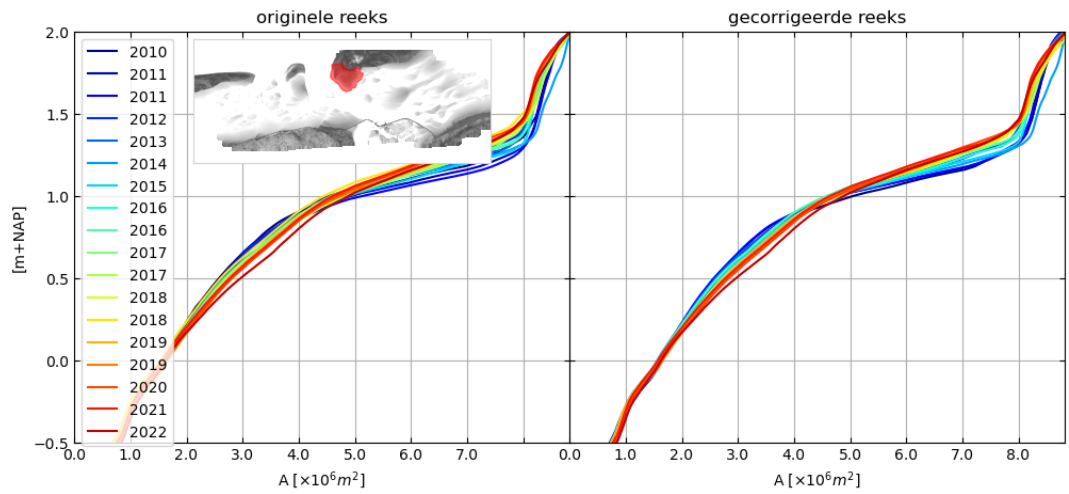
### I: Kuipersplaat



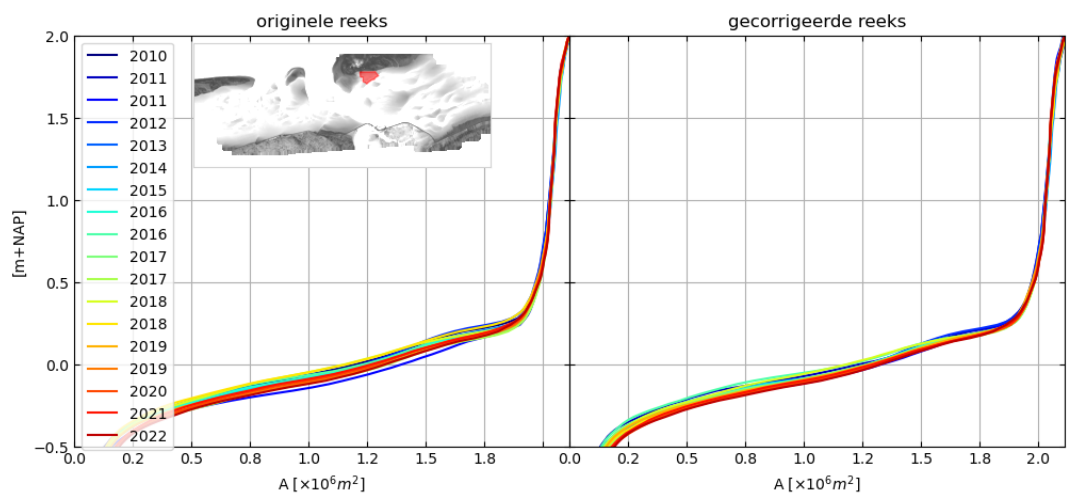
### J: Eilanderbult



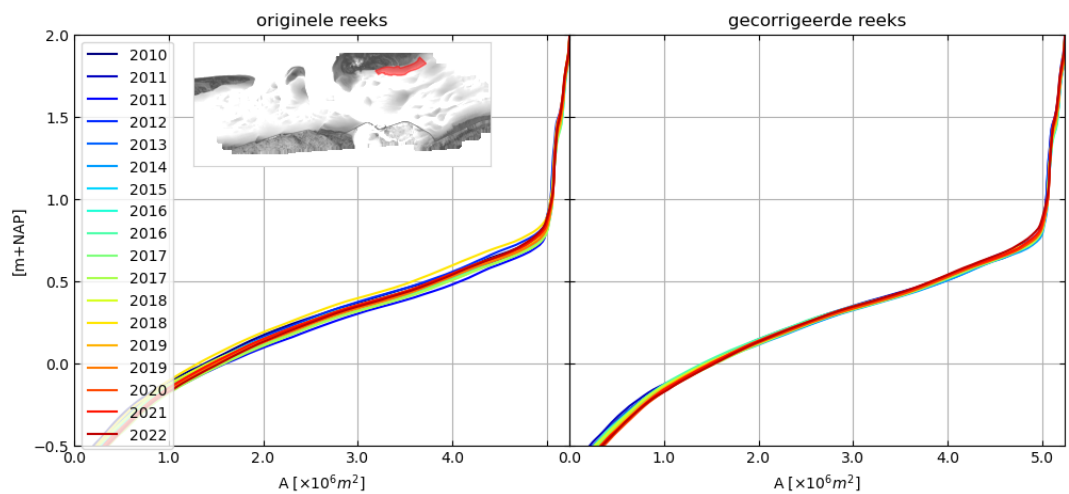
### K: Schiermonnikoog zuid-1



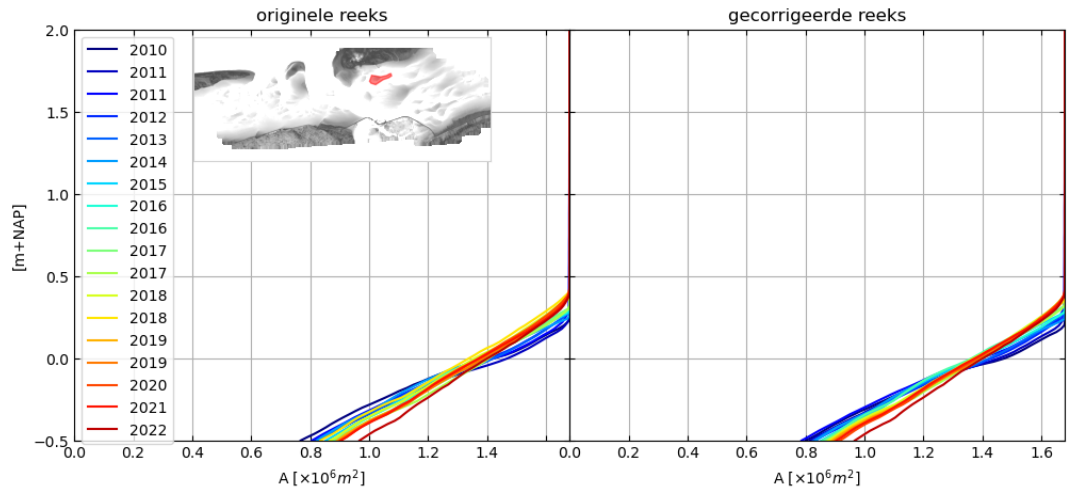
### L: Schiermonnikoog zuid-2



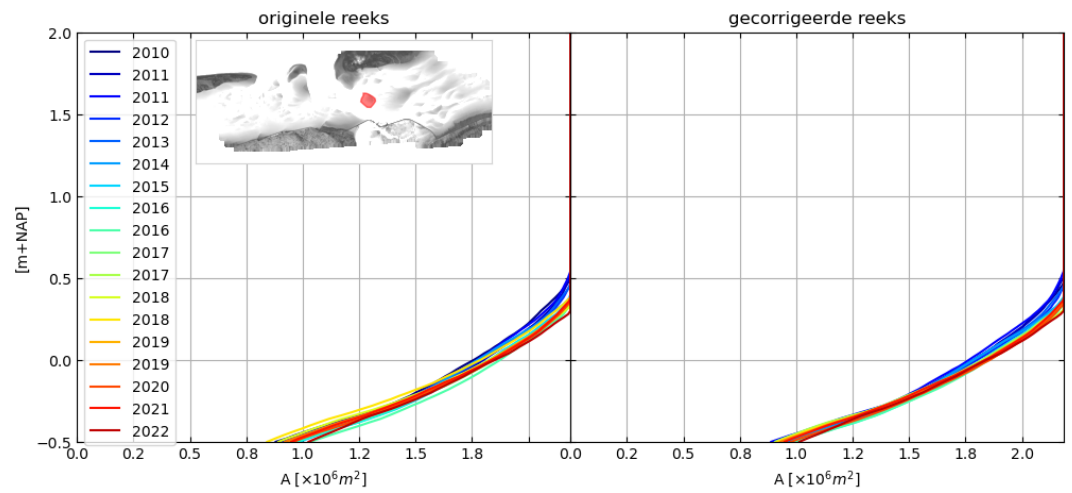
### M: Schiermonnikoog zuid-3



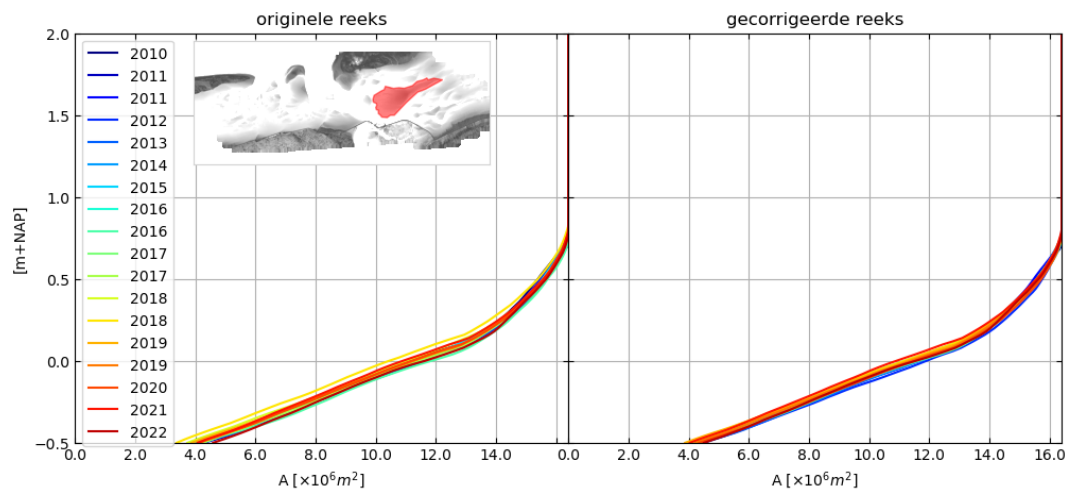
### N: Grote Siege zuid



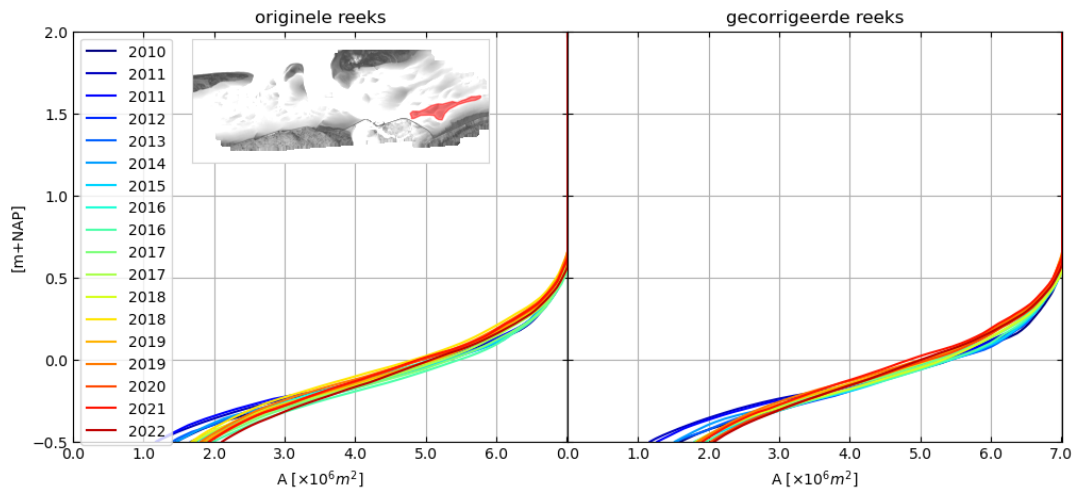
### O: Roode Hoofd



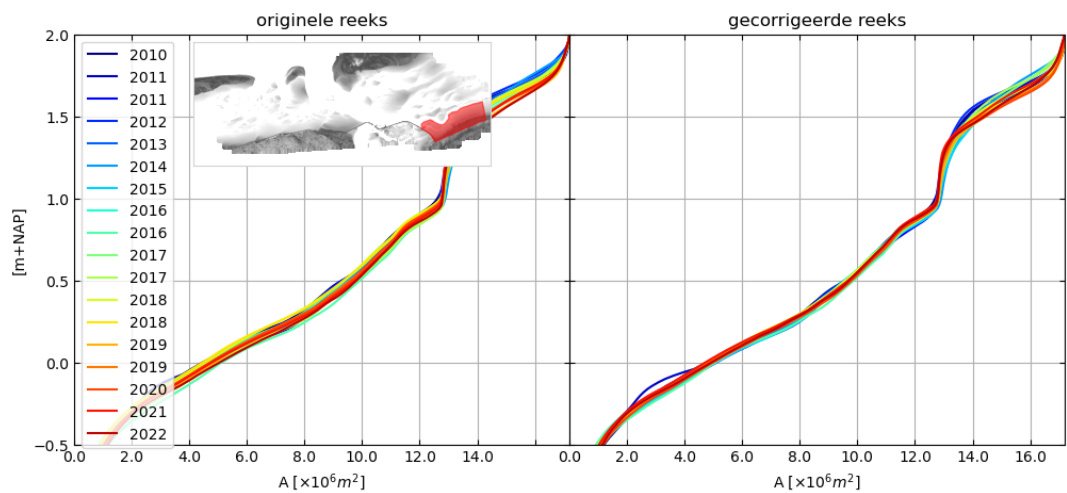
### P: Brakzand



### Q: Zoutkamperlaag zuidoost-1



### R: Zoutkamperlaag zuidoost-2

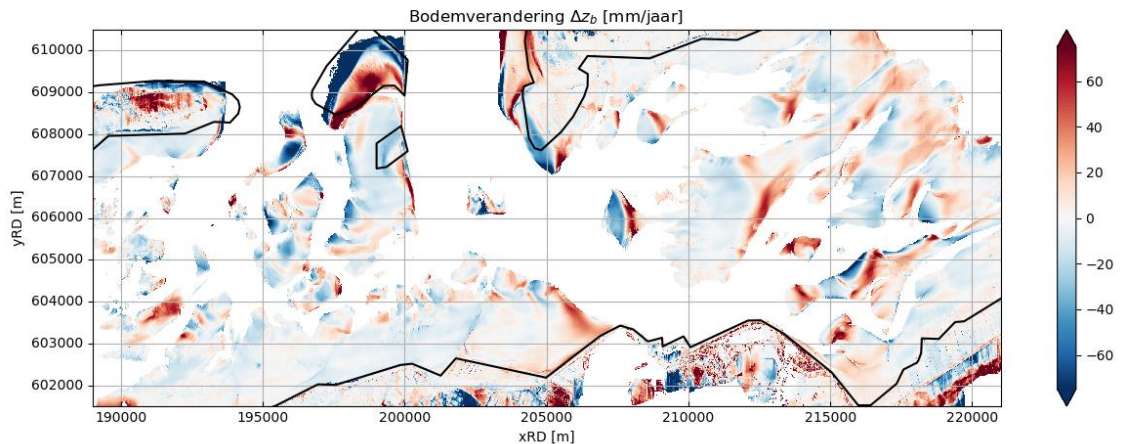


Figuur 4-5 Hypsometrische curven voor de platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij een hoogte op de verticale as. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0,5. De originele data (links) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).

## 4.3 Tijdsgemiddelde ontwikkeling

Tijdsgemiddelde bodemhoogteveranderingen zijn weergegeven in Figuur 4-6. Om hoogteveranderingen per roostercel te laten zien is de lineaire trend berekend in de bodemhoogtemetingen voor elke roostercel van 10x10m. De trendcoëfficiënt is uitgedrukt in millimeters bodemhoogteverandering per jaar. Alléén roostercellen waarvoor meer dan 8 geldige waarden aanwezig zijn in de meetreeks hebben een waarde gekregen. De versimpeling van de lange-termijnveranderingen tot een lineaire trend is een gegronde aanpak: splitst men de geobserveerde veranderingen in het kombergingsgebied op in onafhankelijke componenten (d.m.v. eigenfunctieanalyse), blijken lineaire veranderingen veruit dominant en beschrijven 67% van alle variantie. Andere componenten beschrijven kortere termijn fluctuaties in de bodemligging die tussen de 0-15% van de variantie beschrijven met een gemiddelde van slechts 3%. Daarmee kan worden geconcludeerd dat de bodemveranderingen in het kombergingsgebied worden gedomineerd door lineaire lange termijn veranderingen.

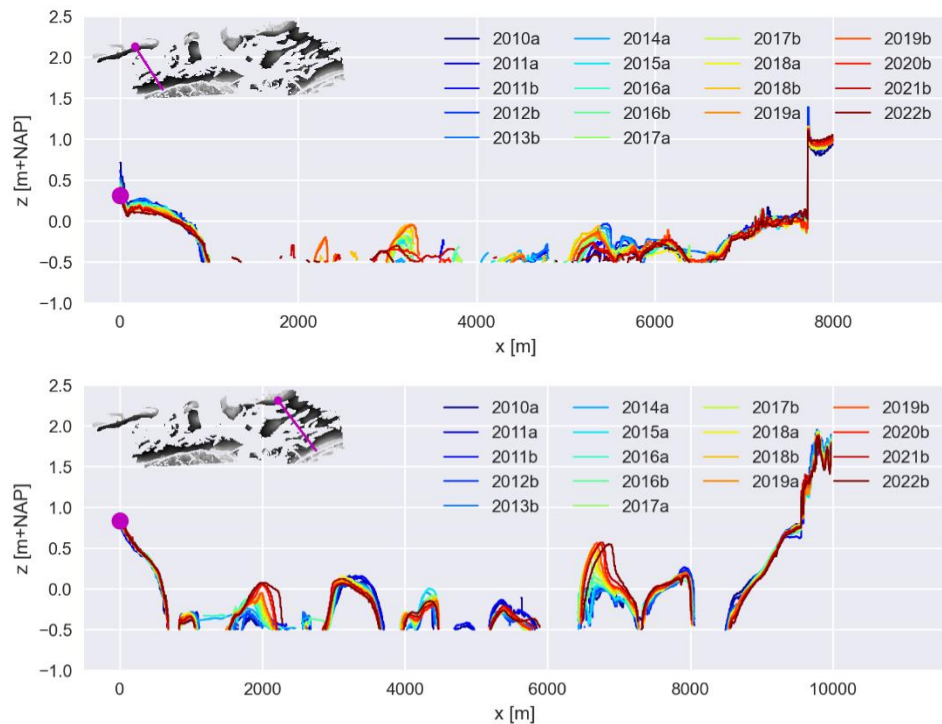
Migratiepatronen domineren het verkregen beeld. De grootste veranderingen zijn de aanlanding van het Rif op de Engelsmanplaat waardoor het Oude Smerig Gat (OSG) verzandt (zie Figuur 1-2 voor benamingen). Er vindt sterke erosie plaats aan de oostzijde van het Binnenplaatgat en het Roode Hoofd migreert sterk oostwaarts. De geul Pinkegat bocht wat uit naar het oosten wat tot erosie van de Engelsmanplaat leidt. De meerderheid van de platen in de Zoutkamperlaag migreren naar het oosten. In Figuur 4-6 is dat terug te zien als blauwe vlakken (een afnemende hoogte) westelijk gelegen van rode vlakken met een toenemende hoogte (zie ook Figuur 4-8). Een lichte afname in plaathoogte valt op bij de platen ten Zuiden van Ameland-oost en het midden van de Engelsmanplaat, een zeer geringe afname vindt plaats op het Wierumerwad.



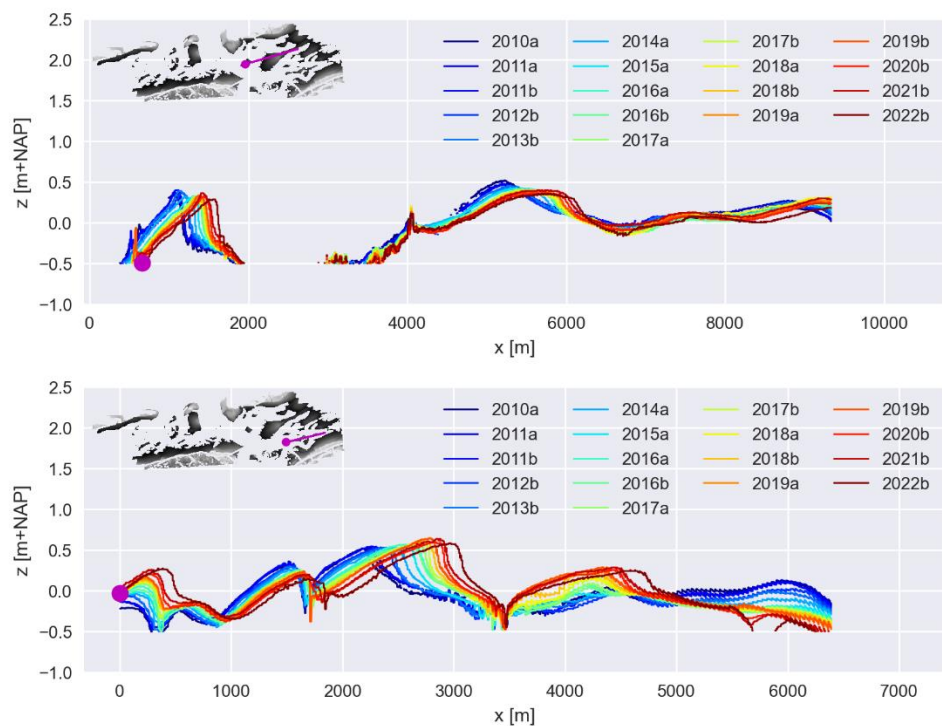
*Figuur 4-6 De gemiddelde verandering in bodemhoogte (mm/jaar) zoals berekend per roostercel op basis van de tijdserie 2010-2022 met voorgestelde correctie. Blauwe kleuren geven verlagings weer, rode kleuren sedimentatie. Cellen waar minder dan 8 waarnemingen aanwezig waren in de tijdreeks zijn uitgesloten van de berekening en blijven dus wit (geen data).*

#### 4.4 Profielen

Aan de hand van een aantal profielen verifiëren we conclusies uit de geaggregeerde data. De platen in het westelijk deel van het kombergingsgebied Pinkegat liggen grotendeels lager dan de ondergrens van de LiDAR opnamen (NAP-0,5m, zie Figuur 4-7, bovenste paneel). In het kombergingsgebied Zoutkamperlaag liggen de platen gemiddeld genomen hoger (Figuur 4-7, onderste paneel). Alleen de platen die vastzitten aan Ameland en Schiermonnikoog, en de platen en kwelders langs het vasteland zijn zichtbaar in alle opnamen. Profielen op basis van Vaklodingendata laten zien hoe de geulen en platen zich ontwikkelden over de laatste 30 jaar (Figuur 4-9). De geulen in het Pinkegatgebied zijn veel dynamischer en worden de laatste jaren steeds ondieper. De geulen in het Zoutkamperlaaggebied zijn juist diep en heel stabiel gedurende alle opnamen sinds 1987. De profielontwikkeling van twee platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied bevestigt duidelijk de oostwaartse migratie van de platen in dit gebied, zoals ook al geconstateerd werd op basis van de tijdsgemiddelde ontwikkeling (Figuur 4-8). De meting van 2022 toont zelfs versterkte oostwaartse verplaatsing (Figuur 4-8, onderste paneel).

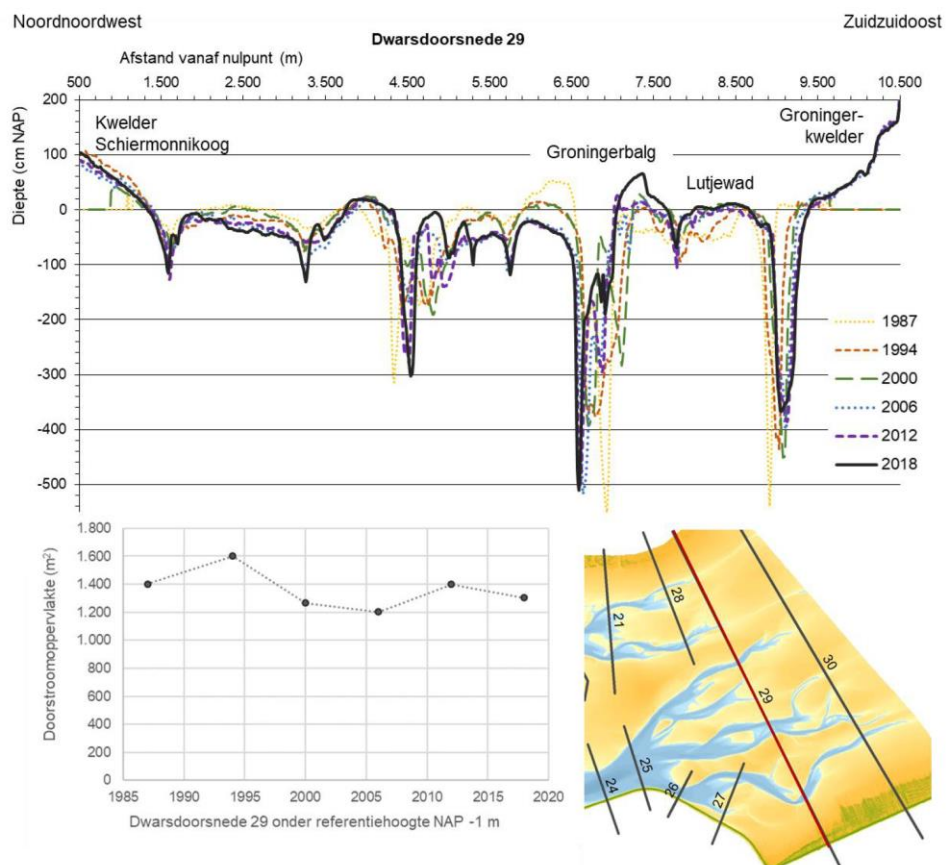
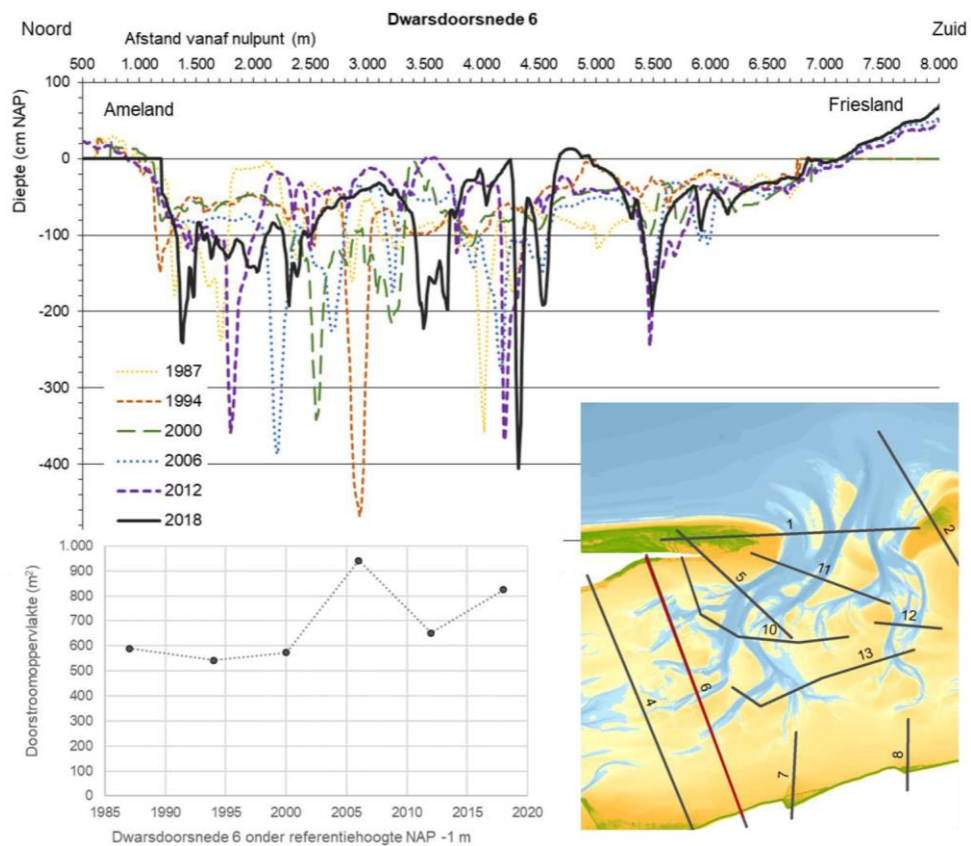


Figuur 4-7 Profielontwikkeling ten oosten van het wantij van Ameland (boven) en ten westen van het wantij van Schiermonnikoog (onder) op basis van de gecorrigeerde LiDAR opnamen. De kleuren gaan van 2010a (blauw) naar 2022b (rood). De magenta lijn op het referentiefiguur geeft de locatie van de profielen aan; het begin van het profiel komt overeen met de magenta stip.



Figuur 4-8 De ontwikkeling van twee west-oost profielen in het Zoutkamperlaaggebied op basis van de gecorrigeerde LiDAR opnamen welke de voortdurende oostwaartse migratie van de platen laten zien. De kleuren gaan van 2010a (blauw) naar 2022b (rood). De magenta lijn op het referentiefiguur geeft de locatie van de profielen aan; de stip komt overeen met het begin van het profiel.





Figuur 4-9 Profielontwikkeling ten oosten van het wantij van Ameland (boven), en ten westen van het wantij van Schiermonnikoog (onder) op basis van de Vaklopingendataset uit Oost et al. (2020).

## 4.5 Conclusies plaathoogte ontwikkeling

De resultaten uit de analyse van hypsometrische curven ondersteunen de conclusies getrokken uit de analyse van areaalontwikkeling op NAP-0,5m. Dat wil zeggen dat het plaatareaal in de Zoutkamperlaag op geaggregeerde schaal vrijwel constant blijft, en ook dat de ontwikkeling van deelgebieden niet sterk varieert. Kijkend naar de gehele meetperiode 2010-2022 lijkt het plaatareaal tussen NAP-0,5m en NAP+0,5m in het Pinkegat licht af te nemen, al lijkt het ook te stabiliseren sinds 2016. De afname ligt binnen de meetonzekerheid.

Voor deelgebieden en individuele platen binnen het Pinkegat vinden wel ontwikkelingen plaats die groter zijn dan de meetonzekerheid. Deelgebied B gaat het sterkst omlaag (orde 0,3m) en deelgebied C het sterkst omhoog (eveneens orde 0,3m). Deze veranderingen (B, C) zijn eerder een gevolg van geul-plaat dynamiek dan dat ze op een sterke band met de diepe bodemdaling duiden. De sterkste diepe bodemdaling vindt plaats in gebied A waar de plaatverlaging juist minder is (0,1m). De afname van de plaathoogte zou van noord naar zuid minder moeten worden als die een gevolg zou zijn van diepe bodemdaling. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen leidt tot veranderingen in plaathoogte die groter zijn dan de effecten van bodemdaling. Een eenduidig bodemdalingssignaal komt dus niet naar voren uit de LiDAR dataset.

Bij het vergelijken van de ontwikkeling van de hoogteverdeling van de platen, en hierbij ook dus de hypsometrische veranderingen, tussen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag moet ook rekening worden gehouden met de natuurlijke verschillen in morfologisch gedrag tussen de kombergingsgebieden. Zo is het geulsysteem van het Pinkegat veel dynamischer en herhalen gedragspatronen zich op een veel kortere tijdschaal (Elias & Oost, 2020). Hierdoor is het dus ook mogelijk dat de waargenomen lichte verlaging van de plaathoogtes onderdeel uitmaakt van dit periodieke gedrag.

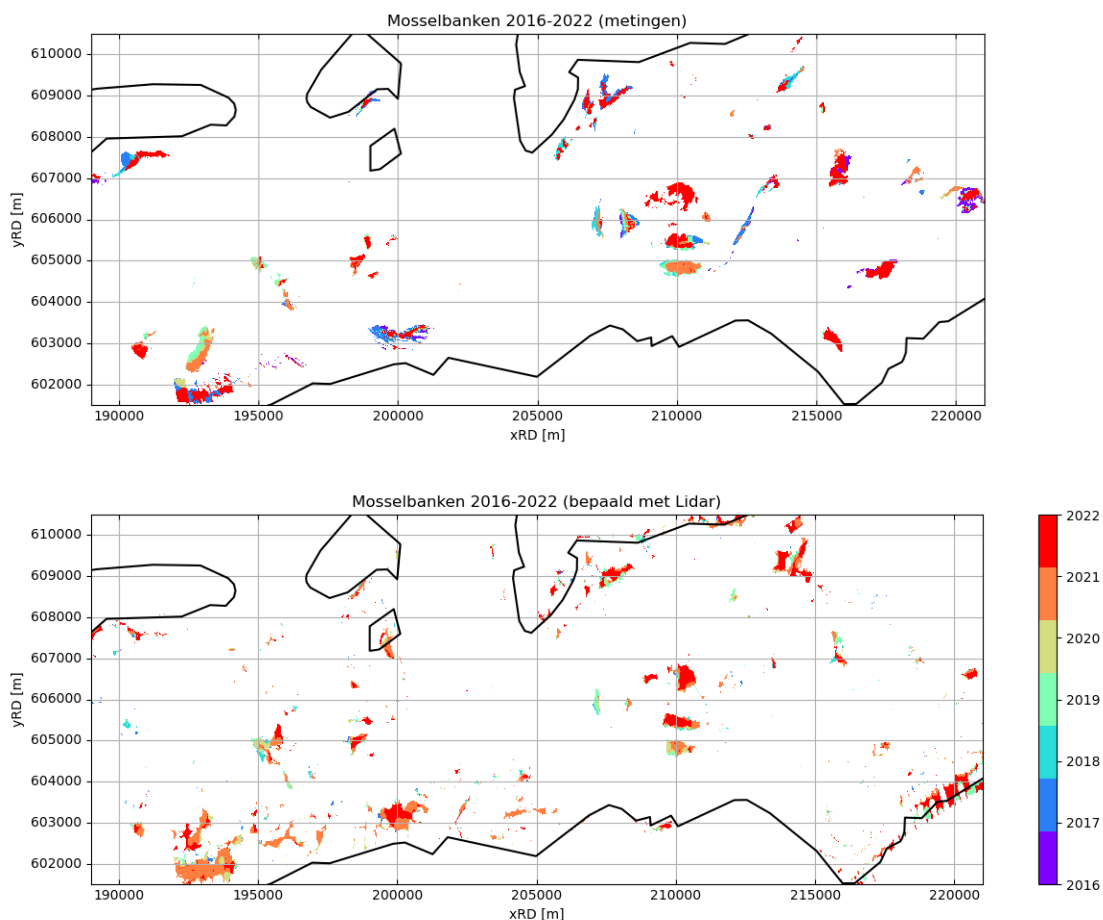
## 5 Invloed van mossel- en oesterbanken op plaatareaal

Tijdens de 'Zeegse' bijeenkomst 2022 in Leeuwarden is opgemerkt om de mogelijke invloed van mossel- en oesterbanken op veranderingen in plaatareaal te onderzoeken. In dit hoofdstuk is gekeken naar deze mogelijke invloed.

Deze analyse sluit tevens aan op het advies van de Auditcommissie met betrekking tot de mogelijkheden om morfologische effecten in meer detail te onderzoeken. Dit gebeurt hier op basis van de originele LiDAR data.

### 5.1 Detectie van mossel- en oesterbanken

Voor de bepaling van de invloed van mossel- en oesterbanken op de morfologie moet de locatie van deze banken bekend zijn. Hiertoe is o.a. gebruik gemaakt van jaarlijkse kaarten van mossel- en oesterbank van Wageningen Marine Research (WUR) (Troost et al., 2022). Mogelijk kan de ligging van mossel- en oesterbanken echter ook direct uit de LiDAR gegevens worden bepaald. Vanaf het najaar 2016 lijken de LiDAR data hiervoor geschikt. In deze recentere data lijken mossel- en oesterbanken zich lokaal van de omgeving te onderscheiden door een geringere reflectie van het LiDAR signaal. De reden voor deze geringere reflectie is mogelijk algengroei op de mossels en oesters.



*Figuur 5-1 Detectie van mossel- en oesterbanken. Jaarlijkse gegevens tussen 2016-2022 zijn weergegeven in kleur volgens kleurbalk. Ingemeten banken door de WUR (boven) en gedetecteerde banken vanuit LiDAR. (onder).*

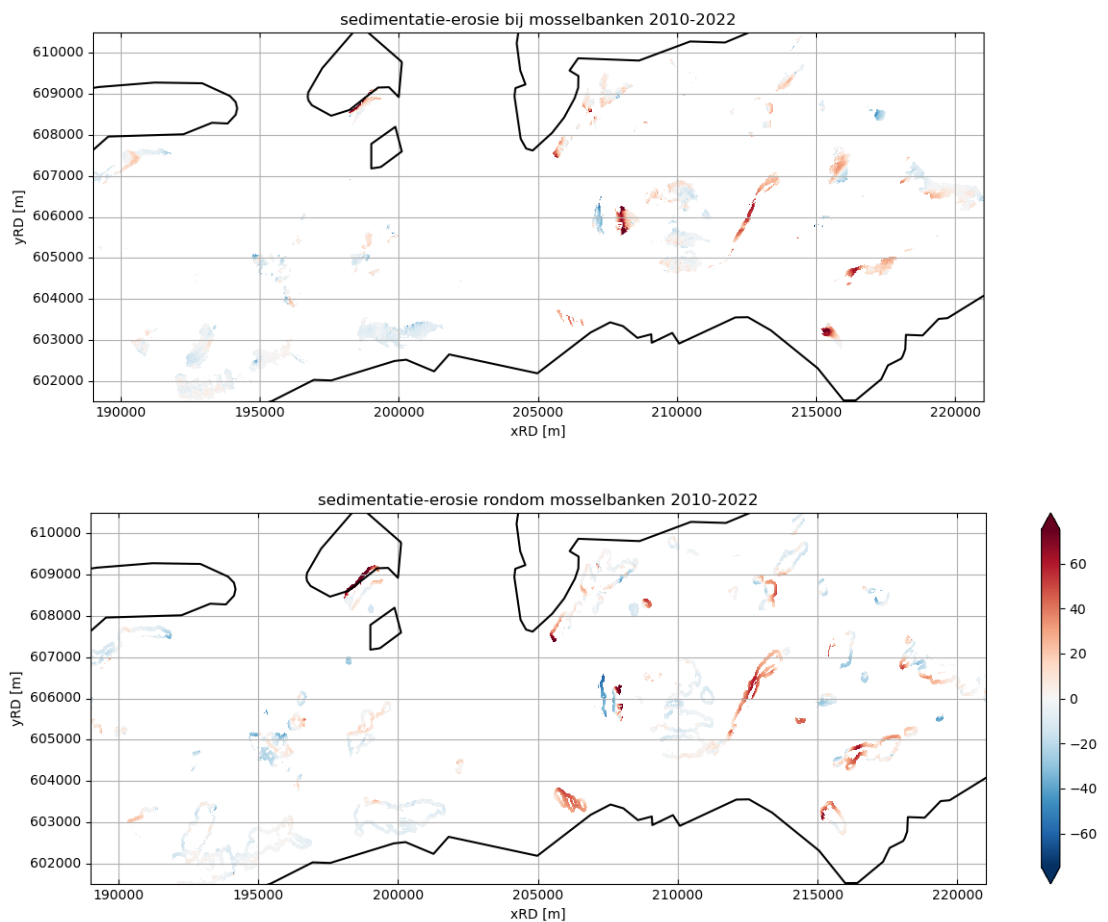
Een vergelijking van de banken ingemeten door de WUR (Figuur 5-1, boven) met de geschatte banken uit LiDAR (Figuur 5-1, onder) tonen goede overeenkomst. Vorm en grootte van mossel- en oesterbanken komen veelal overeen, echter zijn er ook locaties met foutpositieven en foutnegatieven. Foutpositieven zijn bijvoorbeeld de kwelders in het zuidoosten. Er zijn in het hele kombergingsgebied ook veelal kleinere mossel- en oesterbanken gedetecteerd, waarvan niet duidelijk is of het foutpositieven zijn of dat deze banken in de WUR gegevens niet in kaart zijn gebracht. Ook is het mogelijk dat foutpositieven ontstaan door banken van de schelpkokerworm, die in gedaante erg kunnen lijken op oesterbanken. Foutnegatieven zijn ook aanwezig, zoals de bank net ten westen van de zuidoostelijke kwelders. Het verschil in reflectie met de omgeving is hier mogelijk kleiner door bijvoorbeeld verminderde algengroei, maar er zouden ook andere factoren een rol kunnen spelen.

De detectie van de mossel- en oesterbanken met de LiDAR data is veelbelovend, maar niet foutloos. Daarnaast is het pas met LiDAR data vanaf het najaar 2016 mogelijk om LiDAR reflectie als proxy te gebruiken voor mossel- en oesterbanklocaties. In de vervolganalyses is daarom uitsluitend gewerkt met de WUR gegevens van 2010-2022.

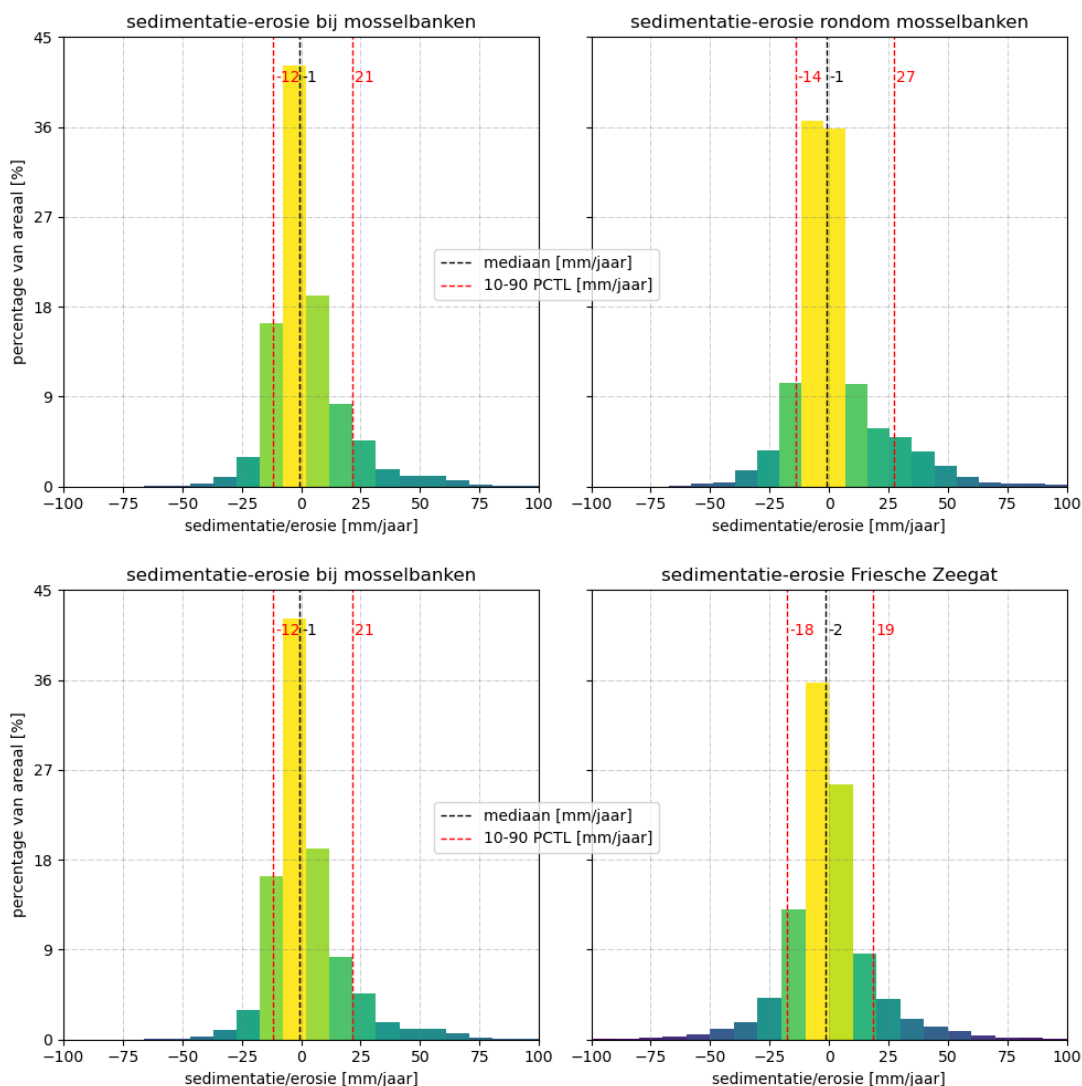
## 5.2 Sedimentatie-erosie

Om te onderzoeken of mossel- en oesterbanken invloed hebben op de aangroei of erosie van wadplaten kan worden gekeken naar sedimentatie-erosie patronen. Als er een verband bestaat tussen banklocatie en sedimentatie-erosie kan dat duiden op een structurele invloed van de mossel- en oesterbanken op wadplaatveranderingen.

Een dergelijk verband is echter niet gevonden. Sedimentatie-erosie patronen op plekken waar mossel en oesterbanken liggen (Figuur 5-2 boven) zijn vergelijkbaar met sedimentatie-erosie om de banken heen (Figuur 5-2 onder). De hoogteligging is veelal stabiel (mediaan = -1 mm/jaar) zowel voor de mossel- en oesterbanken (Figuur 5-3 boven links) als voor de omliggende gebieden (Figuur 5-3 boven rechts). Gebieden kunnen ook aangroeien of eroderen, waarbij sedimentatie rond een mossel- of oesterbank iets vaker lijkt voor te komen dan op de bank (cf., 90% percentielen, Figuur 5-3 boven). De verschillen zijn echter klein en kunnen niet direct worden gerelateerd aan een morfologische terugkoppeling tussen banken en aanliggende gebieden. De sedimentatie-erosie patronen ter plekke van de mossel- en oesterbanken (Figuur 5-2 boven; Figuur 5-3 onder links) weerspiegelen het algemene beeld van het kombergingsgebied (Figuur 4-6; Figuur 5-3 onder rechts). Het geeft een indicatie dat het bankgedrag de grootschalige veranderingen in morfologie volgt en wordt ondersteund door het feit dat mossel- en oesterbanken door de jaren heen wisselend slechts 3.3-4.6% van het totale wadplaatareaal in het kombergingsgebied beslaan.



*Figuur 5-2 De gemiddelde verandering in bodemhoogte uit Figuur 4-6 ter plekke van alle ingemeten oesterbanken in de periode 2010-2022 (boven) en in een omliggende strook van 200 m (onder). Blauwe kleuren geven verlaging weer, rode kleuren sedimentatie.*



Figuur 5-3 Histogrammen van bodemhoogteveranderingen in de periode 2010-2022. Veranderingen ter plekke van de mossel- en oesterbanken (links) worden vergeleken met veranderingen in een omliggende strook van 200 m (boven, rechts) en met het gehele kombergingsgebied (onder, rechts).

### 5.3 Correlatie van mossel- en oesterbankarealen met wadplatarealen

Naast de verhoudingen in sedimentatie-erosie zijn ook de correlaties in arealen tussen individuele wadplaten en de daarop gelegen mossel-/oesterbanken onderzocht. Hiervoor is uitsluitend gekeken naar significante correlaties, waarbij de kans op toeval <5%.

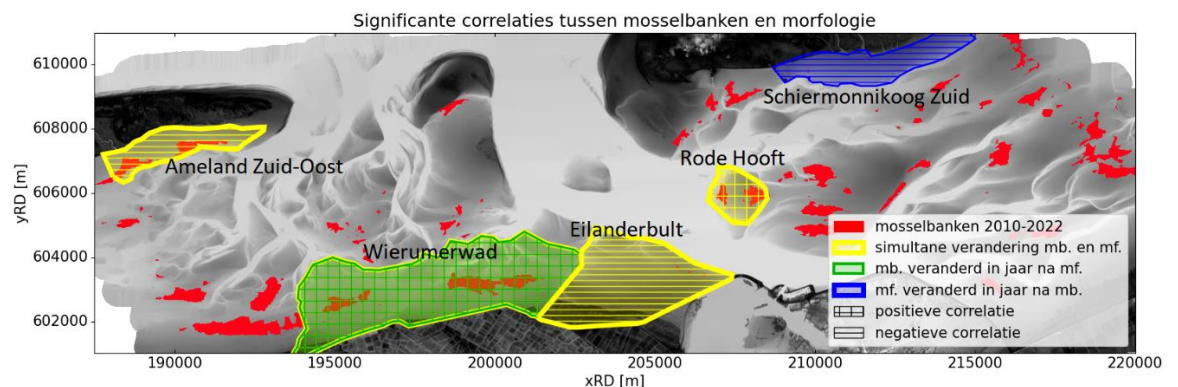
De correlaties zijn geclassificeerd in drie typen:

- Type1: Mossel-/oesterbanken op de wadplaat veranderen in het zelfde jaar als de wadplaat (Figuur 5-4, geel)
- Type2: Mossel-/ oesterbanken op de wadplaat veranderen in het jaar nadat de wadplaat is veranderd (Figuur 5-4, groen)
- Type3: De wadplaat veranderd in het jaar nadat de mossel-/oesterbanken zijn veranderd (Figuur 5-4, blauw)

In het geval dat veranderingen parallel lopen, in het zelfde jaar (correlatie Type1), bestaat geen duidelijkheid of plaatveranderingen tot mossel-/oesterbank veranderingen leiden of

andersom. In het geval dat mossel-/oesterbanken structureel veranderen in het jaar nadat een wadplaat is veranderd (correlatie Type2) kan dat een indicatie zijn dat plaatveranderingen tot vertraagde mossel-/oesterbankveranderingen leiden. Dit kan ook andersom (correlatie Type3), waarbij wadplaten vertraagd reageren op mossel-/oesterbankveranderingen.

Op vier platen is correlatie Type1 gevonden. Op Ameland Zuid-Oost bestaat een negatieve correlatie tussen het wadplaatareaal en het mossel-/oesterbankareaal. De mossel-/oesterbanken zijn hier vooral toegenomen terwijl het wadplaatareaal is afgenomen (zie Figuur 4-3 A). Bij de Eilanderbult is dit andersom: terwijl het plaatareaal licht is toegenomen zijn de mossel-oesterbanken iets afgenomen al zijn deze sowieso schaars aanwezig op de wadplaat. Bij het Rode Hoofd is de correlatie positief. Het Rode Hoofd migreert oostwaarts, waarbij de westkant erodeert en de oostkant sedimenteert. De mossel-/oesterbanken volgen deze bewegingen. Ook ter plekke van het Wierumerwad is een positief correlatie-Type1 gevonden, met aanvullend ook een positief correlatie Type2. Het plaatareaal van het Wierumerwad is de afgelopen jaren licht afgenomen samen met de mossel- en oesterbanken. Deze veranderingen lopen parallel (correlatie Type1), maar ook vertraagd (correlatie Type2), wat weer een indicatie is dat mossel- en oesterbankveranderingen volgen/reageren op veranderingen in plaatareaal. Ten zuiden van Schiermonnikoog is ook een gebied gevonden waar hoger gelegen plaatareaal (boven 1m NAP) lijkt te correleren met voorgaande veranderingen in mossel-/oesterbankareaal. Gezien de grootte van de aanwezige mossel-/oesterbanken minimaal is ten opzichte van het plaatareaal is dit geen causaal verband, en kan niet worden gesteld dat het plaatareaal reageert op de veranderingen van mossel-/oesterbanken. Waarschijnlijk spelen hier andere (bijv. ecologische) factoren een rol.



Figuur 5-4 Significante correlaties van mossel- en oesterbankarealen met plaatarealen van deelgebieden (zie Figuur 3-3). De ligging van mossel- en oesterbanken in de periode 2010-2022 is aangegeven in rood. Veranderingen in mossel- en oesterbankarealen correleren met veranderingen in plaatareaal: in zelfde jaar (geel), in voorgaand jaar (groen), in volgend jaar (blauw). Deelgebieden zijn gearceerd voor positieve correlatie (+) en negatieve correlatie (-). In sommige gebieden is het aandeel mossel-/oesterbanken zeer klein

## 5.4 Conclusie invloed van mossel- en oesterbanken op plaatareaal

De analyses suggereren dat mossel-/oesterbankarealen reageren op veranderingen in wadplaatareaal maar niet andersom. Mossel- en oesterbanken hebben geen significant effect op de relatieve hoogteligging. Er zijn geen buitengewone sedimentatie-/erosie patronen gevonden en veranderingen in wadplaatareaal en mossel-/oesterbankareaal treden meestal gelijktijdig op. Er is geen aanwijzing dat mossel-/oesterbanken het plaatareaal beïnvloeden.

## 6 Invloed hydrodynamische en meteorologische condities

Uit Van der Lugt et al. (2020a) is gebleken dat correcties op de LiDAR data van grote invloed zijn op de conclusies uit de analyse van verklarende factoren. In Van der Vegt en Van der Lugt (2021,2022) werd de correctiemethode verder verbeterd, waardoor de verbanden tussen verklarende factoren en areaalverandering zijn aangepast. Voor de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR metingen zijn toen geen verbanden gevonden, maar wel voor kortere periodes. Er is toen geconcludeerd dat stormachtige condities in de drie maanden voorafgaand aan een LiDAR opname leiden tot een afname in plaatareaal in het Pinkegat, maar deze relatie werd tegen verwachting in niet gevonden voor de Zoutkamperlaag.

In dit rapport is de analysemethode verder verbeterd. Nu komen volgens verwachting duidelijke verbanden naar voren voor de stormachtigheid tussen opeenvolgende LiDAR metingen en de (gelijktijdige) veranderingen in plaatareaal. Dit geldt voor zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag. De verbetering in de analysemethode ligt in de bepaling van windrichtingen. Eerder zijn westelijke en oostelijke windrichtingen bepaald op basis van halve cirkels (oostelijk =  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$  en westelijk =  $180^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ), wat tot gevolg heeft dat ook noord-zuidcomponenten worden meegeteld. In dit rapport zijn windkracht en windrichting als vector behandeld met een horizontale (oost-west) en een verticale (noord-zuid) component.

Voor de analyse van het verband tussen heersende condities en gemeten plaatareaal zijn correlatiecoëfficiënten berekend voor het plaatareaal boven twee referentiehoogten: NAP+0m en NAP-0.5m. De gecorrigeerde LiDAR data zijn voor deze analyse gebruikt.

Onderzoeksvragen voor de analyse zijn:

- Zijn er correlaties tussen heersende condities tijdens LiDAR inwinning en het berekende plaatareaal?
- Zijn er correlaties tussen de condities tussen twee opeenvolgende opnamen en de berekende veranderingen in plaatareaal tussen de twee opnamen?

Voor het kwantificeren van de correlatie tussen areaalverandering en meteorologische condities gebruiken we de Pearson correlatiecoëfficiënt. De waarde van deze coëfficiënt varieert tussen -1 en +1, waarbij -1 een sterk negatieve correlatie en +1 een sterk positieve correlatie aanduidt, een waarde rond nul betekent vrijwel geen correlatie. Verder moet bij interpretatie van berekende correlaties de lengte van de meetreeks in acht worden genomen.

De datareeks bestaat nu uit 18 punten. Dat is vrij kort voor een statistische beschouwing. Daardoor is de kans groot dat berekende correlatiecoëfficiënten het resultaat zijn van toevallig samenvallen van condities en waarnemingen. Bij 18 datapunten ligt de significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt op 0,47. Dat betekent dat voor deze dataset er minder dan 5% kans bestaat dat het geconstateerde verband willekeurig is wanneer de correlatiecoëfficiënt boven 0,47 (of onder -0,47) uitkomt. Om ook zwakke verbanden te kunnen onderscheiden, (die zich in een lange tijdreeks uitten door een Pearson correlatiecoëfficiënt van  $< 0,5$ ), moeten er nog veel datapunten bijkomen; een significantiegrens van 0,2 wordt bijvoorbeeld pas bereikt met 90 datapunten. In de huidige analyse zijn ook correlaties met golfcondities opgenomen, die tot nu toe slechts 4 LiDAR metingen overspannen. De significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt ligt in dat geval zeer hoog, namelijk op 0,95.



## 6.1 Invloed condities tijdens inwinning

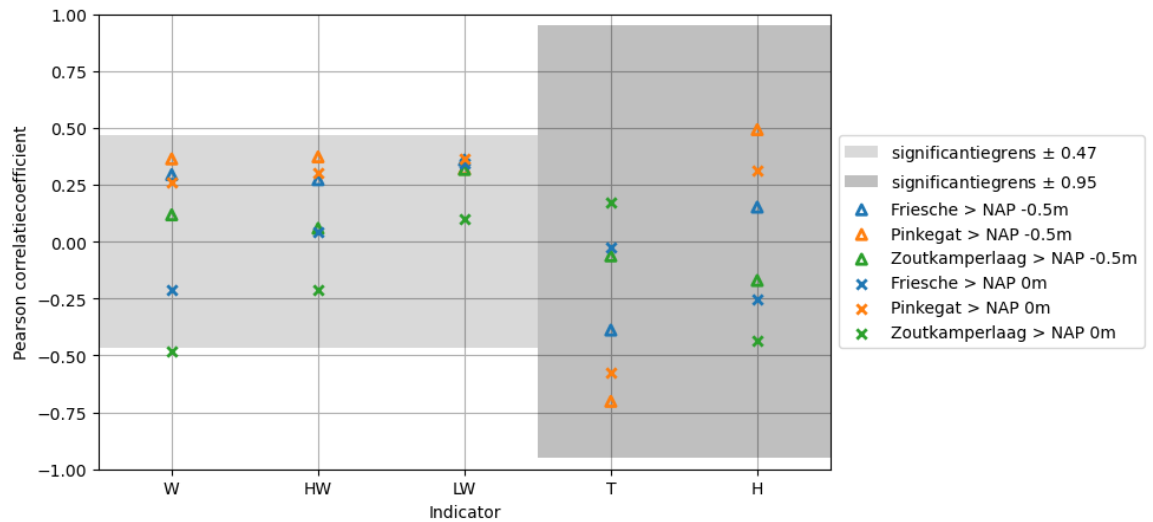
Voor vijf fysische indicatoren is onderzocht of er een correlatie bestaat tussen hun waarde tijdens de inwinning en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. Indicator W voor windsnelheid is berekend uit tijdreeksen van potentiële wind (gemeten windsnelheid omgerekend naar de windsnelheid bij een standaard landschapsruwheid en een standaard hoogte van 10 meter) van het KNMI voor het station Lauwersoog. De waterstandsindicatoren zijn berekend uit de historische waterstandsgegevens van Rijkswaterstaat, eveneens voor station Lauwersoog. Golfgegevens, zoals de golfhoogte H en golfperiode T zijn sinds 2019 beschikbaar voor de locatie Nes. In deze rapportage is niet meer de duur van het dalend tij meegenomen (Van der Lugt et al., 2020a), gezien er nooit enige correlatie is gevonden met het plaatareaal. De berekende tijdsreeksen voor de indicatoren zijn geplot in Figuur 6-1. (Van der Lugt et al., 2020a)

Tabel 6.1 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van het gemeten areaal.

Parameter	Definitie
W	Gemiddelde windsnelheid tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [m/s]
LW	Gemiddeld laagwater tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [NAP+m]
HW	Gemiddeld hoogwater tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [NAP+m]
H	Gemiddelde golfhoogte tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [m]
T	Gemiddelde golfperiode tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [s]



Figuur 6-1 Tijdreeksen van de hydrologische en meteorologische indicatoren tijdens de metingen.



Figuur 6-2 Pearson correlatiecoëfficiënten voor het verband tussen gemeten arealen en hydrologische en meteorologische indicatoren tijdens het inwinnen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,46.

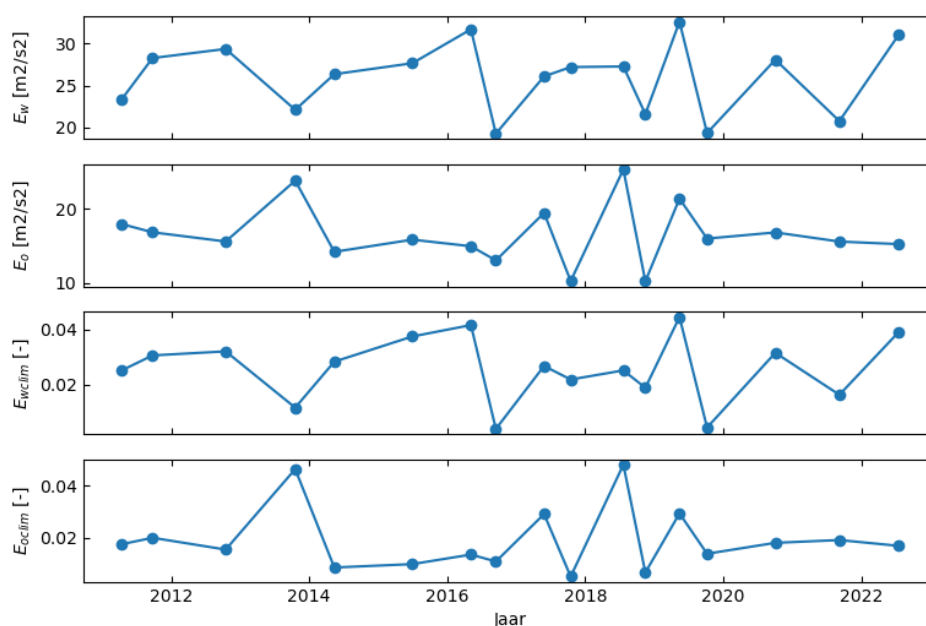
In Figuur 6-2 zijn de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten weergegeven tussen de verschillende indicatoren en zowel het areaal boven NAP-0,5m en het areaal boven NAP+0m. Hierin is te zien dat enkel de windsnelheid nog een significante (negatieve) correlatie laten zien van -0,48. Een sterkere windsnelheid vlak voor en tijdens de meetcampagne kan dus leiden tot een kleiner gemeten plaatareaal boven NAP+0m in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. In deze correlatie zien we geen causaal verband, maar de correlatie ligt ook op de grens van significantie. Voor vervolgrapportages zijn golfcondities alvast opgenomen in de analyse, maar de tijdreeks is nog te kortdurend om significante correlaties vast te stellen.

## 6.2 Invloed stormachtigheid tussen opnamen

Voor vier windsnelheidsindicatoren (zie Tabel 6.2 voor de gehanteerde definities) werd onderzocht of er een correlatie bestaat van hun waarden tussen de opnamen en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. De indicatoren  $E_w$ ,  $E_o$ ,  $E_{wclim}$  en  $E_{oclim}$  voor windsnelheid zijn berekend uit de potentiële windtijdreeksen van het KNMI voor het station Lauwersoog. Tijdreeksen voor deze indicatoren laten zien dat er variatie zit in de gemiddelde windenergie en stormachtigheid tussen opeenvolgende LiDAR metingen (Figuur 6-3). Deze variatie kan mogelijk ook aanleiding geven tot periodieke verschillen in plaatareaal. In dit rapport zijn geen correlaties meer opgenomen voor tijdsvensters die korter zijn dan de periode tussen twee LiDAR metingen (cf. Van der Vegt en Van der Lugt, 2022). Voor deze tijdschalen moeten aannames worden gemaakt voor plaatverandering op hogere tijdschaal dan gemeten en dat is niet nodig gezien correlaties op de gemeten schaal al duidelijk aanwezig zijn.

Tabel 6.2 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van areaalveranderingen op basis van stormachtigheid tussen twee metingen.

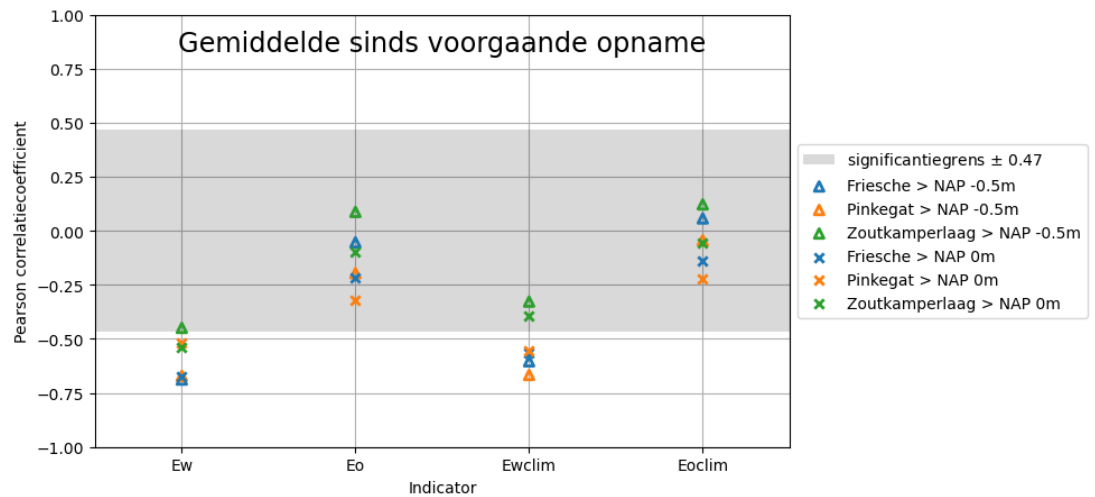
Parameter	Definitie
$E_w$	Gemiddelde van het kwadraat van de west→oost component van de windsnelheid in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [ $m^2/s^2$ ]
$E_o$	Gemiddelde van het kwadraat van de oost→west component van de windsnelheid in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [ $m^2/s^2$ ]
$E_{wclim}$	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overgeschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op windklimaat 2010-2022 [-] voor west→oost component
$E_{oclim}$	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overgeschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op windklimaat 2010-2022 [-] voor oost→west component



Figuur 6-3 Tijdreeksen van windindicatoren tussen twee opeenvolgende metingen.

Voor het gehele kombergingsgebied bestaat er een significante correlatie tussen westelijke wind in de afgelopen periode en de nieuwe LiDAR meting (Figuur 6-4). De correlaties zijn negatief, wat betekent dat het plaatareaal krimpt als de windkracht uit westelijke richting bovengemiddeld sterk is (Figuur 6-4,  $E_w$ ) of er bovengemiddeld veel krachtige stormen voor zijn gekomen (Figuur 6-4,  $E_{wclim}$ ). De negatieve correlaties zijn gevonden voor het gehele kombergingsgebied wat ook wordt verwacht: westelijke wind drijft de waterstand op waardoor golven een groter (verdrongen) plaatareaal kunnen bereiken en eroderen. Daar komt bij, dat de golven bij harde wind ook vaak groter zijn en dus nog effectiever sediment kunnen afslaan. Correlaties voor het Pinkegat zijn sterker negatief dan voor de Zoutkamperlaag. Dat komt omdat de platen in het Pinkegat gemiddeld genomen lager liggen dan in de Zoutkamperlaag (Figuur 4-1, Figuur 4-2). Een verhoogde waterstand en grotere golven leiden hier daarom tot relatief sterkere golfbreking en meer afslag van wadplaten.

Wind uit oostelijke richting wordt juist in verband gebracht met een verlaagde waterstand waardoor er ook geen significante afname van plaatareaal wordt verwacht (Figuur 6-4,  $E_o$  en  $E_{oclim}$ )



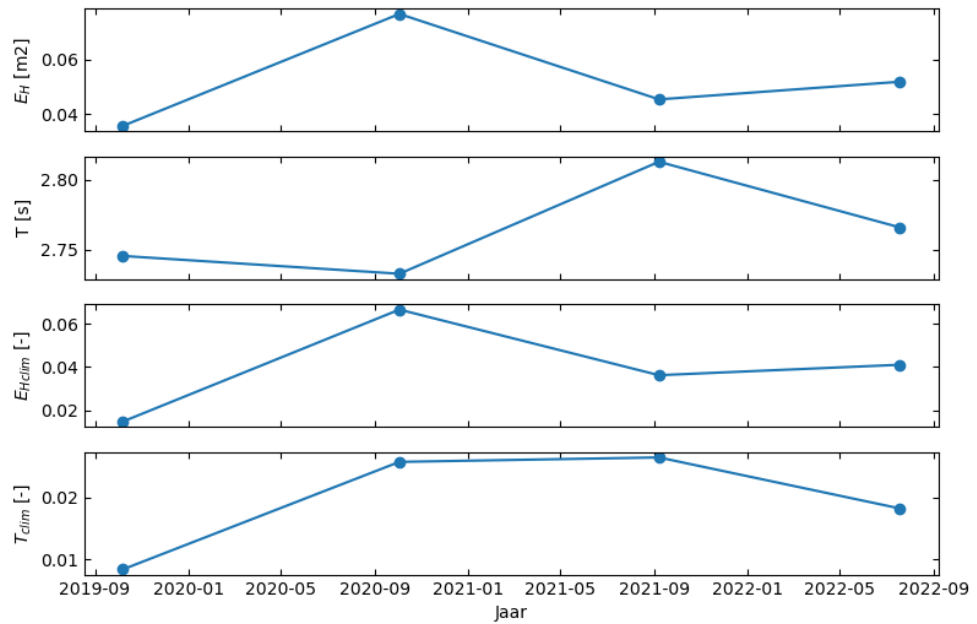
Figuur 6-4 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal boven referentiehoogten NAP-0,5m, NAP+0m en windcondities tussen opnamen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,47.

### 6.3 Invloed golfklimaat tussen opnamen

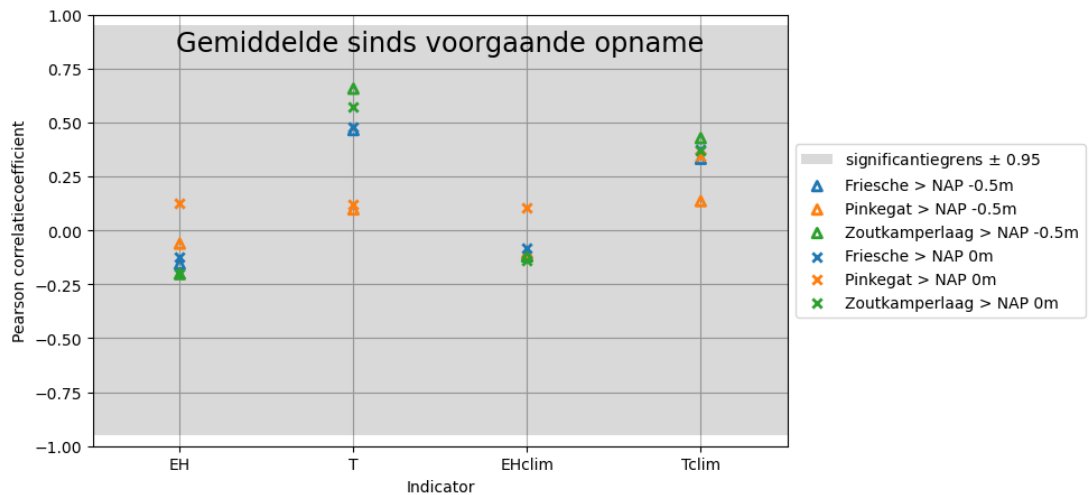
Naast de windindicatoren is ook voor vier golfindicatoren (zie Tabel 6.3 voor de gehanteerde definities) onderzocht of er een correlatie bestaat van hun waarden tussen de opnamen en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. De indicatoren  $E_H$ ,  $T$ ,  $E_{Hclim}$  en  $T_{clim}$  zijn bepaald uit golfmetingen bij het station Nes. Het meetstation bij Nes zit vrij beschermd onder Ameland waardoor de tijdreeksen voor deze indicatoren vooral lokaal opgewekte windgolven van beperkte grootte laten zien. Uit het kwadraat van de golfhoogte  $E_H$  blijkt dat deze kan variëren voor opeenvolgende LiDAR metingen (Figuur 6-5). Deze variatie kan mogelijk ook aanleiding geven tot periodieke verschillen in plaatareaal. Echter is de tijdreeks nog te kort om significante correlaties te kunnen opsporen (Figuur 6-6). Voor 4 datapunten ligt de significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt op een zeer hoge waarde van 0,95. Net als voor de windindicatoren zal deze waarde echter dalen met elke nieuwe LiDAR campagne en kan worden onderzocht of en hoe het golfklimaat met het wadplaatareaal correleert.

Tabel 6.3 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van areaalveranderingen op basis van golfintensiteit tussen twee metingen.

Parameter	Definitie
$E_H$	Gemiddelde van het kwadraat van de golfhoogte in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [ $m^2$ ]
$T$	Gemiddelde golfperiode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [s]
$E_{Hclim}$	ratio van de tijd dat de referentie golfhoogte voor 95% kwantiel is overgeschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op het golfklimaat 2019-2022 [-]
$T_{clim}$	ratio van de tijd dat de referentie golfperiode voor 95% kwantiel is overgeschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op golfklimaat 2019-2022 [-]



Figuur 6-5 Tijdreeksen van golfindicatoren tussen twee opeenvolgende metingen.



Figuur 6-6 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal boven referentiehoogten NAP-0,5m, NAP+0m en golfcondities tussen opnamen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,95.

## 6.4 Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities

Er zijn geen causale relaties gevonden tussen het plaatareaal en de condities tijdens de inwinning. Dit is gewenst, omdat de LiDAR hoogte metingen dan onbeïnvloed zijn. Voor de periode tussen opeenvolgende LiDAR metingen is wel een duidelijke correlatie gevonden en deze is ook als verwacht: Stormachtige condities uit westelijke windrichting leiden tot een afname in plaatareaal in het hele kombergingsgebied. Westelijke wind drijft de waterstand op waardoor golven een groter plaatareaal kunnen bereiken en eroderen. De wadplaten van het Pinkegat liggen iets lager, waardoor dit effect relatief sterker is dan bij de Zoutkamperlaag. Golfcondities spelen waarschijnlijk een belangrijke rol in de erosie van wadplaten, echter zijn golfmetingen nog te kortdurend om significante correlaties vast te stellen

## 7 Conclusies en aanbevelingen

De overkoepelende vraag achter de monitoring is: “Is het areaal droogvallend wad in het Friesche Zeegat (kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag) sinds de start van de LiDAR metingen veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning?”. Hier beantwoorden we de in Hoofdstuk 1 geformuleerde onderzoeksvragen en geven aanbevelingen naar aanleiding van het onderzoek naar verbeteringen in de methodiek.

### 7.1 Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?

De 2022 opname past wederom goed in de meetreeks. Het gerapporteerde plaatareaal van de Zoutkamperlaag is constanter gebleven door de tijd heen dan het plaatareaal van het Pinkegat. Voor het Pinkegat suggereert de meetreeks een geringe afname van het plaatareaal over de tijd, maar deze afname is klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge.

De deelgebiedsanalyse toont aan dat verandering in plaatareaal in actieve (deel)gebieden goed kan worden gemonitord met LiDAR. Individuele plaatcomplexen groeien aan of kalven af, bijvoorbeeld door uitbochting van de hoofdgeulen. De hypsometrische curven ondersteunen de conclusies die kunnen worden getrokken uit de analyse van areaalontwikkeling van platen hoger dan NAP-0.5m.

Voor het plaatareaal in de Zoutkamperlaag op geaggregeerde schaal concluderen we dat deze constant blijft, en ook dat de ontwikkeling van deelgebieden hier niet sterk varieert.

Het totale plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat lijkt licht af te nemen, maar deze afname valt binnen de meetonzekerheid. Om de oorzaak van deze veranderingen inzichtelijker te maken zijn deelgebieden geanalyseerd. Het gedrag in de deelgebieden en platen varieert, plaathoogtes nemen zowel toe als af. Op de schaal van het kombergingsgebied vallen deze ontwikkelingen min of meer tegen elkaar weg en de waargenomen veranderingen blijken niet aan de bodemdaling gerelateerd te zijn.

### 7.2 Beïnvloeden mossel- en oesterbanken veranderingen in plaatareaal?

De analyses suggereren dat mossel- en oesterbankarealen reageren op veranderingen in wadplaatareaal maar niet andersom. De mossel- en oesterbanken zijn veel kleiner dan de omliggende wadplaten en kunnen daardoor geen grootschalige plaatveranderingen veroorzaken. Er zijn geen buitengewone sedimentatie-/erosie patronen gevonden en veranderingen in wadplaatareaal en mossel-/oesterbankareaal treden meestal gelijktijdig op. Hierbij spelen waarschijnlijk meerdere factoren en rol, zoals korte termijn erosie van platen en mosselbanken door stormen maar ook langere termijn plaat- en geulveranderingen die de schelpdierbanken dwingen om zich aan te passen. Er is geen aanwijzing dat mossel-/oesterbanken het plaatareaal beïnvloeden.

### 7.3 In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?

De afname van de plaathoogte zou van noord naar zuid minder moeten worden als dit een direct gevolg zou zijn van diepe bodemdaling. In het gebied waar de diepe bodemdaling het sterkst is, namelijk op de platen ten zuiden van Ameland-oost op basis van het geodetische bodemdalingsmodel, werd wel een gemiddelde afname van de plaathoogte geconstateerd,

maar de grootste daling van plaatoppervlak wordt niet hier waargenomen. Het gebied waar de sterkste bodemdaling verwacht wordt komt dus niet overeen met het gebied waar de sterkste daling in plaathoogte voorkomt. Ook theoretische veranderingen vanuit het geodetische bodemdalingmodel zijn veel kleiner dan de gemeten veranderingen (Van der Vegt en Van der Lugt, 2022).

Het is belangrijk om bij de interpretatie van hoogteveranderingen niet alleen rekening te houden met bodemdaling maar ook met het dynamische geulgedrag in het Friesche Zeegat. Een migrerende geul erodeert de aangrenzende wadplaat, terwijl aan de tegenoverliggende zijde zand afgezet wordt. Deze nieuw gevormde plaat is lager dan de geërodeerde plaat. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen leidt dus tot veranderingen in plaathoogte die veel groter zijn dan de effecten van bodemdaling. De morfologische dynamiek, en daardoor plaatareaal en -hoogte, wordt in belangrijke mate gestuurd door een combinatie van hydrodynamische condities, zoals bijvoorbeeld getij, en meteorologische condities.

Voor individuele platen in het Pinkegat kan wel een afname van met name het lagere plaatareaal vastgesteld worden. We verwachten dat deze veranderingen eerder een gevolg zijn van geul-plaat dynamiek dan dat ze op een sterke band met de diepe bodemdaling duiden. Een eenduidig bodemdalingssignaal komt niet naar voren uit de LiDAR dataset.

#### 7.4 In welke mate is de dynamiek van het plaatgedrag in het Friesche Zeegat te correleren aan andere factoren die niet met bodemdaling samenhangen?

Stormachtige condities uit westelijke windrichting leiden tot een afname in plaatareaal in het hele kombergingsgebied. Westelijke wind drijft de waterstand op waardoor golven een groter plaatareaal kunnen bereiken en eroderen. De wadplaten van het Pinkegat liggen iets lager, waardoor dit effect relatief sterker is dan bij de Zoutkamperlaag.

#### 7.5 Aanbevelingen

Er is de laatste jaren veel gedaan om de kwaliteit van de LiDAR monitoring en analyse van deze gegevens te optimaliseren. De standaarddeviatie van de hoogteverschillen tussen LiDAR resultaten en GCP grids ligt in de orde van 1-2 cm. Net als LiDAR resultaten van 2021 passen ook de LiDAR resultaten van 2022 goed bij de Ground Control Point grids.

De eerdere aanbeveling om 2019a als referentiejaar te kiezen voor de referentievlakcorrectie is in dit rapport aangehouden en wordt ook voor navolgende metingen verder aanbevolen.

Er zijn significante relaties gevonden tussen veranderingen in plaatareaal en sterke westelijke wind. Tijdens deze condities zijn de waterstanden en golven hoger waardoor wadplaten sterker eroderen. We bevelen aan deze relatie verder te onderzoeken met behulp van bestaande golfinformatie. In dit rapport is een eerste aanzet hiertoe gedaan, maar op dit ogenblik zijn de golfmeetreeksen, gemeten vanaf 2019, nog te kort om significante correlaties te identificeren. Met toekomstige LiDAR metingen zullen ook de golfmeetreeksen langer zijn geworden, waardoor het steeds duidelijker zal worden of en hoe golfcondities correleren met veranderingen in plaatareaal.

Een LiDAR grid resolutie van 10x10 m biedt voldoende detail niveau voor berekeningen op de schaal van wadplaten. Het wordt aanbevolen om dit detail niveau verder te handhaven.

Er wordt voortdurend onderzoek gedaan om het conceptuele model van de morfologische ontwikkelingen in de Friesche Zeegat te verfijnen. Het is dus van belang om bij iedere

rapportage de nieuwste ontwikkelingen in deze conceptuele model(len) mee te nemen in de interpretatie.



## Referenties

Commissie MER (2022). "Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2021." Projectnummer: 3655. Commissie voor MilieuEffectRapportage, Utrecht, Nederland.

Elias, E. (2019). "Een actuele zandbalans van de Waddenzee." Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002. Delft, Nederland.

Elias, E., Oost, A. (2020). "Morfologische processen van het Friesche Zeegat: Een conceptueel model." Deltares rapport 11205236-003. Delft, Nederland.

NAM B.V. (2007). "Meet- en regelprotocol Winning Waddenzeegas vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen". EP Document Nummer: EP200612202112.

NAM B.V. (2017). "MEMO Analyse van de a.d.h.v. LiDAR gemeten verandering in wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag" Versie 2; 30-3-2017.  
<https://commissiemer.nl/projectdocumenten/00002797.pdf>, opgehaald 12-04-2022.

NAM B.V. (2021). "Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2020". EP Document Nummer: EP202104200793

Oost, A., Cleveringa, J., Taal, M. (2020). "Kombingingsrapport Friesche Zeegat - Pinkegat en Zoutkamperlaag". Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0002. Delft, Nederland.

Terratec AS. (2022). "Project report Waddenzee – LiDAR acquisition for 2022". Oslo, Norway

Troost, K., van Asch, M., van den Ende, D., van Es, Y., Perdon, K. J., van der Pool, J., Suykerbuyk, W., van Zweeden, C., & van Zwol, J. (2022). Schelpdierbestanden in de Nederlandse kustzone, Waddenzee en zoute deltaxwateren in 2021. (CVO rapport; No. 22.011). Stichting Wageningen Research, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO)

Van der Lugt, M., Visser, M., van den Boogaard, H. (2019). "Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2018)". Deltares rapport 11203620-002-ZKS-0003. Delft, Nederland.

Van der Lugt, M., Visser, M., Ketelaar, G. (2020a). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019)". Deltares rapport 11203620-002-ZKS-0006. Delft, Nederland.

Van der Lugt, M., Cleveringa, J., Wang, Z.B., (2020b). "Integrale analyse morfologische effecten bodemdaling door gaswinning Ameland-Oost". Deltares rapport 11203910-002-ZKS-0006. Delft, Nederland.

Van der Vegt, H., van der Lugt, M. (2021). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021)". Deltares rapport 11206685-000-ZKS-0004. Delft, Nederland.

Van der Vegt, H., van der Lugt, M. (2022). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021)". Deltares rapport 11206685-000-ZKS-0004. Delft, Nederland.

# A Overzicht vluchtgegevens

Tabel A.1 Overzicht van meetdiensten, opnamedata en specificaties van de opnamen in de meetreeks.

LiDAR referentie	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
				Start	Eind			
2010 (voorjaar)	Fugro Fugro Geospatial B.V. (2010)	FLI-MAP 1000	25-03-2010 26-03-2010 28-03-2010	09:00 10:33 13:02	11:03 (*) 12:26 (*) 14:36 (*)	Noord Zuid Midden	Helder weer Bewolking en neerslag Wisselend bewolkt	Tijdsinformatie van bijgevoegde <i>FlightLineRelation.xlsx</i> Vlieghoogte 500 m AGL
2011 (voorjaar)	Fugro Fugro Geospatial B.V. (2011)	FLI-MAP 1000	14-04-2011 15-04-2011 16-04-2011	10:00 10:50 11:50	12:20 13:20 13:00	Noord Midden Zuid	Bewolkt Heldere hemel Nevel	Tijdsinformatie uit H6.5 (benaderd) Vlieghoogte 500 m AGL
2011 (najaar)	Fugro Fugro Geospatial B.V. (2011a)	FLI-MAP 1000	24-9-2011 25-9-2011 26-9-2011 27-9-2011	13:20 14:00 15:00 16:20	15:00 16:20 16:50 17:00	Noord Zuid Midden Midden (extra)	Heldere hemel Heldere hemel Bewolkt Bewolkt	Tijdsinformatie uit: <i>11871-002 tidal data.xls</i> Vlieghoogte 500 m AGL
2012 (najaar)	Fugro Fugro Geospatial B.V. (2012)	FLI-MAP 1000	15-10-2012 16-10-2012 26-10-2012	15:15 16:30 13:10	18:15 17:45 16:10	Noord, zuid (2) Midden (1), zuid (1) Zuid	Lichte bewolking Bewolkt, survey gestopt Bewolkt	Periode van 10 dagen tussen opnamen Vlieghoogte 500 m AGL
2013 (najaar)	Fugro Fugro Geospatial B.V. (2013)	Riegl Q680i	18-10-2013 19-10-2013 20-10-2013	14:50 15:40 17:00	18:20 18:30 18:10	Noord Midden Zuid	Heldere hemel Heldere hemel Heldere hemel	Vlieghoogte 440 m AGL
2014 (voorjaar)	Fugro Fugro Geospatial B.V. (2014a)	Riegl Q680i	13-05-2014 14-05-2014 15-05-2014	15:20 15:20 15:50	16:50 18:10 17:30	Noord Midden Zuid	Licht bewolkt Licht bewolkt Heldere hemel	Cross-lines gedeeltelijk gevlogen buiten getijvenster Vlieghoogte 440 m AGL

LiDAR referentie	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
				Start	Eind			
2014 (najaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2014b)</i>	Riegl Q680i	21-09-2014 22-09-2014 23-09-2014	14:16 15:39 15:38	16:04 17:17 17:37	6-19 20-28 29-38	Lage bewolking, regen Licht bewolkt Heldere hemel	Vlieglijnen 6-14 (Ternaard) gevlogen buiten getijdenster Vlieghoogte 440 m AGL
2015 (zomer)	Fugro (Eurosense) Fugro Geospatial B.V. (2015)	Riegl Q680i	30-06-2015 1-7-2015	14:08 15:10	17:45 18:24	6-20; 34-38 18; 21-33	Heldere hemel Heldere hemel	Vlieghoogte 460 m AGL
2015 (najaar)	Eurosense <i>Eurosense (2016a)</i>	Riegl Q680i	26-10-2015 8-11-2015 23-11-2015	14:03 12:22 15:03	16:55 (start*) 13:34 (start*) 16:38 (start*)	Noord, Zuid Midden; noord Midden; zuid <i>Figure 5</i>	Heldere hemel maar later mist. Gestopt door bewolking	Vlieglijnen 20 t/m 23 buiten getijdenster Tot 15 dagen tussen meetdagen Vlieghoogte 460 m AGL
2016 (voorjaar)	Eurosense <i>Eurosense (2016b)</i>	Riegl Q680i	5-5-2016 6-5-2016	12:45 (**) 14:30 (**)	18:45 (**) 20:12 (**)	6-12; 26-39 27-9 <i>Figure 2</i>	Heldere hemel Heldere hemel	Vlieghoogte 460 m AGL
2016 (najaar)	Aerodata <i>Aerodata (2016)</i>	Riegl LMS-780	14-9-2016 15-9-2016 16-9-2016	14:05 16:19 15:55	16:57 17:24 18:39	8-14;20-23;33 15-17;33 15-19;24-32	Lichte nevel Lichte nevel Lichte nevel	Vlieghoogte 460 m AGL
2017 (voorjaar)	Aerodata <i>Aerodata (2017)</i>	Riegl LMS-780	27-5-2017 28-5-2017	16:27 17:39	20:02 19:58	1-21;33 1; 22-32	Onbekend	Vlieghoogte 460 m AGL
2017 (najaar)	Aerodata <i>Aerodata (2017)</i>	Riegl LMS-780	15-10-2017 17-10-2017 18-10-2017	11:52 14:06 15:16	14:15 16:35 16:39	1-16 22-33 17-21	Onbekend	Vlieghoogte 460 m AGL
2018 (zomer)	Terratec AS	Riegl, VQ-1560i	21-07-2018 22-07-2018 23-07-2018 24-07-2018	07:40 08:50 10:00 12:00	10:50 12:10 13:30 15:30	1-10,31,29,30 11,15,18-22 14,16,23-28,33 12,13,17	Bevredigend	Vlieghoogte 500m AGL, Vluchtlijn 11 buiten getijdenster
2018 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	14-11-2018 17-11-2018	17:05 09:00	09:00 11:25	1-18 19-23	Bevredigend. 3 dagen interval door mist.	Vlieghoogte 1250m AGL, alle controle lijnen op andere dag gevlogen dan gebieds-lijnen

LiDAR referentie	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
				Start	Eind			
2019 (voorjaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	15-05-2019	10:30	13:08	1-23	Bevredigend	Vlieghoogte 1500 m AGL
2019 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	07-10-2019	07:38	10:01	1-23	Bevredigend	Vlieghoogte 1500 m AGL
2020 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	02-10-2020	16:24	18:42	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2021 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	06-09-2021	15:54	18:12	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2022 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	18-07-2022	06:05	08:38	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL

*\*Geregistreeerde eindtijd is de starttijd van de vlieglijn. Duur van een vlieglijn is gemiddeld ongeveer 20 minuten*

*\*\*Geregistreeerde tijd is de tijd van opstijgen en landen. Tijdsinterval waarin de data is ingewonnen is niet op te maken aan de hand van de rapportage.*

# B NAM rapportage datareeks correctie

Auteur: Gini Ketelaar (NAM)

## Samenvatting

In de 2023 LiDAR analyse van de surveys tot en met 2022 zijn de surveys wederom gecorrigeerd met een lineair correctievlak ten opzichte van een referentie survey (de acquisitie in het voorjaar van 2019). De correctie parameters zijn integraal geschat op basis van harde topografie, de sediment grids, en de Ground Control Point grids.

In voorgaande analyses is gebleken dat door deze correctie de trends in wadplaathogtes beter te interpreteren zijn. De correcties liggen voor het grootste gedeelte echter binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Met name in de jaren na 2019 zijn de correcties klein.

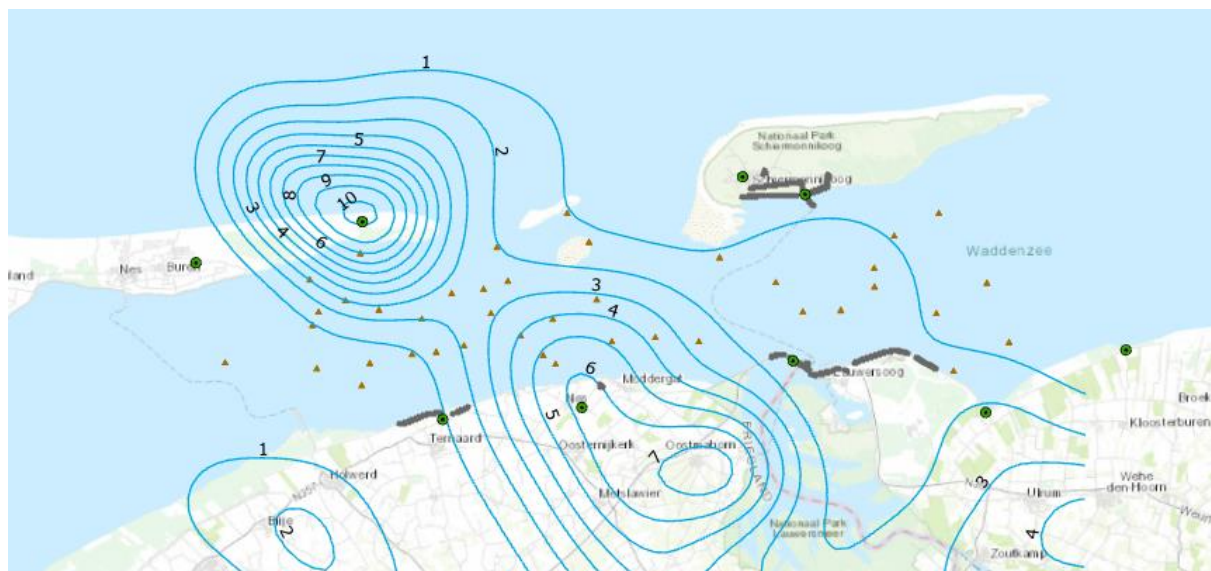
## B.1 Introductie

Sinds de 2020 LiDAR analyse (Van der Lugt et al., 2020) worden correctie parameters toegepast om residuele systematische effecten in de LiDAR hoogtes te minimaliseren. De interpretatie van de LiDAR data wordt hierdoor eenduidiger en trends in het wadplaatareaal zijn beter te interpreteren. De correctie parameters worden berekend op basis van de LiDAR hoogtes van harde oppervlaktes (zoals wegen), de hoogtemetingen die op wadplaten nabij peilmerkclusters worden uitgevoerd (sediment grids), en de Ground Control Point grids (GCP grids) waarop de LiDAR meetdienst inpast door middel van één verticale offset.

Deze appendix behandelt achtereenvolgens de meetpunten voor de berekening van de correctie parameters, de berekende correctie parameters voor de 2023 LiDAR analyse, en de evaluatie van de toepassing van de correctie parameters op de Ground Control Point en sediment grids hoogtes van 2022.

## B.2 Meetpunten voor de berekening van correctie parameters

Deze paragraaf geeft een overzicht van de meetpunten die gebruikt zijn in de berekening van de correctie parameters.



*Figuur B-1: In donker grijs de selectie harde topografie punten (inclusief extra ground control point clusters zoals bepaald in 2022). In groen de locaties van de Ground Control Point grids. In bruin de locaties van de sediment grids. De contouren geven de bodemdaling 2006-2022 weer volgens (NAM, 2022).*

### B.2.1 Ground Control Point (GCP) grids

In 2020 zijn GCP-1 en GCP-8 ingemeten door middel van waterpassingen. In 2021 zijn de overige grids (GCP-2t/m7 en GCP-9) op deze wijze ingemeten. Sindsdien worden de hoogtes van de GCP grids bepaald op basis van InSAR metingen. Zoals voorheen de GCP hoogtes werden bepaald op basis van de waterpashoogtes van de meest recente waterpascampagnes, gebeurt dit nu op basis van de meest recente InSAR data.

In (Terratec, 2022) worden de resultaten van de vergelijking tussen de NAP hoogtes en de LiDAR hoogtes (na toepassing van één verticale offset) van de GCP grids weergegeven, zie Tabel B-1. De gemiddelde hoogteverschillen op de GCP grids zijn voor alle grids kleiner dan 1.5 centimeter. De standaarddeviatie van de hoogteverschillen ligt in de orde van 1-2 centimeter. De LiDAR resultaten van 2022 passen dus goed bij de Ground Control Point grids.

Tabel B-1: Vergelijking hoogtes LiDAR puntenwolk met Ground Control Point grids (uit Terratec, 2022).

Control Surface	Average dZ (m)	Minimum dZ (m)	Maximum dZ (m)	Average magnitude (m)	RMS	Std. Dev
GCP - 1	-0.004	-0.015	0.024	0.007	0.009	0.008
GCP - 2	-0.000	-0.023	0.020	0.008	0.010	0.010
GCP - 3	0.001	-0.027	0.023	0.009	0.011	0.011
GCP - 4	0.003	-0.021	0.020	0.008	0.010	0.009
GCP - 5	-0.010	-0.043	0.014	0.013	0.016	0.013
GCP - 6	-0.006	-0.028	0.015	0.009	0.011	0.009
GCP - 7	0.005	-0.012	0.043	0.009	0.012	0.011
GCP - 8	0.012	-0.038	0.042	0.017	0.020	0.016
GCP - 9	0.014	-0.030	0.049	0.019	0.023	0.018

### B.2.2 Harde topografie punten

In deze monitoringscyclus is dezelfde set harde topografiepunten gebruik als in de vorige.

In 2022 is voor de uitbreiding van ground control points gekeken naar de mogelijkheden in combinatie met de InSAR techniek voor het monitoren van bodembeweging (Van der Lugt et al., 2022). Enkele ground control point clusters zijn geïdentificeerd, waaronder in het havengebied Lauwersmeer en op de NAM locaties Ameland en Moddergat. Omdat deze ground control point clusters in gebieden liggen die onderhevig zijn aan bodemdaling, zijn de LiDAR hoogtes gecorrigeerd op basis van de bodemdaling die integraal berekend is uit alle geodetische metingen, zoals gerapporteerd in figuur 2-1 van de Meet- en regelcyclus 2022 rapportage (NAM, 2023).

De harde topografiepunten zijn initieel gekozen in gebieden buiten de bodemdalingcontouren. Echter, ondertussen ligt een deel binnen de 1 cm contour. Daarom is ervoor gekozen om alle harde topografiepunten te corrigeren op basis van de bodemdaling die integraal berekend is uit alle geodetische metingen.

### B.2.3 Sediment grids

Op het Wad zijn in 2022 bij de 16 peilmerk clusters waar GNSS metingen zijn gedaan, tevens sediment grids gemeten. De hoogte van de sediment grids worden bepaald op basis van de GNSS metingen in combinatie met de gewaterpaste hoogteverschillen op de gridpunten ten opzichte van het peilmerk waarop het GNSS station is geplaatst.

In de bepaling van de correctie parameters worden per survey de hoogteverschillen van de sedimentgrids gebruikt die gemeenschappelijk zijn met die van de referentie survey. .

## B.3 Correctie parameters

De correctie parameters zijn voor de monitoringscyclus 2022 integraal bepaald op basis van de sets meetpunten zoals beschreven in paragraaf B.2.

### B.3.1 Berekening correctie parameters

De LiDAR survey uit voorjaar 2019 ('2019a') wordt als referentie in de tijd aangehouden.

De correctie  $\epsilon$  van een survey op tijdstip  $t$  wordt geformuleerd als:

- $\epsilon(t) = Y(t) - Y_{2019a}$

De constante verschuivingen ('shifts') en de kantelingen ('tilts') in Oost-West en Noord-Zuid richting worden integraal geschat als een lineair vlak (per survey ten opzichte van de referentie survey):

- $\epsilon(x,y,t)=a(t)\cdot x+b(t)\cdot y+c(t)$  ,

waarbij  $\epsilon$  een vector van hoogteverschillen is ten opzichte van de referentie survey (in meters);  $x$  en  $y$  vectoren met coördinaten in het Rijksdriehoeksstelsel (in kilometer); en  $a$ ,  $b$ , en  $c$  de parameters van het lineaire vlak.

De correctieparameters (zie Tabel B-2) zijn bepaald op basis van de Deltares grids met 1 meter resolutie. Door middel van kleinste kwadraten schatting zijn de correctieparameters uit de hoogteverschillen van de harde topografie punten (inclusief extra ground control point clusters), de sediment grids, de Ground Control Point grids berekend. De getallen zijn iets gewijzigd ten opzichte van het vorige monitoringsjaar, wat wordt veroorzaakt door het toevoegen van nieuwe data (LiDAR en geodetische metingen) waardoor kleine wijzigingen in gedetecteerde uitschieters en de correctie voor opgetreden bodemdaling kunnen optreden. De volgende paragraaf toont de berekende constante verschuivingen ('shifts') en de kantelingen ('tilts') op basis van de correctieparameters (zie Tabel B-2), welke op centimeter niveau overeenkomen met de berekende shifts en tilts in de vorige monitoringscyclus.

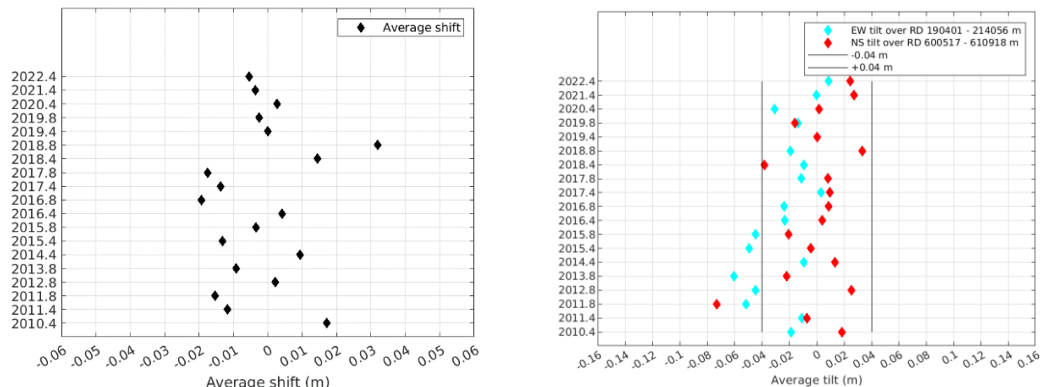
*Tabel B-2: Berekende correctie parameters a, b en c ten opzichte van de referentie survey 2019a. Zie voor de toepassing de formule hierboven.*

survey	a	b	c
2010a	0.0008	0.0018	-1.2122
2011a	0.0005	-0.0007	0.3238
2011b	0.0022	-0.0070	3.8101
2012b	0.0019	0.0024	-1.8404
2013b	0.0025	-0.0021	0.7604
2014a	0.0004	0.0013	-0.8520
2015a	0.0021	-0.0004	-0.1669
2015b	0.0019	-0.0020	0.8047
2016a	0.0010	0.0004	-0.4365
2016b	0.0010	0.0008	-0.7092
2017a	-0.0001	0.0009	-0.5442
2017b	0.0005	0.0008	-0.5818
2018a	0.0004	-0.0037	2.1617
2018b	0.0008	0.0032	-2.0755
2019a	0	0	0
2019b	0.0006	-0.0016	0.8216
2020a	0.0013	0.0001	-0.3440
2021a	0.0000	0.0026	-1.5919
2022a	-0.0004	0.0024	-1.3623



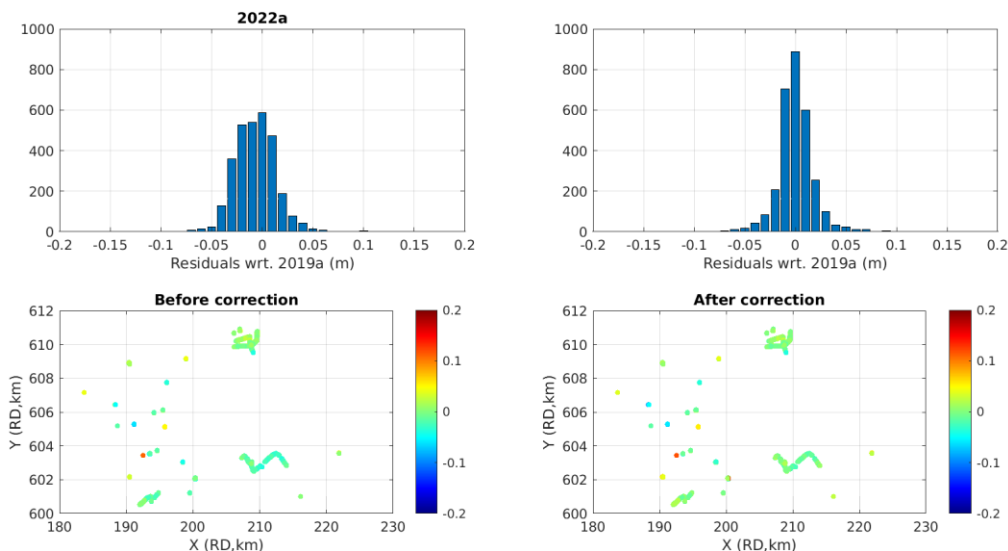
### B.3.2 Evaluatie correctie parameters

De constante verschuivingen ('shifts') en de kantelingen ('tilts') in Oost-West en Noord-Zuid richting behorende bij de berekende correctie parameters ten opzichte van de referentie survey 2019a worden getoond in Figuur B-2.



*Figuur B-2: Links: berekende constante verschuivingen ('shifts') ten opzichte van de referentie survey 2019a. Rechts: geschatte tilts in Oost-West (over ca. 30 km) en Noord-Zuid (over ca. 10 km) richting op basis van de correctie parameters ten opzichte van de referentie survey 2019a.*

De correcties vallen wederom binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Er is wel een effect zichtbaar wanneer naar de verdeling van hoogteverschillen in de histogrammen voor en na toepassing van de correctie parameters wordt gekeken, zie Figuur B-3. Na toepassing van de correctie parameters is het histogram van de hoogteverschillen van de 2022 survey ten opzichte van de referentie survey smaller verdeeld rondom 0.



*Figuur B-3: Residuen hoogteverschillen (m) survey 2022a ten opzichte van 2019a, voor (links) en na (rechts) correctie.*

Tabel B-3 geeft een overzicht van de parameters van de histogrammen van de gecorrigeerde hoogteverschillen ten opzichte van survey 2019a. Zowel de standaardafwijking, als de 25/75% en 2.5/97.5% percentielen worden getoond, om een indicatie te geven van de spreiding. De nauwkeurigheid van de LiDAR surveys is toegenomen in de tijd. Mogelijke redenen hiervoor zijn verbeteringen in de gebruikte laserscanners, en de aanpassing in vlieghoogte waardoor de survey binnen één getijdeperiode kan worden gedaan met behoud van voldoende punt dichtheid.

Verder dient te worden opgemerkt, dat in het vorige monitoringsjaar een verdere selectie is gemaakt van harde topografiepunten met het doel om de nauwkeurigheid van de schatting van de correctieparameters te verbeteren. Daarbij zijn harde topografiepunten waarvan de hoogte in een enkele LiDAR opname meer dan 5 centimeter afwijkt van de mediane waarde, of waarvan de absolute residuen over alle opnames meer dan 2 centimeter afwijken, verwijderd. De harde topografiepunten zijn ruim in de meerderheid ten opzichte van de GCP en sediment-grid-punten, waardoor de percentielen in Tabel B-3 relatief laag uitvallen (de volgende paragraaf toont de residuen op de GCP en sediment grids voor 2022).

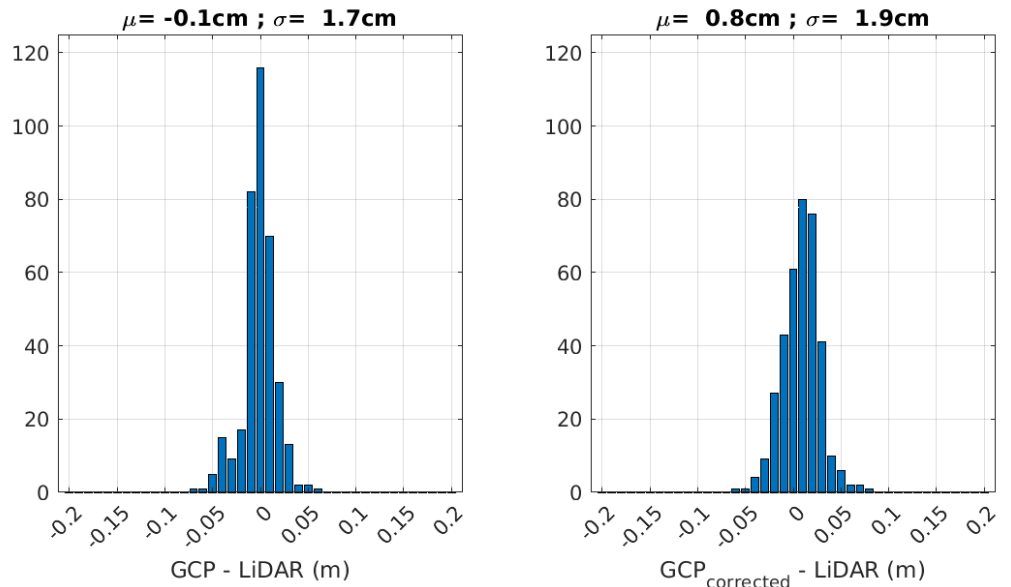
Tabel B-3: Overzicht parameters histogrammen gecorrigeerde hoogteverschillen ten opzichte van survey 2019a.

survey_corr	std(cm)	left_25%(cm)	right_75%(cm)	left_2.5%(cm)	right_97.5%(cm)
2010a	2.4	-1.6	1.4	-4.4	5.4
2011a	2.5	-1.6	1.7	-4.8	4.4
2011b	2.3	-1.4	1.4	-4.6	4.0
2012b	2.6	-1.3	1.7	-5.7	4.2
2013b	1.7	-1.1	1.1	-3.6	3.2
2014a	2.1	-1.4	1.3	-3.5	4.0
2015a	1.6	-0.8	0.8	-3.0	2.7
2015b	1.9	-1.3	1.4	-3.8	3.5
2016a	2.5	-1.0	0.7	-3.9	4.2
2016b	2.3	-1.4	1.4	-4.4	4.9
2017a	1.7	-0.9	0.8	-3.3	3.9
2017b	1.2	-0.7	0.7	-2.2	2.5
2018a	1.8	-1.1	0.9	-3.1	4.0
2018b	1.2	-0.9	0.9	-2.1	2.3
2019a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2019b	1.2	-0.7	0.7	-2.2	2.4
2020a	1.5	-1.0	0.9	-2.8	3.1
2021a	1.3	-0.8	0.7	-2.2	3.1
2022a	1.8	-1.1	0.8	-3.5	4.0

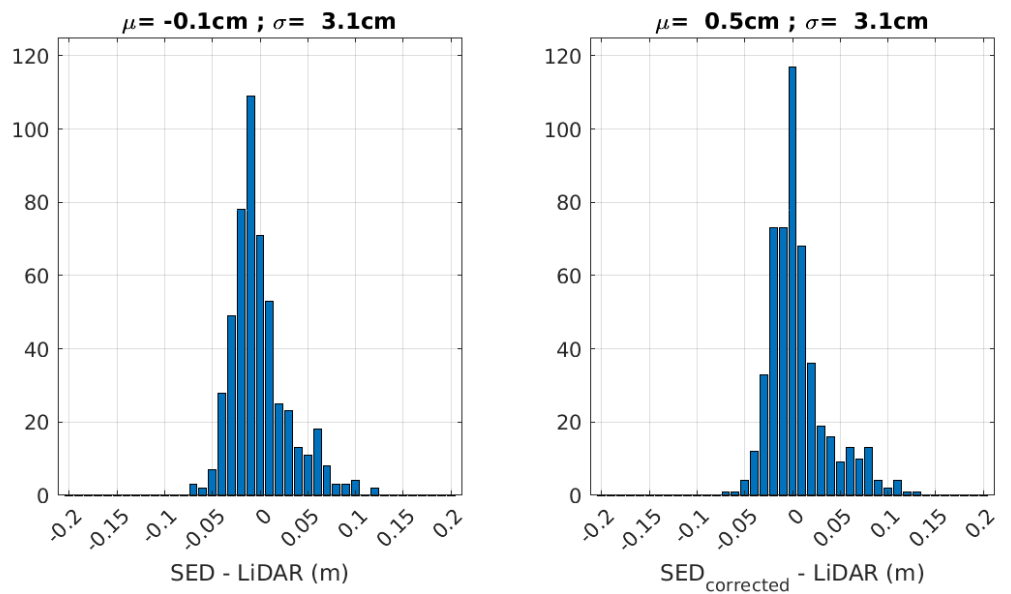
### B.3.3 Effect correcties op de GCP en sediment grid hoogtes

Tabel B-1 toont de resultaten van de vergelijking door Terratec van de LiDAR hoogtes met de GCP hoogtes. Dezelfde vergelijking is nog een keer uitgevoerd met de ongecorrigeerde en de gecorrigeerde LiDAR grids met 1 meter resolutie. In Figuur B-4 is te zien dat de gemiddelde hoogteverschillen minder dan 1 cm bedragen, met een standaardafwijking van minder dan 2 cm. De nauwkeurigheid van het ongecorrigeerde LiDAR grid van 2022 is al hoog. Deze lijkt iets naar beneden te gaan als de correctie naar de referentie survey van 2019a wordt uitgevoerd; echter de verschillen liggen ruim binnen de nauwkeurigheid van LiDAR metingen.

Figuur B-5 toont dezelfde vergelijking van hoogteverschillen, maar dan tussen de LiDAR grids met 1 m resolutie en de sediment-grid-hoogtes. Deze passing is eveneens goed, echter iets minder dan die van de GCP grids. Redenen hiervoor kunnen zijn de idealisatie precisie van het wadoppervlak, en de dynamiek van het wad (er zit tijd tussen de GNSS campagne in juni 2022 en de LiDAR opname op 18 juli 2022).



Figuur B-4: Hoogteverschillen tussen de ongecorrigeerde en gecorrigeerde LiDAR survey en de GCP grid hoogtes voor 2022.



Figuur B-5: Hoogteverschillen tussen de ongecorrigeerde en gecorrigeerde LiDAR survey en de sediment grid hoogtes voor 2022.

## B.4 Referenties

van der Lugt, M., Visser, M., Ketelaar, G. (2020). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019)". Deltares rapport 11203620-002-ZKS-0006. Delft, Nederland.

van der Vegt, H., van der Lugt, M. (2021). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020)". Deltares rapport 11206685-000-ZKS-0004. Delft, Nederland.

NAM (2022) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2021, 5/2022, EP202203203063

van der Lugt, M., Visser, M., Ketelaar, G. (2020). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019)". Deltares rapport 11203620-002-ZKS-0006. Delft, Nederland.

van der Vegt, H., van der Lugt, M. (2022). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021)". Deltares rapport 11206685-004-ZKS-0003. Delft, Nederland.

NAM (2021) Meetregister bij het meetplan Waddenzee, Rapportage van satelliet radar interferometrie, Lauwersmeer 2021, 9/2021, EP202107202657.

NAM (2023) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2023, 5/2023, EP202303212588

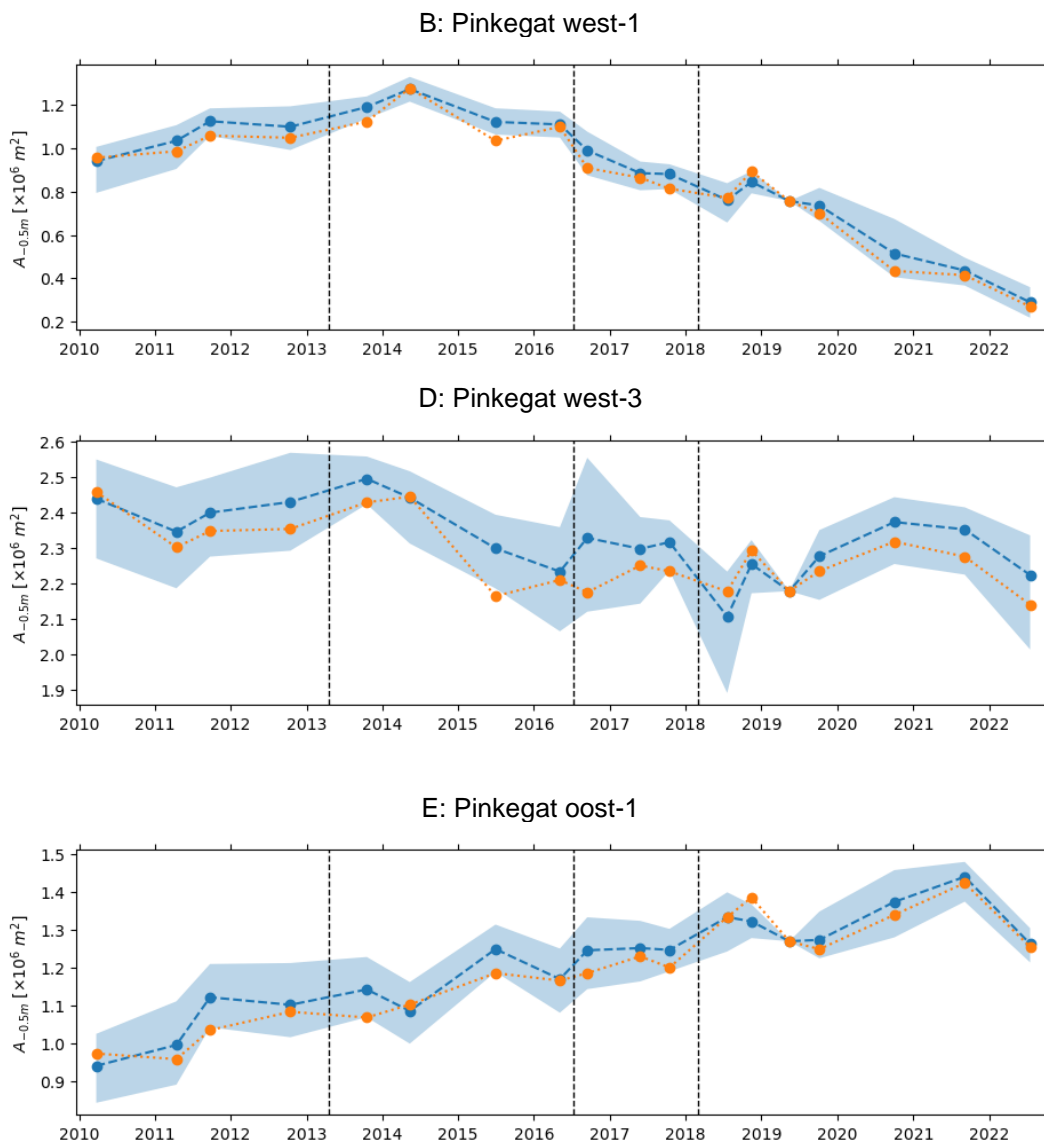
Terratec (2022) Project report 'Waddenzee – LiDAR acquisition for 2022'.

Commissie MER (2022) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2021

# C Deelgebied veranderingen

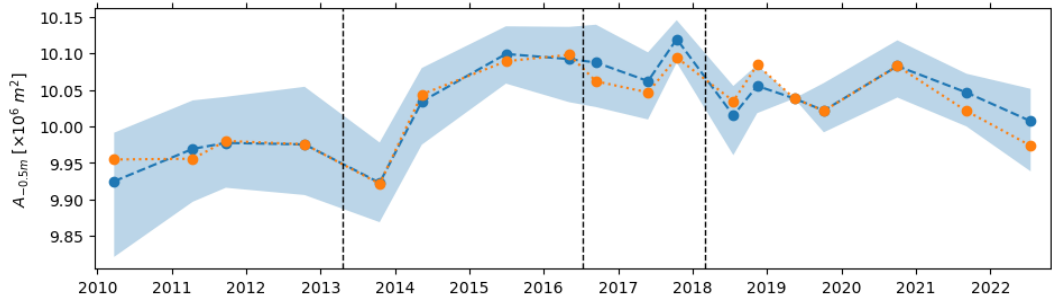
Auteur: Matthijs Gawehn (Deltares)

## C.1 Tijdsreeksen deelgebieden

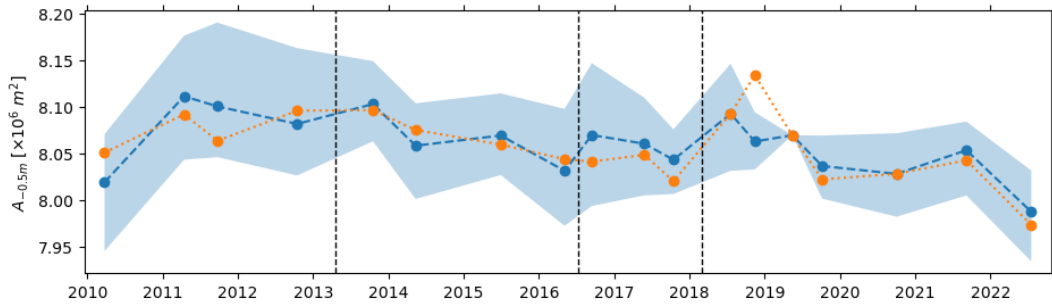


Figuur C-1 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor platen in het Pinkegat (B,D,E in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toont de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de 95% onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

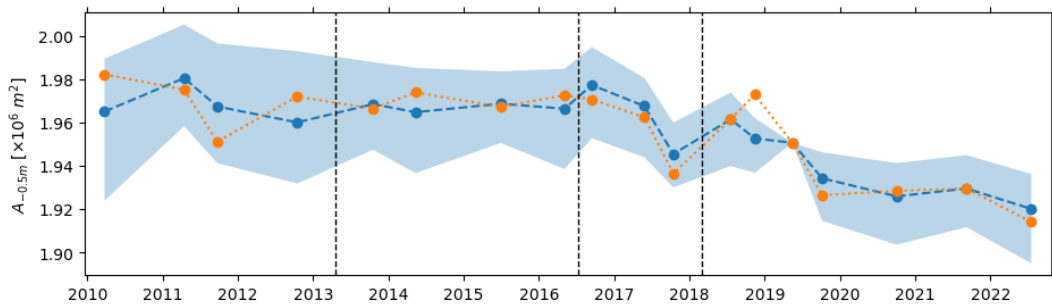
J: Eilanderbult



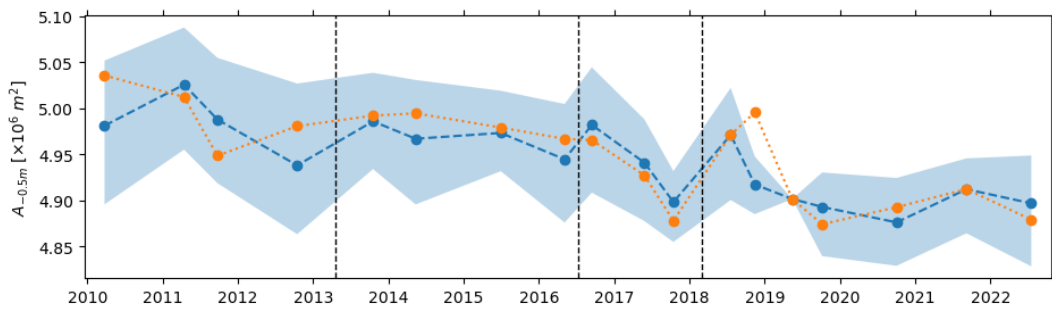
K: Schiermonnikoog zuid-1

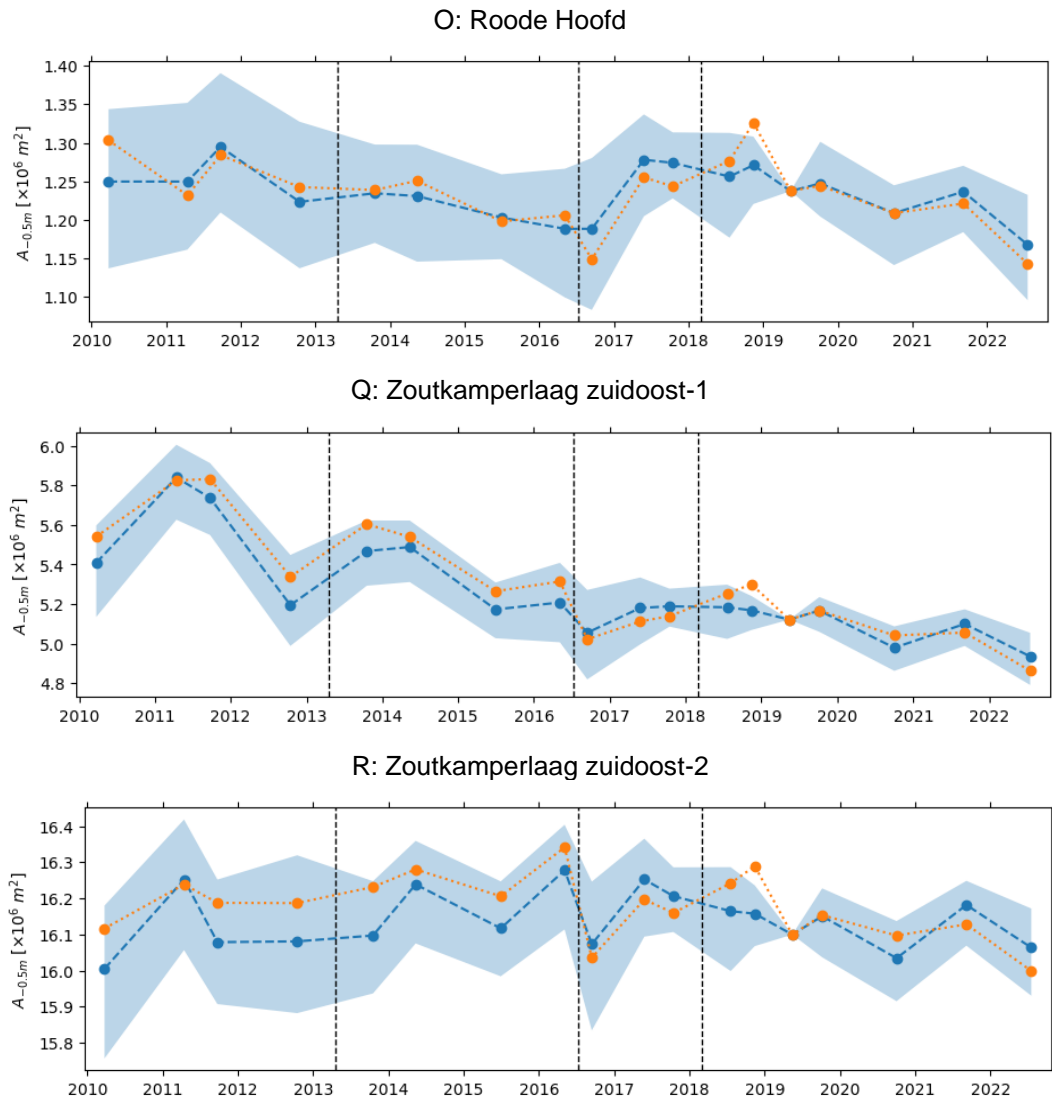


L: Schiermonnikoog zuid-2



M: Schiermonnikoog zuid-3





Figuur C-2 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor individuele platen van het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (J,K,L,M,O,Q,R in Figuur 3-3). De oranje reeks (·-·-·) toon de originele data en de blauwe reeks (-·-·-) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de 95% onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

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

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)