

Monitoring wadplaten Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2025)



Monitoring wadplaten Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2025)

Auteur(s)

Matthijs Gawehn

Monitoring wadplaten Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2025)

Opdrachtgever	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
Contactpersoon	Gini Ketelaar
Referenties	11206685-008
Trefwoorden	LiDAR, Friesche Zeegat, monitoring

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	26-05-2026
Projectnummer	11206685-008
Document ID	11206685-008-ZKS-0001
Pagina's	69
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Matthijs Gawehn	

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

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Matthijs Gawehn 	Edwin Elias 	Bart Grasmeijer 
		Zheng Bing Wang	

Samenvatting

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het gebied rond het Friesche Zeegat (tussen Ameland en Schiermonnikoog). De exploitatie van deze velden leidt tot een diepe bodemdaling van enkele millimeters per jaar. De gevolgen van bodemdaling voor de morfologie en de ecologie in het Waddengebied worden periodiek gemonitord. Deltares voert jaarlijks een morfologische analyse uit binnen dit 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 (EZK) en de Auditcommissie Monitoring Waddengas (onderdeel van de Commissie voor de mer).

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 is 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 augustus 2025.

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?”. Uit de metingen blijkt niet dat het areaal droogvallend wad is veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning. Drie onderliggende onderzoeksvragen dienen als basis van het onderzoek:

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

De ontwikkeling van individuele wadplaten in de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag laat grote variaties zien. Op de geaggregeerde schaal van de Zoutkamperlaag heffen deze individuele veranderingen in plaatoppervlak en hoogte elkaar op. Voor het Pinkegat lijkt er na 2010 een licht dalende trend in het signaal te zitten; voor de periode 2016 tot 2025 is het areaal echter stabiel en recent neemt het zelfs toe. De individuele meting van 2025 ligt boven die van 2010. De conclusie is, evenals in voorgaande jaren, dat de ontwikkeling van het totale plaatareaal en de plaathoogte uit de LiDAR-data geen directe effecten van bodemdaling laten zien.

2. 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 daar niet 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. Berekende effecten van geodetische bodemdaling op plaatareaal bevestigen dat mogelijke veranderingen te klein zijn ten opzichte van de natuurlijke dynamiek en dat de LiDAR-meetreeks daardoor nog te kort is om mogelijke effecten van bodemdaling vast te stellen. De jaarlijkse berekende bodemdaling bedraagt op kombergingsschaal slechts 1-3% van de LiDAR-onzekerheidsmarge. Daarnaast is de berekende verandering gemiddeld een factor 10-20 kleiner dan de absolute gemeten verandering.

3. 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. Afbrekende factoren zijn sterke westelijke wind en golven. Zowel westelijke wind als golfhoogte vertonen significante correlaties met de veranderingen in wadplaatoppervlak. De fysische verklaring hiervoor is dat sterke westelijke wind de waterstand in het gebied verhoogt, waardoor golven verder over de platen kunnen komen om sediment te eroderen (weg te spoelen).

Aanbevelingen

Het is aan te bevelen om de referentievlakcorrectie, met de voorjaarsmeting 2019a, te blijven gebruiken voor vervolganalyses. In de analyse van de LiDAR-data zijn statistisch significante relaties gevonden tussen veranderingen in plaatareaal en sterke westelijke wind. Ook zijn relaties met golfhoogte onderzocht, maar deze liggen (nog) op de rand van significantie.

We bevelen aan om de relatie tussen veranderingen in plaatareaal en golven verder te onderzoeken door de meetreeks verder aan te vullen. Door de LiDAR-metingen voort te zetten, kunnen kortetermijntrends in de verandering van plaatareaal beter worden onderscheiden van langetermijntrends. Daarnaast kunnen ook de verschillende invloeden op de verandering van het plaatareaal beter van elkaar worden onderscheiden. Hierbij is het ook van belang om de nieuwste inzichten in de morfologische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat mee te nemen.

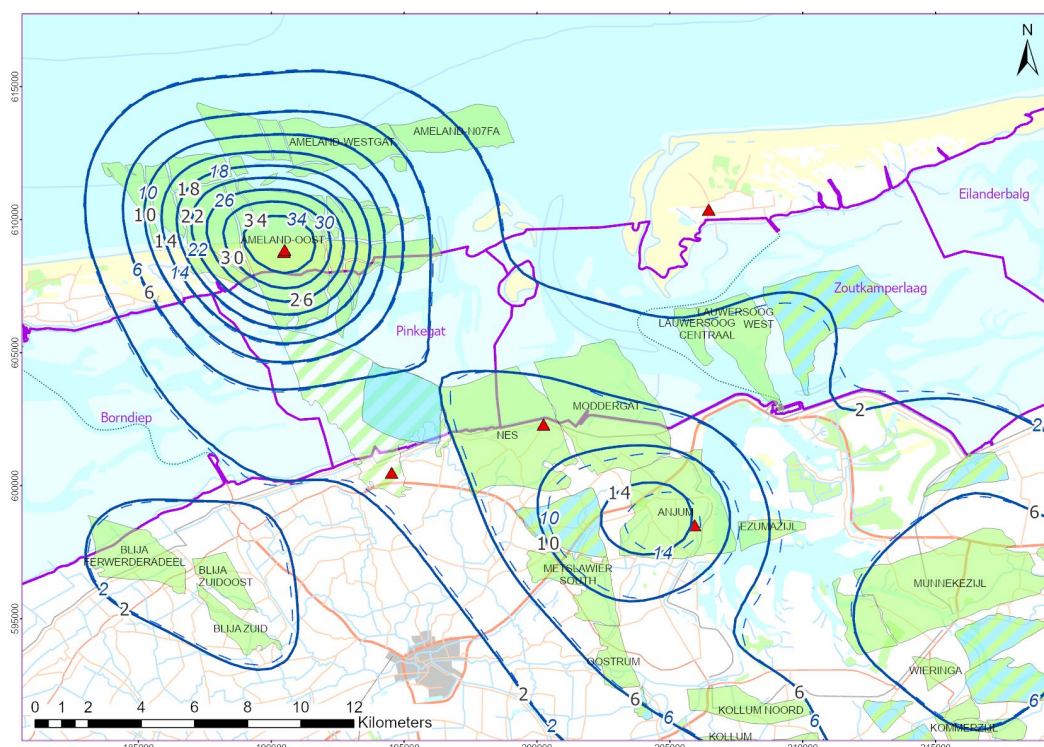
Inhoud

	Samenvatting	4
1	Status waargenomen ontwikkelingen Friesche Zeegat	8
1.1	Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat	8
1.1.1	Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2024	9
1.1.2	Status kennis morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat	10
1.2	Aanbevelingen MER commissie 2025	10
1.3	Onderzoeksvragen	11
1.4	Aanpak en leeswijzer	11
2	Verwerken van LiDAR data	12
2.1	Beschrijving opnamen 2025	12
2.2	Opwerkingsprotocol	13
2.2.1	LiDAR opwerking	13
2.2.2	Correctie systematische afwijking	13
2.2.3	Data overzicht	17
3	Analyse areaalontwikkeling	18
3.1	Weergave van onzekerheid	18
3.2	Kombergingsgebieden	18
3.3	Individuele platen	20
3.3.1	Pinkegat kombergingsgebied (A – F)	20
3.3.2	Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G-H)	21
3.3.3	Zoutkamperlaag(I-R)	22
3.4	Langetermijntrends	23
3.5	Diepe bodemdaling en LiDAR observaties volgens berekeningen van Van der Vegt en Van der Lugt (2022)	27
3.6	Conclusies areaalontwikkeling	29
4	Analyse ontwikkeling plaathoopte	31
4.1	Hypsometrie kombergingsgebieden	31
4.2	Hypsometrie individuele platen	32
4.3	Tijdsgemiddelde ontwikkeling	40
4.4	Profielen	41
4.5	Conclusies plaathoopte ontwikkeling	45
5	Invloed hydrodynamische en meteorologische condities	46
5.1	Invloed condities tijdens inwinning	47
5.2	Invloed stormachtigheid tussen opnamen	48
5.3	Invloed golfklimaat tussen opnamen	50
5.4	Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities	51

6	Conclusies en aanbevelingen	53
6.1	Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?	53
6.2	In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?	53
6.3	In welke mate is de dynamiek van het plaatgedrag in het Friesche Zeegat te correleren aan andere factoren die niet met bodemdaling samenhangen?	54
6.4	Aanbevelingen	54
	Referenties	55
A	Overzicht vluchtgegevens	57
B	NAM rapportage datareeks correctie	60
B.1	Meetpunten voor de berekening van correctie parameters	60
B.1.1	Ground Control Point grids	60
B.1.2	Harde topografie punten	61
B.1.3	Sediment grids	61
B.2	Correctie parameters	61
B.2.1	Berekening correctie parameters	61
B.2.2	Evalutie correctie parameters	62
B.3	Referenties	64
C	Deelgebied veranderingen	65
C.1	Tijdseries deelgebieden	65
C.2	Lineaire trends in tijdseries Pinkegat en Zoutkamperlaag	67

1 Status waargenomen ontwikkelingen 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 aangevangen met de winning uit gasvelden onder de Waddenzee; vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Deze gaswinning leidt tot daling van de diepe ondergrond (Figuur 1-1).



Figuur 1-1 Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2025) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2024 volgens de M&R-rapportage over 2023. De rode driehoeken geven de posities van de GNSS-stations aan.

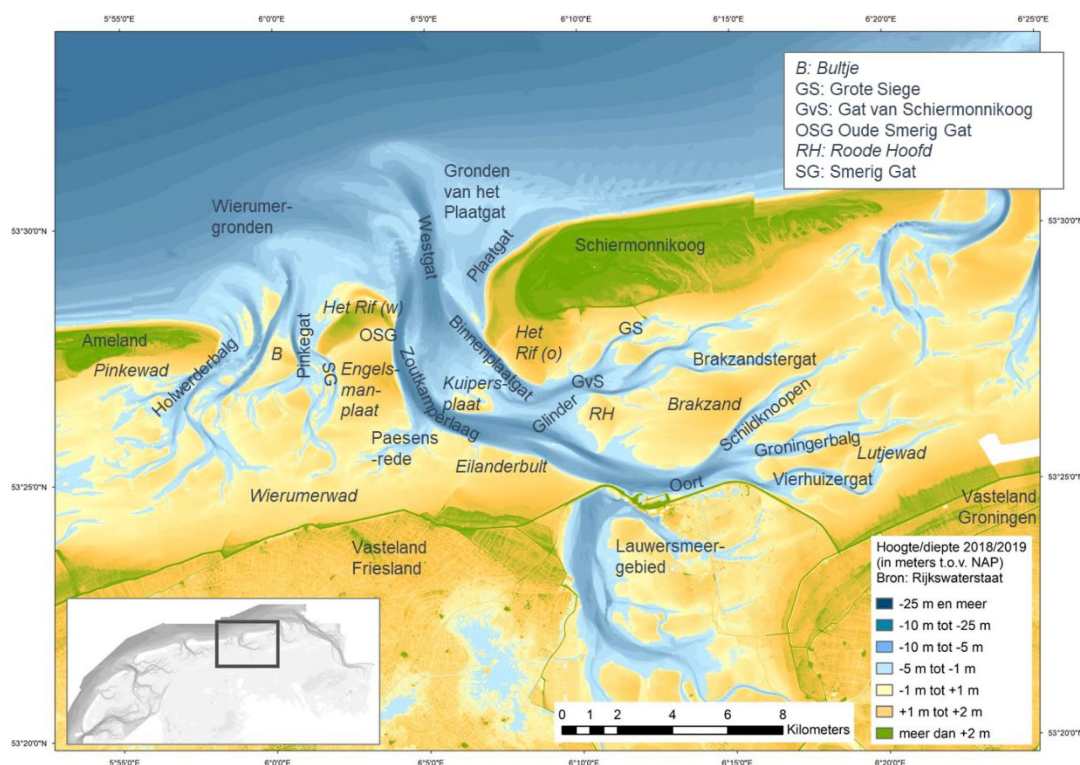
Voor de gaswinning geldt het hand-aan-de-kraan principe waarbij monitoring van veranderingen in het gebied een belangrijke rol speelt (NAM, 2007). De effecten van bodemdaling op morfologie en ecologie in het Waddengebied worden voortdurend onderzocht. Deltares voert jaarlijks een morfologische analyse uit. Het voorliggende rapport is onderdeel van de monitoringscyclus 2025. Leidend in deze rapportage is de vraag of het wadplaatoppervlak 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 (Gawehn, 2025) is één nieuwe opname uit augustus 2025 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 wordt kort de morfologische ontwikkeling van het

Friesche Zeegat toegelicht. 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 2024

Gawehn (2025) constateerde dat over de meetperiode 2010-2024 zowel in het kombergingsgebied Pinkegat als in de Zoutkamperlaag de veranderingen in plaatareaal (Pinkegat: 0 km², Zoutkamperlaag: +1 km²) binnen de foutmarge van de metingen (Pinkegat: 4 km², Zoutkamperlaag: 6 km²) bleven, met vrijwel hetzelfde plaatoppervlak in 2024 ten opzichte van 2010. Daarmee kan er vanuit de bodemveranderingen uit LiDAR data niet geconcludeerd worden dat er effecten van bodemdaling zichtbaar zijn.

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 van bodemdaling lieten zien ten opzichte van de natuurlijke morfodynamiek (Van der Vegt en Van der Lugt, 2022). In de huidige rapportage zijn de berekeningen van Van der Vegt en Van der Lugt (2022) voor de desbetreffende periode 2010-2021 gebruikt om de relatieve bijdrage van bodemdaling te kwantificeren ten opzichte van gemeten veranderingen, meetonzekerheid en om een schatting te geven van een benodigde LiDAR observatie periode om mogelijke effecten van bodemdaling te kunnen vaststellen.

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 effecten van meetfouten gereduceerd, wat ertoe heeft

geleid dat de geconstateerde areaalveranderingen coherent zijn in de tijd en daardoor 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 het westelijke, relatief kleine kombergingsgebied, dat bestaat uit 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 (Elias, 2019; Oost et al., 2020; Elias en Oost, 2021; Elias en De Wilde, 2025).

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. Recentelijk zijn gedetailleerde analyses uitgevoerd naar de ontwikkeling van de Oostelijke Waddenzee (Elias en De Wilde, 2025) en de eilandstaart van de Hon (Elias, 2025). In deze studies zijn de veranderingen in sedimentvolume en ook de ontwikkeling van plaatareaal bestudeerd. Maar omdat er in deze studies een andere afbakening van de plaatgebieden en referentievlakken gehanteerd is, is een directe vergelijking met de resultaten van de LiDAR studies nog niet te maken. Een koppeling van de LiDAR studies aan het overkoepelende systeem kan meer context bieden bij de verklaring van geobserveerde plaatveranderingen.

1.2 Aanbevelingen MER commissie 2025

Deze paragraaf refereert naar het advies van de Auditcommissie “Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen” van 26 november 2025 (Commissie MER, 2025).

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 natuurlijke processen in belangrijke mate het plaatgedrag bepalen. Door de geulplaatdynamiek, in combinatie met wisselende meteorologische en hydrodynamische condities.

De Auditcommissie onderschrijft ook dat de veranderingen in plaathoogte in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag zeer gering zijn gezien de hypsometrische curves van 2010 en 2024 nagenoeg op elkaar liggen. De auditcommissie concludeert dat de gaswinning in de periode 2010-2024 geen meetbare invloed had op het gemeten plaatareaal droogvallend wad.

Aanbevelingen van de Auditcommissie betreffende de volgende drie aspecten zijn niet in deze rapportage opgenomen, maar worden in de integrale rapportage behandeld: 1. De

betrekking van resultaten over de kombergingsgebieden van de Centrale Waddenzee, 2. De onbalans tussen bodemdaling en lokale sedimentatie bij Ameland oost en 3. De omgang met luchtdrukverschillen bij de analyse van waterstanden.

De Auditcommissie heeft eerder geadviseerd om in toekomstige 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.

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 drie onderzoeksvragen:

1. Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?
2. In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?
3. 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 arealen van verschillende hoogteklassen (boven NAP-0,5 m) veranderen.

Hoofdstuk 5 beschrijft de correlatie van de ontwikkeling van het plaatareaal met meteorologische factoren en golfinformatie. Tenslotte worden in Hoofdstuk 6 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

2 Verwerken van LiDAR data

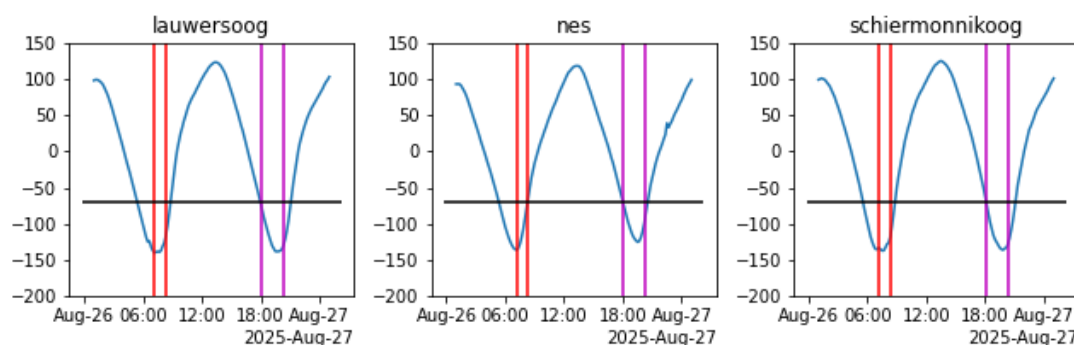
In dit hoofdstuk wordt de kwaliteit van de nieuwste LiDAR opnamen besproken. Daarnaast wordt de methodiek beschreven van opwerking van de LiDAR data tot een geschikte dataset voor het analyseren van plaatareaalveranderingen.

2.1 Beschrijving opnamen 2025

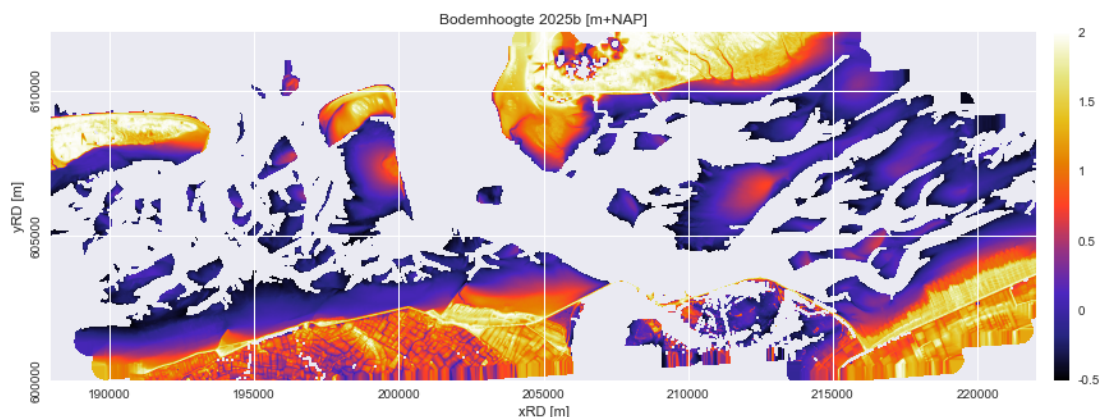
Op 26 augustus 2025 heeft Field wederom LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat gemaakt. Het rapport van Field (2025) beschrijft het vliegplan, de vlakdekking, puntendichtheid en de kwaliteitscontrole. Net als in de jaren 2020 tot 2024 is ook in 2025 een vluchthoogte van 1750 m aangehouden. De minimale puntendichtheid geassocieerd met deze hoogte is nog steeds 5,7 punten/m², wat voldoende is voor het opwerken naar rasters van 1x1m en 10x10m.

Het vluchtplan is gebaseerd op het getijvenster van de stations Lauwersoog, Nes en Schiermonnikoog, 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 LiDAR opname lag binnen de getijvensters van alle drie stations (Figuur 2-1). Hierbij wordt opgemerkt dat de vluchtlijnen in de 2025 LiDAR dataset over twee opeenvolgende getijvensters zijn opgenomen (Field (2025), Appendix 8). Beide getijvensters voldoen aan de eis van NAP -0,7m.

De vlakdekking van de 2025 LiDAR opname bevat het gehele Friesche Zeegat (zie Terratec AS. (2025) 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 Lauwersoog, Nes en Schiermonnikoog meetstations, met start en stop tijden van de metingen voor het getijvenster in de ochtend (rood) en in de middag (paars) en het waterstandscriterium van -0,7m (zwart).



Figuur 2-2 Hoogtekaart van de ingewonnen data in najaar 2025, na toepassing van correctievlaak.

2.2 Opwerkingsprotocol

Voor de interpretatie van de LiDAR meetreeks is de 2025 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 getijvenster zijn gevlogen.
- Mediaan van de LAS punten binnen een roostercel bepalen op standaard 1x1m rooster, waarbij geen minimum aantal punten wordt aangehouden. Van het 1x1 m rooster worden vervolgens ook 10x10m en 20x20m roosters afgeleid.
- 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 (2010-2025) als uitgangspunt.

In 2021 is ervoor gekozen om de LiDAR opname uit het voorjaar van 2019a 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 dezelfde voorjaarsmeting 2019a als referentie aangehouden. Voor een uitgebreid verslag van de totstandkoming van de correctie, zie Bijlage B.

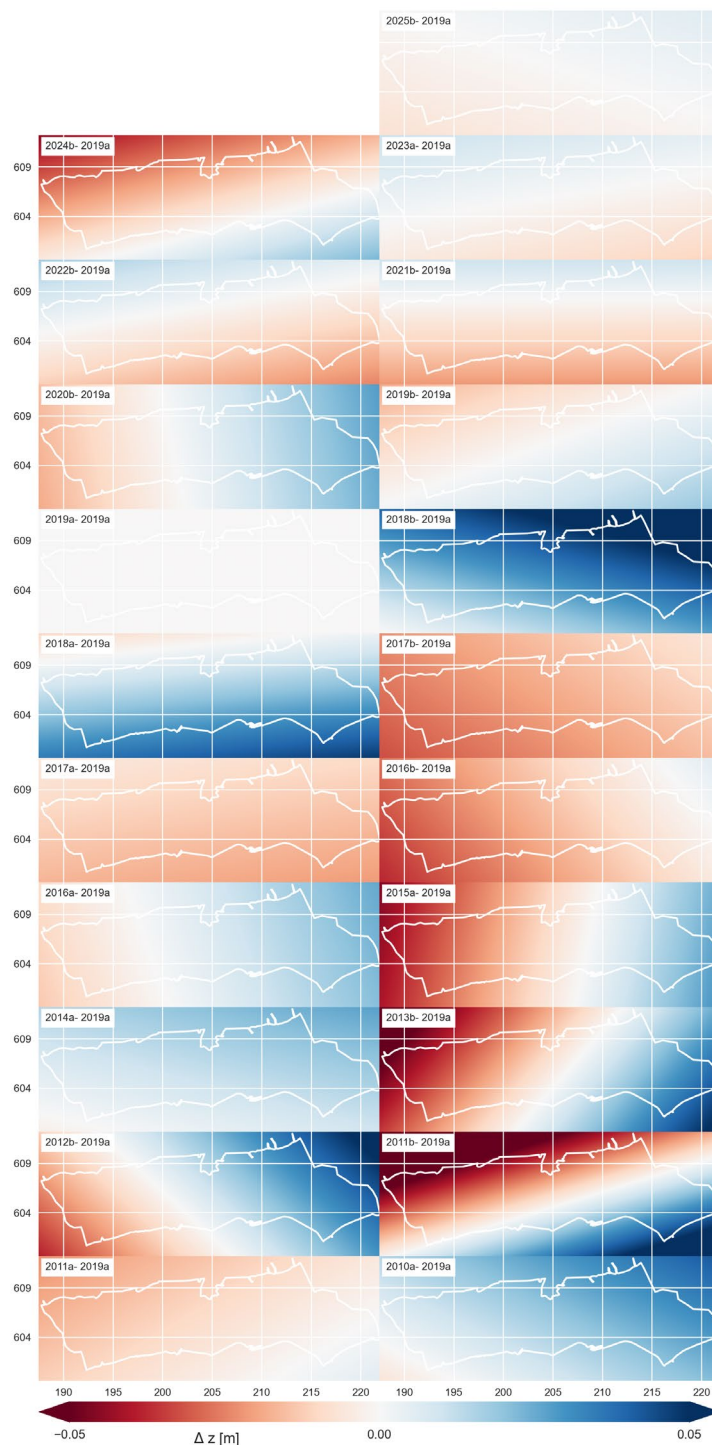
Hier vatten we het uiteindelijke stappenplan waartoe NAM is gekomen samen:

- 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 ϵ in m, en x en y in km.

In Tabel 2.1 zijn de waarden van de vlakcoëfficiënten zoals berekend door NAM gegeven. 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.

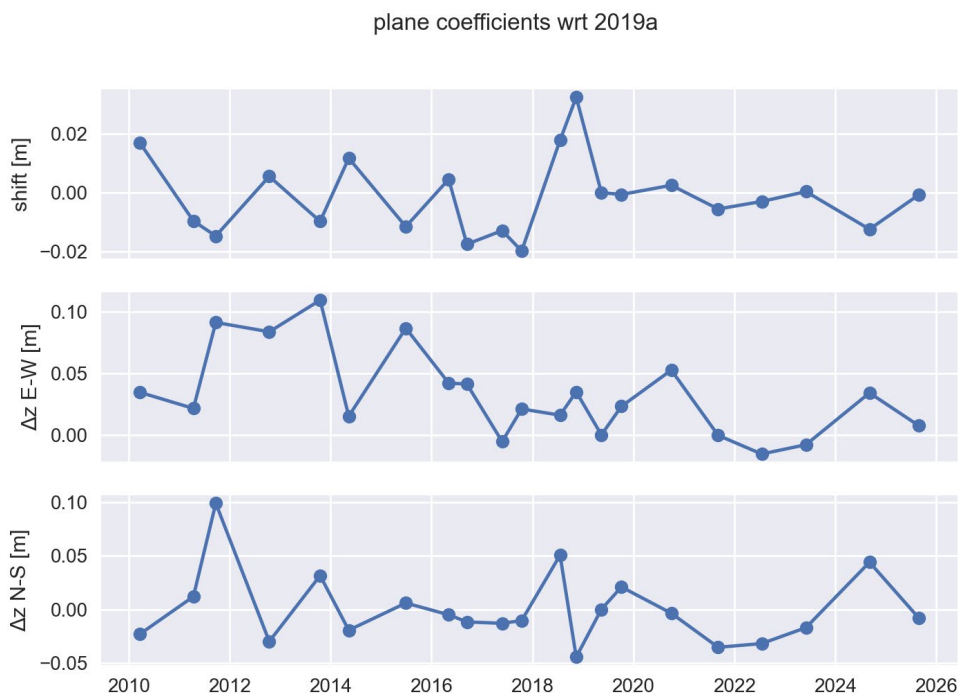
Tabel 2.1 Correctievlak coëfficiënten per survey.

survey	a	b	c
2010a	0,00082	0,00164	-1,14348
2011a	0,00051	-0,00085	0,40199
2011b	0,00217	-0,00707	3,82923
2012b	0,00199	0,00214	-1,69527
2013b	0,00260	-0,00225	0,82598
2014a	0,00036	0,00139	-0,90372
2015a	0,00206	-0,00042	-0,17517
2016a	0,00100	0,00036	-0,41662
2016b	0,00098	0,00084	-0,72544
2017a	-0,00013	0,00093	-0,55003
2017b	0,00050	0,00075	-0,57575
2018a	0,00038	-0,00361	2,12831
2018b	0,00083	0,00318	-2,06318
2019a	0,00000	0,00000	0,00000
2019b	0,00055	-0,00149	0,79069
2020b	0,00125	0,00026	-0,40880
2021b	-0,00001	0,00253	-1,53667
2022b	-0,00037	0,00228	-1,30954
2023a	-0,00019	0,00122	-0,70038
2024b	0,00081	-0,00314	1,72602
2025b	0,00018	0,00056	-0,37667



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 eerdere studies (Gawehn, 2023-2025), omdat hetzelfde 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 2025b zijn de correcties klein en vergelijkbaar met de referentiemeting 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 2 datasets gebruikt:

1. de gecorrigeerde hoogtekaarten
2. de originele hoogtekaarten

Binnen beide gemeten datasets 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 te veel 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), en voor de recentere kaartbeelden van 2019-2024 verwijzen wij naar de corresponderende jaarlijkse rapporten (Van der Lugt et al., 2020a; Van der Vegt en Van der Lugt, 2021,2022; Gawehn 2023-2025). De nieuwe dataset van 2025 wordt in dit rapport getoond (Figuur 2-2).

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

3 Analyse areaalontwikkeling

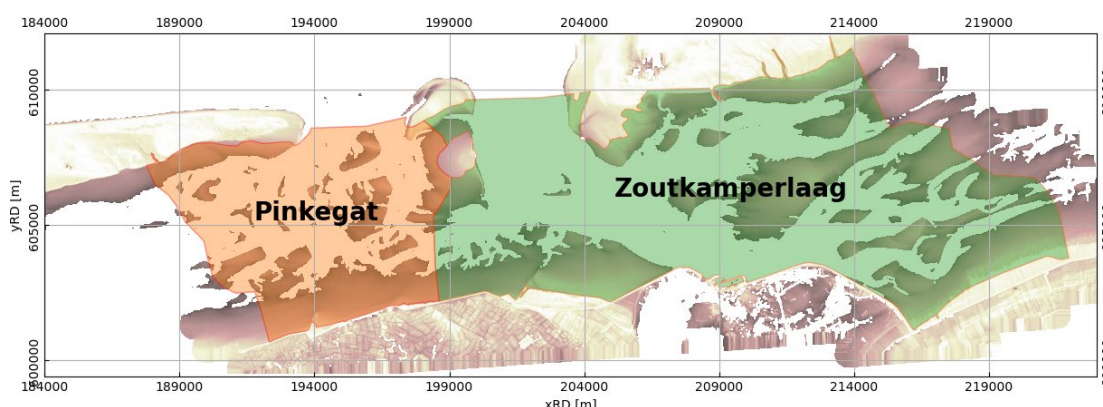
In dit hoofdstuk rapporteren we de ontwikkeling van het plaatareaal voor zowel de kombergingsgebieden als individuele platen op basis van 10x10 m grids van de LiDAR opnamen van 2010 tot en met 2025. Ook plaatsen we deze observaties in de context van de vaklodingen dataset van Rijkswaterstaat.

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). Sinds Gawehn (2023) wordt de onzekerheidsmarge gekwantificeerd op basis van het 95% onzekerheidsinterval, gegeven door de 2,5 en 97,5 percentielen van individuele correcties (zie bijlage, Tabel-bijlage B.3). Hierdoor varieert de mate van onzekerheid per correctie. Zoals in Paragraaf B.2.2 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 ten slotte vertaald naar een onder- en bovengrens voor berekend plaatareaal.

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.

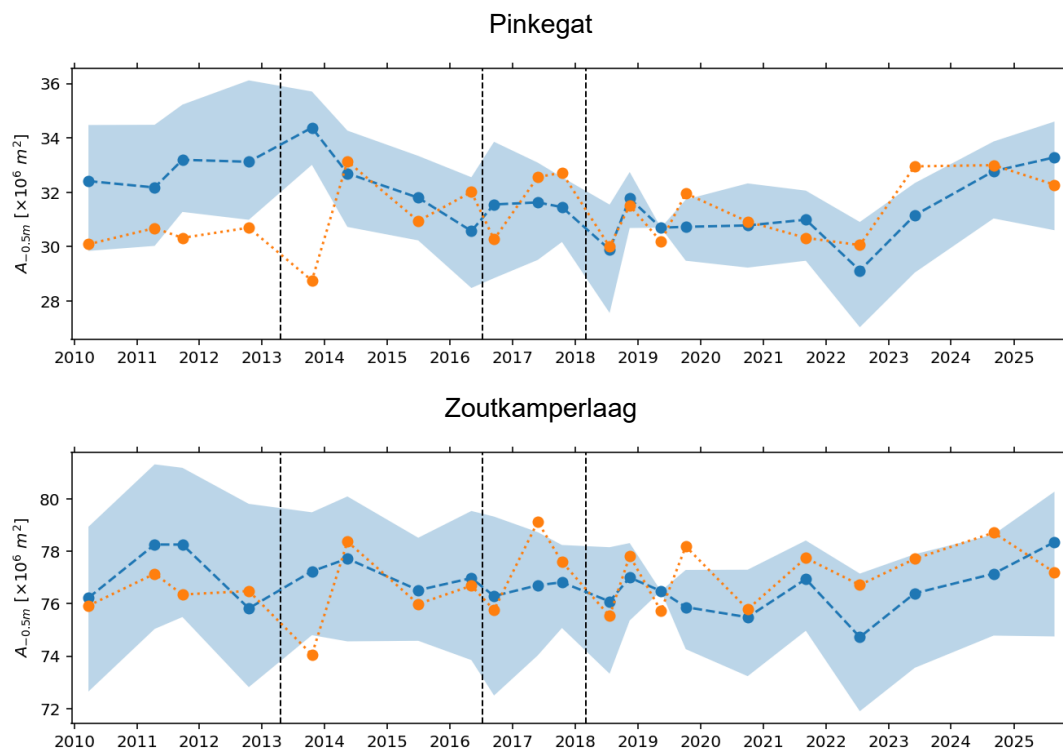


Figuur 3-1 Analysepolygonen voor areaalontwikkeling op kombergingsschaal. Deze polygonen zijn hetzelfde als sinds begin van de LiDAR metingen in 2010.

De correctie op de dataset leidt tot een verkleining van onregelmatigheden in plaatareaal van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. De correctie verwijdert niet de fluctuaties in de meetreeks, ze worden alleen gelijkmatiger over de tijd verdeeld. Voor het Pinkegat lijkt na 2010 een licht dalende lineaire trend in het signaal te zitten, voor de periode 2016 tot 2025 is het areaal stabiel en recent neemt het zelfs toe. De individuele meting van 2025 ligt boven die van 2010 (over het algemeen zijn lineaire trends in de meetreeks niet significant ten opzichte van de onzekerheid, zie Appendix C.2). Een beschouwing op basis van lineaire trends dekt niet de complexiteit van de geobserveerde veranderingen in plaatareaal. Als men het begin 2010 en het eind 2025 van de metingen bij het Pinkegat beschouwd, is het plaatareaal volgens de onzekerheidsmarge vrijwel onveranderd (Figuur 3-2, gecorrigeerde metingen en onzekerheidsbanden rond 2010 en 2025). Deze observatie is vergelijkbaar met de Zoutkamperlaag (Figuur 3-2, zie ook Appendix C.2). Hier wordt voor de gehele periode 2010-2025 maar weinig verandering van plaatareaal geobserveerd. Vergelijkt men de twee specifieke momenten van de begin situatie 2010 met de eind situatie 2025 is het totale

plaatareaal van de Zoutkamperlaag zelfs toegenomen met 2 km² (zie Figuur 3-2: gecorrigeerde LiDAR metingen van 2010 en 2025).

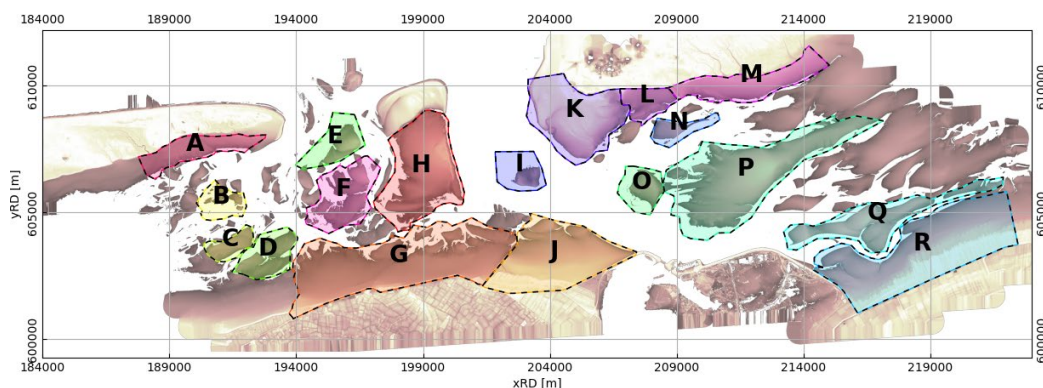
Over het algemeen zijn de plaatontwikkelingen in opeenvolgende jaren vaak een orde groter dan de trend ontwikkelingen over de gehele tijdserie. De LiDAR metingen van 2023 en 2024 laat zien dat de plaatarealen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag binnen twee jaar zijn toegenomen met elk 2-4 km² en daarmee de dip in 2022 overcompenseren (zie Gawehn, 2023) (Grote bijdragen leveren bijvoorbeeld het Wierumerwad en Brakzand). In 2025 is een verdere stijging waargenomen. De tijdsreeksen van plaatarealen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag zullen langer moeten worden om structurele veranderingen vast te kunnen stellen. In Paragraaf 4.3 gaan wij in meer detail in op plaathoogteontwikkelingen.



Figuur 3-2 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP -0,5 m 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 horizontale zwarte lijn (—) is de referentie waarbij het plaatareaal niet veranderd. De verticale streepjeslijnen geven de wisseling van type laserscanner weer.

3.3 Individuele platen

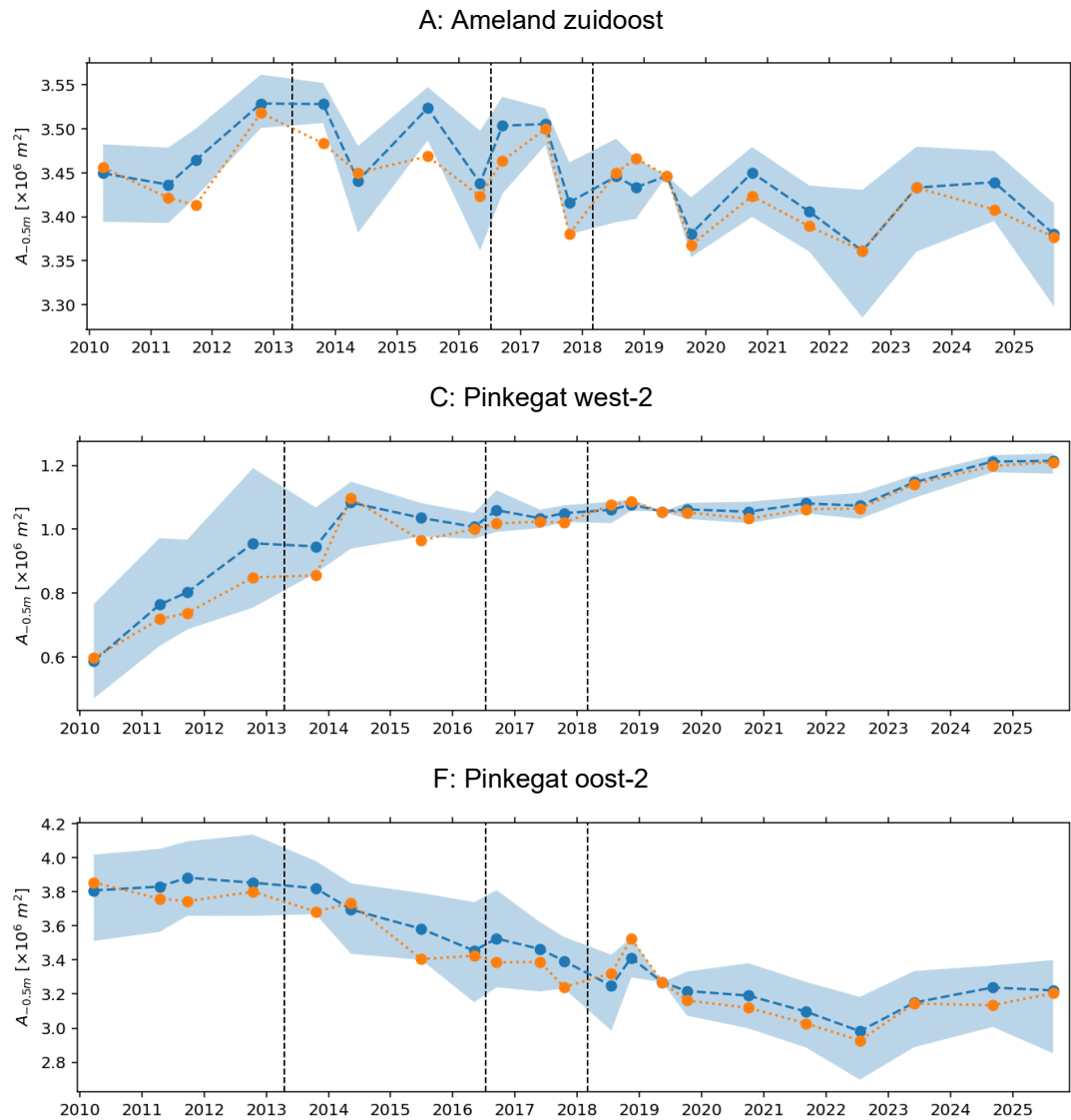
Op geaggregeerd kombergingsniveau is geen structurele ontwikkeling in areaal af te leiden. Dit komt deels door meetonzekerheid van de LiDAR data, maar ook door de lange tijdschaal waarop structurele veranderingen kunnen worden vastgesteld (zie Paragraaf 3.4). Daarnaast vallen op geaggregeerde ruimtelijke schaal de ontwikkeling van verschillende platen tegen elkaar weg. Op het niveau van individuele platen vinden wel significante ontwikkelingen plaats, die ook met de LiDAR opnamen duidelijk waar te nemen zijn. Om deze ontwikkelingen te onderzoeken, zijn 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 kombergingsgebied (A – F)

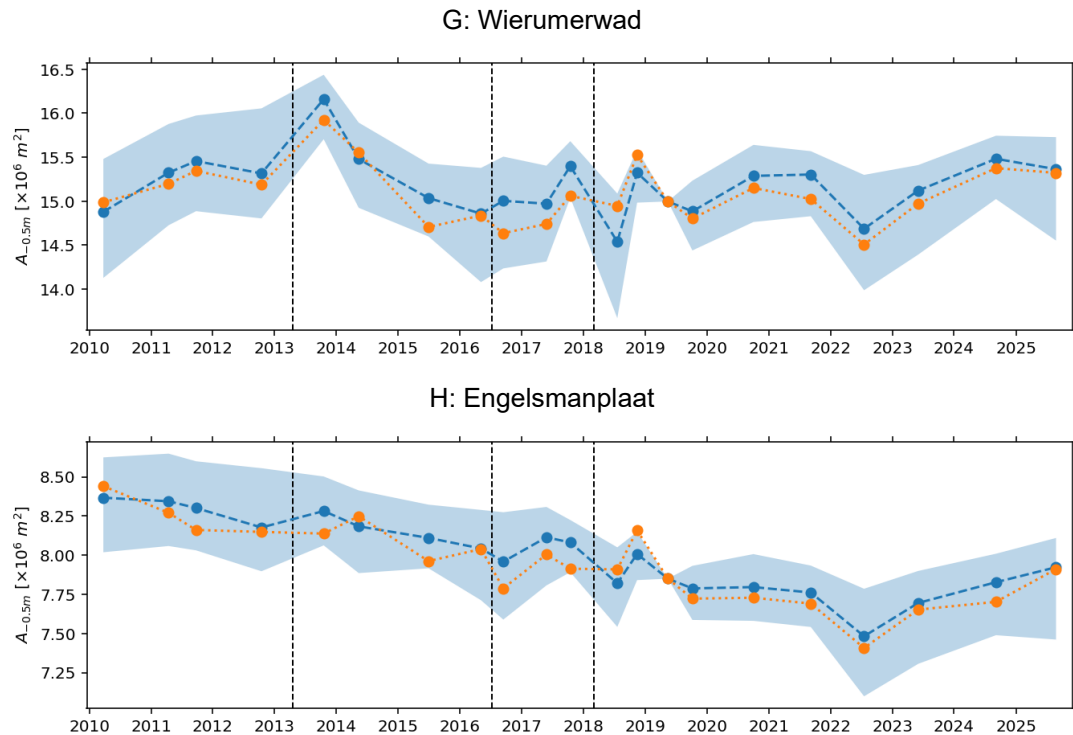
De areaalontwikkeling van individuele platen in het Pinkegat verschilt en kan stijgen en dalen (Figuur 3-4). Bijvoorbeeld in deelgebied A schommelt het plaatareaal sterk, met grote onzekerheid. Het areaal lijkt over het algemeen licht te dalen, maar deze daling is gelijkwaardig met dalingen in vergelijkbare gebieden ten zuiden van Schiermonnikoog die niet in de bodemdalingskom zitten (cf. L, M in Appendix C.1). 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-0,5 m voor enkele 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)

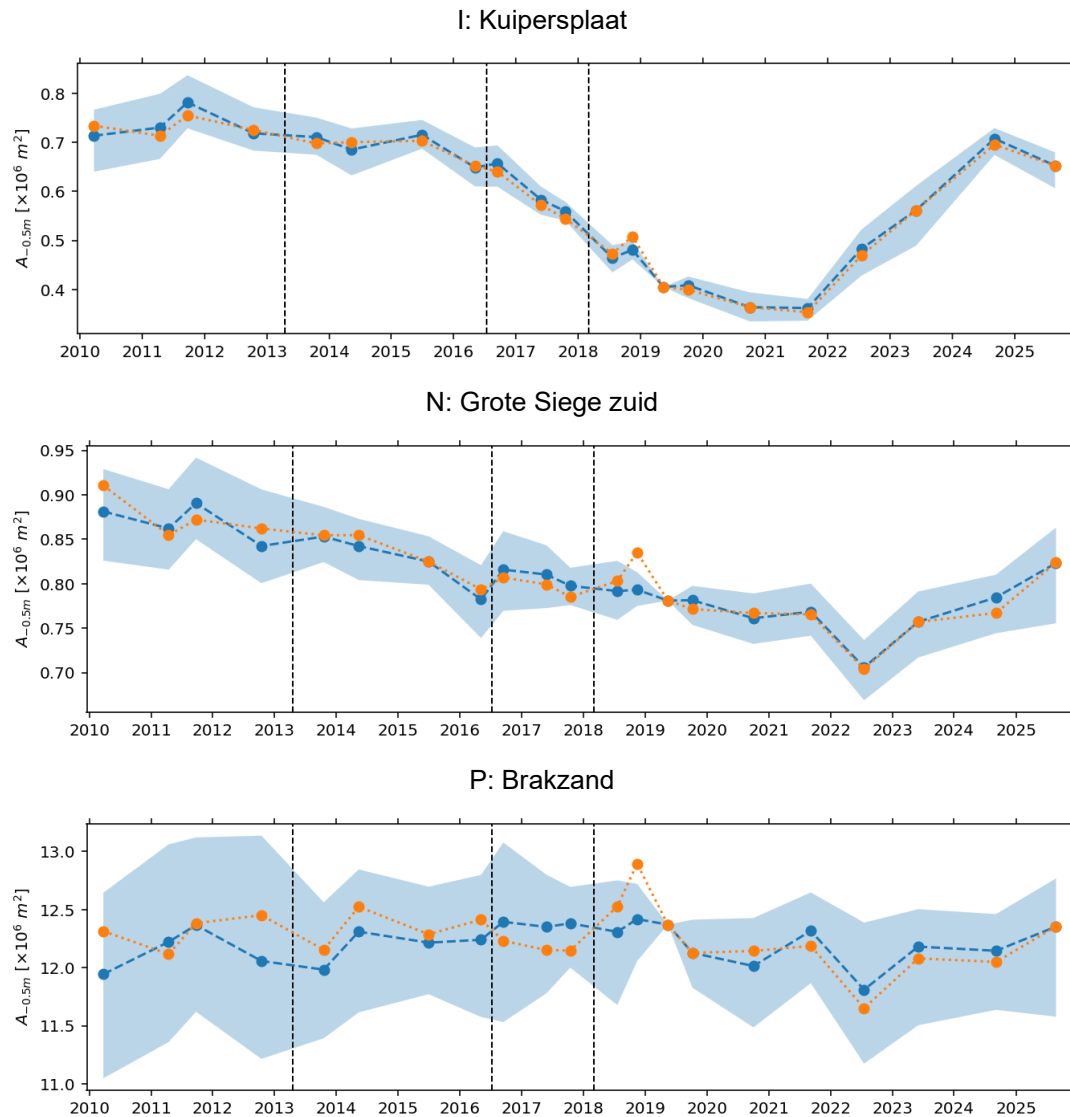
Het plaatareaal op het Wierumerwad (G, Figuur 3-5) blijft grotendeels constant met over het algemeen relatief geringe fluctuaties ten opzichte van de onzekerheidsmarge. Het areaal van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5) krimpt licht, maar dit komt door natuurlijke morfodynamiek. Aan de voorzijde van de Engelsmanplaat is een grote bank aangeland (het Rif). Deze bank is sinds 1975 sterk in omvang toegenomen maar is nog gescheiden van de Engelsmanplaat door het Oude Smeriggat waardoor uitwisseling tussen het Rif en de Engelsmansplaat nog niet optreedt. De groei van het Rif gaat ten koste van de zand aanvoer naar de Engelsmansplaat. Doordat er weinig zandtoevoer is, maar wel erosie door geulverplaatsing van onder andere Smeriggat aan de westzijde en Zoutkamperlaag aan de oostzijde neemt de Engelsmanplaat in volume af en deze trend zal zich doorzetten tot het Rif verheelt met de achterliggende Engelsmansplaat. De recente toename in volume lijkt erop te duiden dat het verhelingsproces nu gaande is.



Figuur 3-5 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0,5 m 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.

3.3.3 Zoutkamperlaag(I-R)

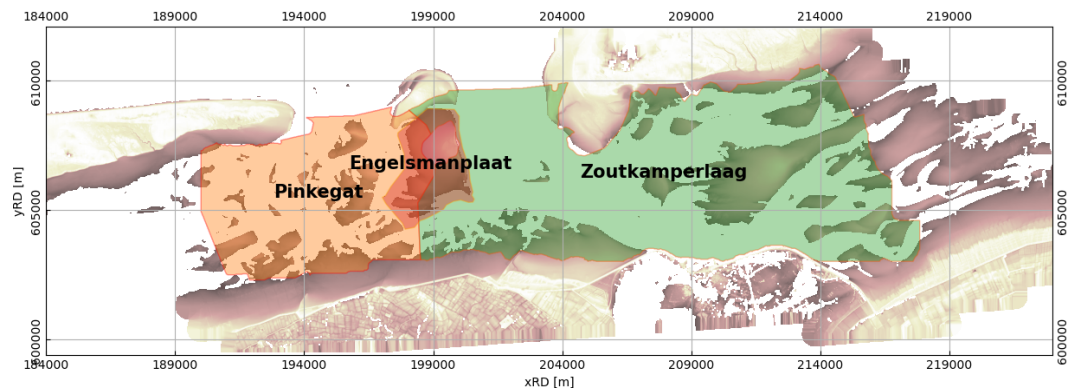
De platen in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag vallen buiten het sterkste bodemdalingsgebied en worden hier ter referentie besproken. Ook in de Zoutkamperlaag zien we hoe natuurlijke dynamiek kan bijdragen aan het krimpen en groeien van platen, voornamelijk in de buurt van de grotere geulen, zie bijvoorbeeld de Kuipersplaat (Figuur 3-6 I) die vanaf het jaar 2022 een sterke stijging van plaatareaal zien, nadat deze in de voorgaande 7 jaar structurele krimp vertoonde. In het gebied direct ten zuiden van Schiermonnikoog zijn platen nog netto aan het krimpen (voorbeeld Figuur 3-6 N; verdere voorbeelden K, L, M in Appendix C.1). De arealen van de grootste platen in het westen van het gebied (voorbeeld Figuur 3-6 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 3-6 N; ander voorbeeld Q in Appendix C.1).



Figuur 3-6 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0,5 m voor enkele voorbeelden van platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (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

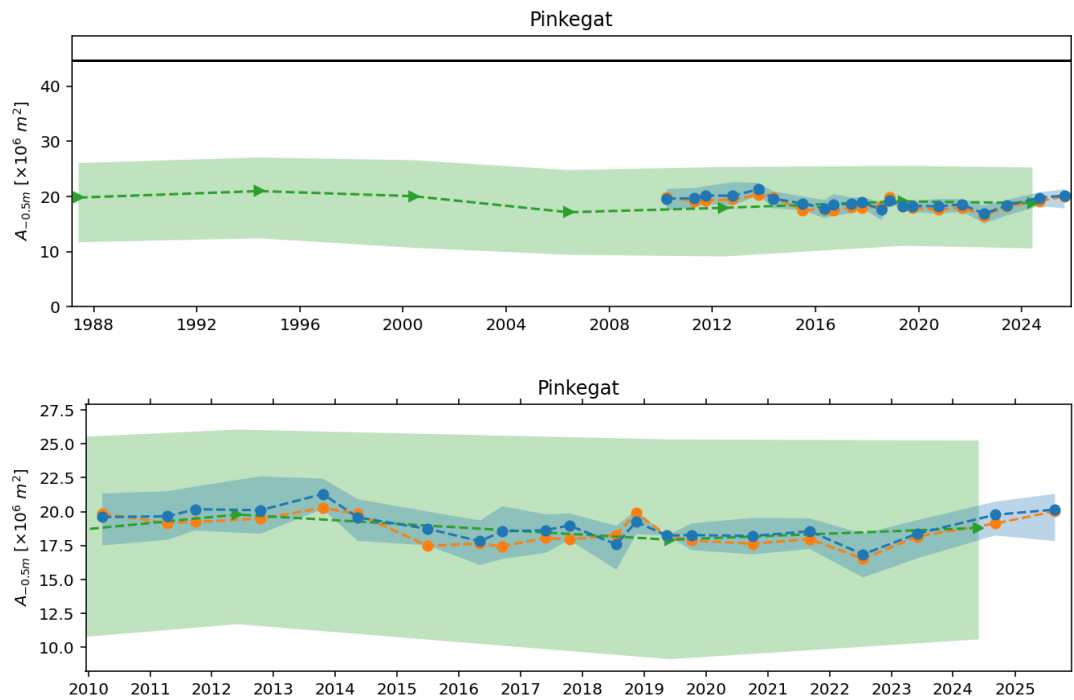
Naast de opnamen van het Friesche Zeegat die in opdracht van NAM sinds 2010 worden gemaakt, zijn er langer lopende meetreeksen door Rijkswaterstaat (RWS) beschikbaar, de zogenoemde vaklodingen. Hoewel de onzekerheid die gepaard gaat met vaklodingen vele malen groter is dan die met de NAM LiDAR datareeks 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 3-7). Dit voorkomt dat er bathymetrie moet worden geëxtrapoleerd.



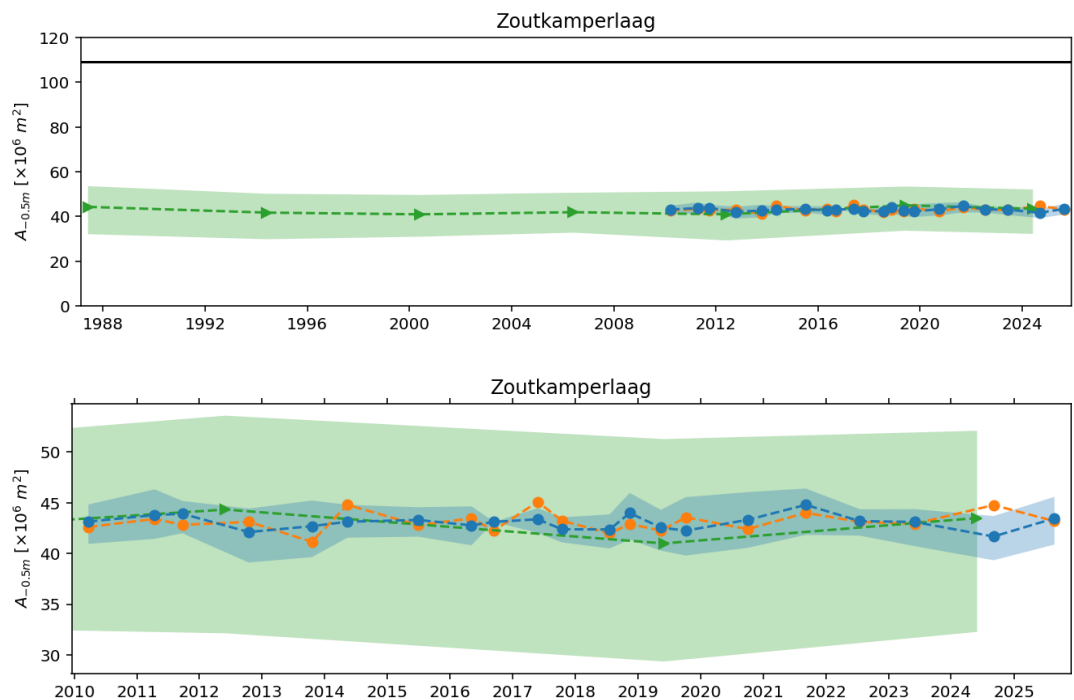
Figuur 3-7 De bijgesneden polygonen voor de analyse van langetermijntrends. Bijsnijding heeft plaatsgevonden op basis van de vlakdekking van de Vaklodingenreeks.

Een vergelijking van areaalontwikkeling op basis van de RWS Vaklodingen voor de periode 1987-2024 en een uitsnede van de NAM LiDAR data gedurende de monitoringsperiode sinds 2010 wordt weergegeven in Figuur 3-8, Figuur 3-9 en Figuur 3-10. Er zijn drie RWS opnamen die binnen de monitoringsperiode vallen: een opname in 2012, 2019 en een opname in 2024. Deze opnamen geven een vergelijkbaar beeld als de LiDAR data voor beide kombergingsgebieden. De uit de vaklodingen afgeleide arealen met onzekerheidsmarges overlappen volledig met de arealen en onzekerheidsmarges van de LiDAR metingen. In Vaklodingen zijn de gegevens voor plaatgebieden eveneens ingemeten door middel van een LiDAR. 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 LiDAR data.

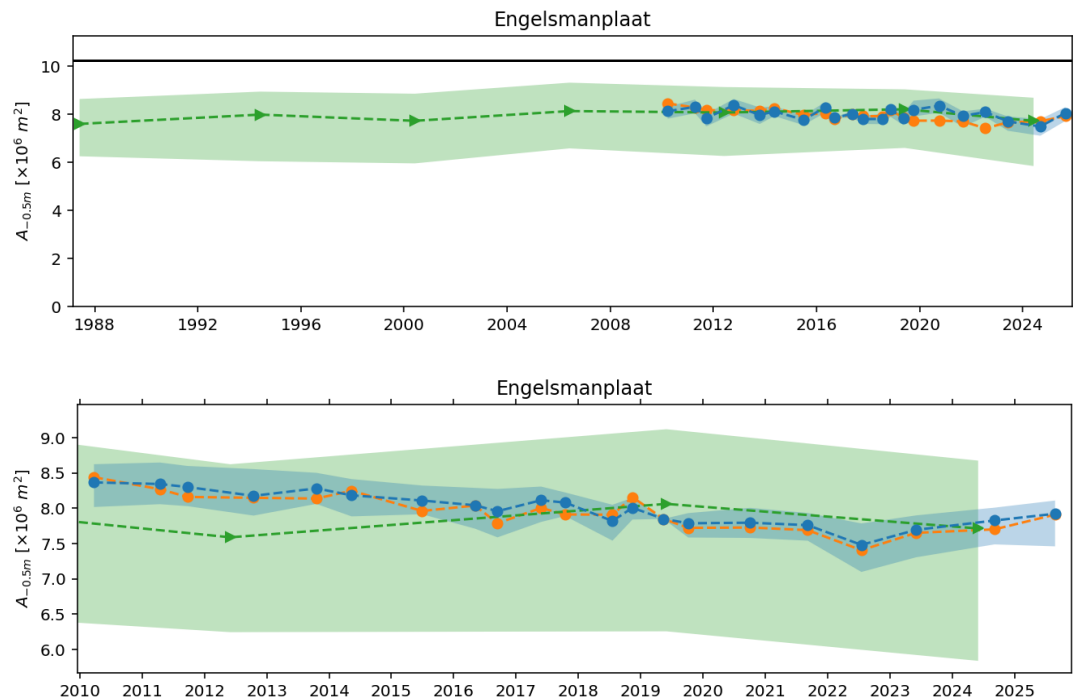
De Vaklodingen data voor het Pinkegat maken duidelijk dat dalende trends in plaatareaal, zoals geobserveerd in de LiDAR data, niet uitzonderlijk zijn. In de periode tussen 1994 en 2006 suggereren de Vaklodingen een gemiddelde daling in plaatareaal van $-0,33 \text{ km}^2$. Voor de kortere periode tussen 2000 en 2006 is dit zelfs $-0,50 \text{ km}^2$ (deze dalingen zijn groter dan trends in de LiDAR observaties, Appendix C.2). Het laat zien dat observaties van dalend plaatareaal op de tijdschaal van een decennium niet uitzonderlijk zijn. De Vaklodingen data laten ook zien dat deze dalingen weer worden gecompenseerd door stijgingen in plaatareaal in een andere periode. De schommelingen in plaatareaal uit de Vaklodingen liggen binnen de meetnauwkeurigheid, maar zijn mogelijk ook beïnvloed door natuurlijke morfodynamiek. Zo is het geulsysteem van het Pinkegat dynamisch en herhalen zich gedragspatronen (Figuur 3-11) (Elias & Oost, 2019, Elias en De Wilde, 2025). Zowel de LiDAR data als ook de Vaklodingen geven geen aanwijzingen op effecten van diepe bodemdaling op plaatareaal in het Friesche Zeegat.



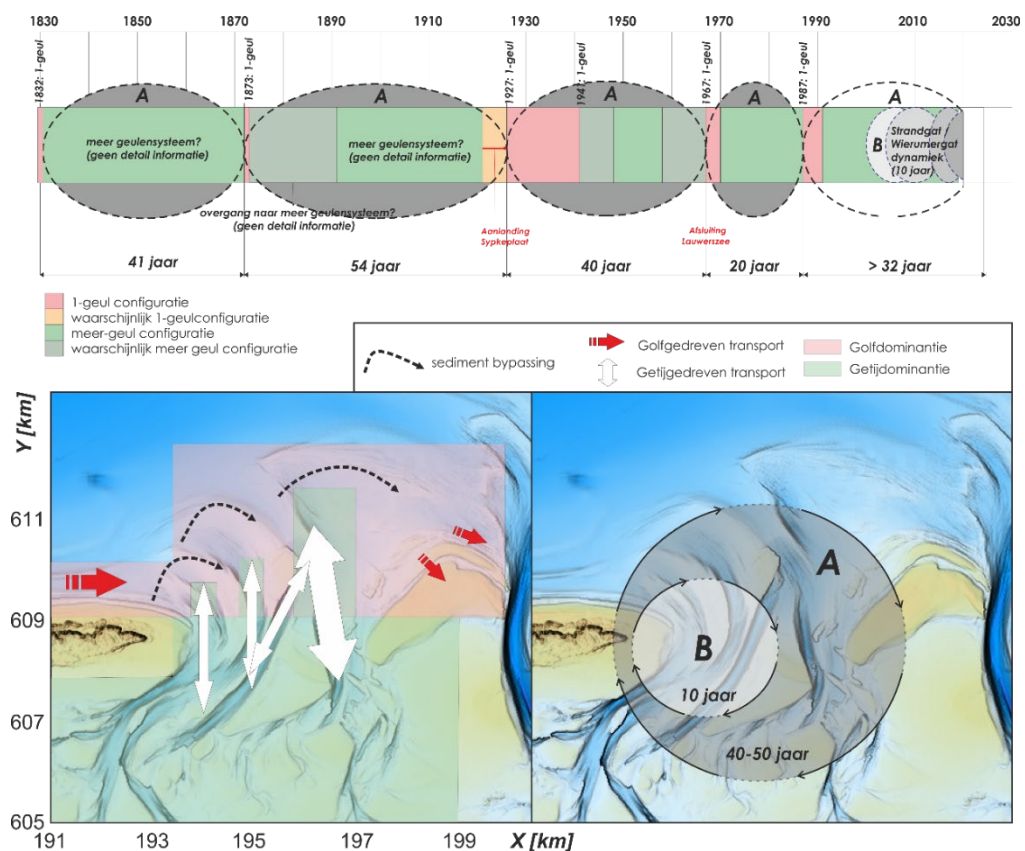
Figuur 3-8 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0,5 m voor het Pinkegat kombergingsgebied tussen Vaklodgingen (groen $\dashrightarrow$), de originele NAM LiDAR data (oranje, $\dashrightarrow$), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, $\dashrightarrow$). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van de controlepolygoon (boven). De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de LiDAR correctie, de groene onzekerheidsband toont de 20 cm onzekerheidsmarge van de Vaklodgingen. Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).



Figuur 3-9 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0,5 m voor het Zoutkamperlaag kombergingsgebied tussen Vaklodgingen (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 20 cm onzekerheidsmarge van de Vaklodgingen. Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).



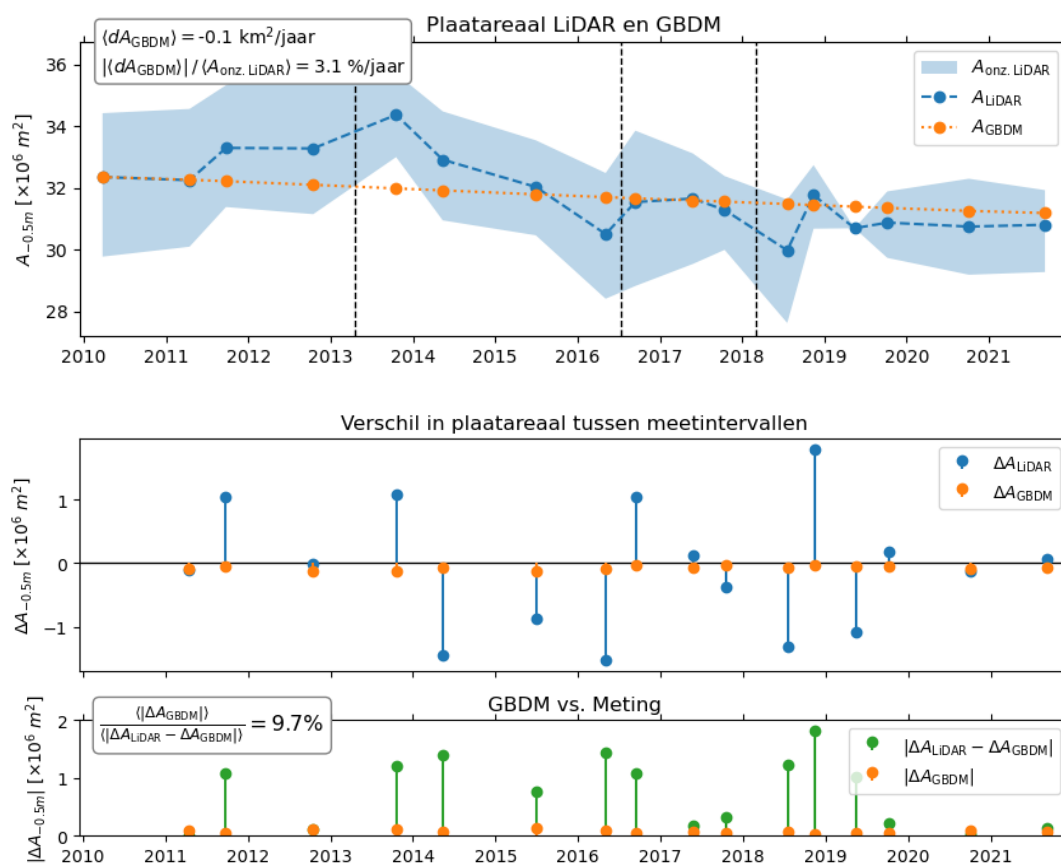
Figuur 3-10 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0,5 m voor de Engelsmanplaat. Vaklodingen (groen - $\rightarrow$), de originele NAM LiDAR data (oranje, $\bullet$), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, $\bullet$). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van de controlepolygoon (boven). De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de LiDAR correctie, de groene onzekerheidsband toont de 20 cm onzekerheidsmarge van de Vaklodingen. Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).



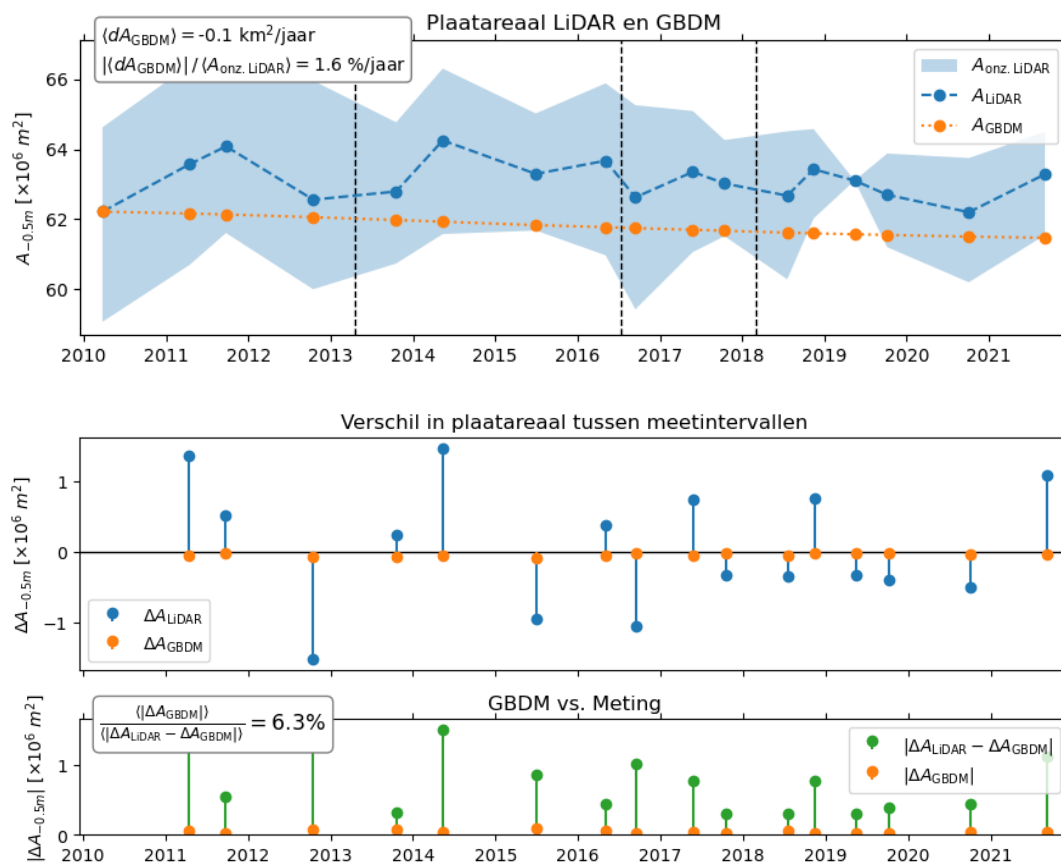
Figuur 3-11 Een conceptuele weergave van het morfologische gedrag van het Pinkegat. Door een schematische tijdlijn van (A) het ontstaan van een één-geul systeem met een herhalingsperiode van 40-50 jaar en (B) de kleinschalige (ebgeul) dynamiek van Strandgat en Wierumergat met een herhalingsperiode rond de 10 jaar (bron: Elias en Oost, 2021).

Diepe bodemdaling en LiDAR observaties volgens berekeningen van Van der Vegt en Van der Lugt (2022)

Een eenduidig bodemdalingssignaal in het geobserveerde plaatareaal komt niet naar voren uit de LiDAR dataset. Van der Vegt en Van der Lugt (2022) lieten zien dat ook berekeningen van geodetische bodemdaling een verwaarloosbare invloed hebben ten opzichte van de natuurlijke morfodynamiek; zowel ten opzichte van ontwikkelingen in plaatareaal als ook ten opzichte van sedimentvolumes van het hele bekken. Sedimentvolumes berekend uit vaklodingen lieten zelfs een tegenovergesteld beeld zien waarin sedimentvolumes toenamen in plaats van afnamen. Het is daarom niet duidelijk of bodemdaling überhaupt invloed heeft op de wadplaten in het Friesche Zeegat. Om in deze rapportage desondanks een schatting te kunnen geven op welke tijdschaal een bodemdalingssignaal mogelijk significant zou kunnen worden in de plaatareaal ontwikkelingen uit LiDAR, zijn de berekeningen van Van der Vegt en Van der Lugt (2022) gebruikt. De berekeningen bestaan voor de periode 2010-2021. Gezien de grote variaties in plaatareaal op lokale schaal door natuurlijke geul verplaatsingen, ligt de focus op het integrale effect van geodetische bodemdaling op kombergingsschaal.



Figuur 3-12 Verandering plaatareaal Pinkegat geobserveerd met LiDAR (blauw) en berekend uit geodetisch bodemdaling model, GBDM, (oranje) volgens Van der Vegt en Van der Lugt (2022) voor de desbetreffende periode 2010-2021. Bovenste paneel: geeft verandering plaatareaal weer per meting analoog met Figuur 3 2, onder vermelding van de tijdsgemiddelde areaalverandering volgens het geodetisch bodemdaling model, $\langle dA_{GBDM} \rangle$ en de absolute grootte daarvan [...] ten opzichte van de LiDAR meetonzekerheid $A_{onz. LiDAR}$. Middelste paneel: geeft het verschil in areaal ΔA weer tussen opeenvolgende meettijdstippen voor LiDAR observatie en GBDM. Onderste paneel: geeft de relatieve grootte weer van interval verandering volgens GBDM, $|\Delta A_{GBDM}|$ (oranje) ten opzichte van het verschil met LiDAR observatie, $|\Delta A_{LiDAR} - \Delta A_{GBDM}|$ (groen), onder vernoeming van de tijdsgemiddelde waarde.



Figuur 3-13 Verandering plaatareaal Zoutkamperlaag geobserveerd met LiDAR (blauw) en berekend uit geodetisch bodem daling model, GBDM, (oranje) volgens Van der Vegt en Van der Lugt (2022) voor de desbetreffende periode 2010-2021. Bovenste paneel: geeft verandering plaatareaal weer per meting analoog met Figuur 3 2, onder vermelding van de tijdsgemiddelde areaalverandering volgens het geodetisch bodemdaling model, $\langle dA_{GBDM} \rangle$ en de absolute grootte daarvan $| \dots |$ ten opzichte van de LiDAR meetonzekerheid $A_{onz. LiDAR}$. Middelste paneel: geeft het verschil in areaal ΔA weer tussen opeenvolgende meettijdstippen voor LiDAR observatie en GBDM. Onderste paneel: geeft de relatieve grootte weer van interval verandering volgens GBDM, $| \Delta A_{GBDM} |$ (oranje) ten opzichte van het verschil met LiDAR observatie, $| \Delta A_{LiDAR} - \Delta A_{GBDM} |$ (groen), onder vernoeming van de tijdsgemiddelde waarde.

De berekende jaarlijkse bodemdaling heeft een grootte van 3,1%/1,6% (Pinkegat/Zoutkamperlaag) van de onzekerheidsmarge van de LiDAR metingen (zie ook bovenste paneel Figuur 3-12 en Figuur 3-13). Zelfs al zou de bodemdaling onverminderd doorgaan, zou het zonder natuurlijke plaatareaal variatie meerdere decennia duren om meetonzekerheden te doorbreken. Echter een signaal zonder natuurlijke plaatareaal variatie is onrealistisch.

In werkelijkheid vinden er grote natuurlijke veranderingen in plaatareaal plaats en deze zijn veel groter dan de eventuele afname door bodemdaling. Een berekende verandering in wadplatooppervlak door bodemdaling is gemiddeld 6/10% (Pinkegat/Zoutkamperlaag) van de grootte van geobserveerde areaal fluctuaties (zie onderste paneel Figuur 3-12 en Figuur 3-13). Dat laat zien dat de grootte van het signaal relatief tot geobserveerde fluctuaties al beperkt is. Maar daarnaast wordt voor de opeenvolgende LiDAR metingen in de helft van de gevallen een stijging van areaal waargenomen (middelste paneel Figuur 3-12 en Figuur 3-13) terwijl bodemdaling een gestage afname voorziet, wat verder verduidelijkt dat bodemdaling geen significante factor in de geobserveerde plaatverandering kan zijn. Al lijken middellange termijn (10-15 jaar) trends in observaties tussentijds overeen te stemmen met berekende bodemdaling (e.g., bovenste paneel Figuur 3-12) is dat geen teken van een causaal verband (cf. Figuur 3-4).

Vanuit een statistisch oogpunt moeten de areaal variaties op korte termijn (jaar) en middellange termijn (10-20 jaar) duidelijk te onderscheiden zijn ten opzichte van de lange termijn (20+ jaar). Bijvoorbeeld moet de meetcyclus lang genoeg zijn om mogelijke morfodynamiek veroorzaakt door de 18.6 cyclus te kunnen onderscheiden. Vanuit de benodigde signaal verwerking moeten de metingen dan gebruikelijk minstens twee cycli bevatten, oftewel 37+ jaar, onafhankelijk van het komberginsgebied. Het resterende lange termijn signaal kan dan worden onderverdeeld in verandering door lange termijn systeem cycli (Figuur 3-11), zeespiegelstijging (zie ook Gawehn, 2025) en verandering door bodemdaling.

De invloed van systeem cycli op plaatareaal in LiDAR metingen kan mogelijk worden ingeschat door deze te vergelijken met bodemveranderingen over het gehele diepte profiel in lange termijn meetreeksen van Vaklodingen. Het onderscheid tussen zeespiegelstijging en bodemdaling kan worden ingeschat door vergelijking van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Beide zijn onderhevig aan eenzelfde zeespiegelstijging, maar vooral het Pinkegat ondervindt bodemdaling.

Er bestaat ook nog een scenario waarbij het systeem de bodemdaling kan compenseren door sediment van buiten de komberginsgebieden te importeren. In dat geval kunnen effecten van bodemdaling op de wadplaten niet worden aangetoond.

Op basis van de huidige meetperiode is het niet mogelijk om natuurlijke areaalontwikkeling van contributies door bodemdaling te onderscheiden. Onder de hypothese dat de huidige LiDAR meetreeksen 2010-2025 een valide bandbreedte geeft voor areaal veranderingen op middellange termijn (10-20 jaar) en zelfs de tijdschaal van systeem cycli (20-50 jaar) moet de LiDAR tijdsreeks minstens 40+ jaar lang zijn om met de huidige berekende bodemdaling door de grootste geobserveerde uitwijking plus onzekerheid te breken (zie Figuur 3-4, maximale areaal uitwijkingen Pinkegat plus 95% onzekerheidsinterval ten opzichte van 2010 zijn $\pm 4\text{-}5 \text{ km}^2$). De benodigde tijdsduur om dergelijke uitwijkingen te doorbreken is dan $4\text{-}5 \text{ km}^2/0,1 \text{ km}^2/\text{jaar} = 40\text{+ jaar}$.

Op deelgebied niveau kan de meetreeks mogelijk korter zijn om bodemdaling te herkennen. Bij Ameland Zuid maakt de berekende jaarlijkse bodemdaling 5,2% uit van de onzekerheidsmarge en is daarmee tien keer groter dan vergelijkbare gebieden bij Schiermonnikoog Zuid. Dat komt omdat berekende bodemdaling ten zuiden van Schiermonnikoog nihil is. Op basis van de huidige meetreeksen 2010-2025 kan echter niet worden gesteld dat Ameland Zuid sneller daalt dan platen bij Schiermonnikoog Zuid. Een schatting van de benodigde observatieperiode voor de individuele plaat is moeilijk: al vallen trends sterker buiten de meetonzekerheid en vallen verschillen tussen vergelijkbare gebieden daardoor ook sneller op, zullen de veranderingen toch altijd moeten worden geplaatst in de context van bewegingen op grotere systeem schaal.

Jaarlijkse LiDAR metingen zijn belangrijk om mogelijke effecten door bodemdaling te kunnen vaststellen. Het biedt statistische zekerheid dat morfologische veranderingen als gevolg van krachten op korte termijn (door meteorologisch omstandigheden, zie Gawehn, 2025) en middellange termijn (bijvoorbeeld 18,6 jaar getijdencyclus) kunnen worden gescheiden van effecten op langere tijdschalen zoals geulverplaatsing, zeespiegelstijging en bodemdaling.

3.6 Conclusies areaalontwikkeling

Het gerapporteerde plaatareaal in de Zoutkamperlaag is constanter dan in het Pinkegat, maar beide komberginsgebieden vertonen geen significante trends. Voor het Pinkegat lijkt na 2010 een licht dalende lineaire trend in het signaal te zitten, voor de periode 2016 tot 2025 is het areaal stabiel en recent neemt het zelfs toe (zie ook Appendix C.2). De deelgebiedsanalyse toont aan dat (tijdelijke) dalingen met name komen door kleiner wordende platen in de centraal gelegen gebieden, Pinkegat west-1 (B, Appendix C.1), Pinkegat oost-2 (F, Figuur 3-4) en het westelijke deel van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5)

waar een verbreding en uitbochting van de geul optreedt. Echter lijkt dit proces de recente 2-3 jaar te stoppen. De recente LiDAR opnames van 2023-2025 laten een toename van plaatareaal zien van zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag. Volgens de LiDAR meting van 2025 is het plaatareaal in het Pinkegat mogelijk zelfs iets groter dan in het begin van de meetreeks in 2010. Of dit een tijdelijke fluctuatie is of een structurele trend, zal blijken naar mate de meetreeks langer is geworden want de verschillen zijn klein ten opzichte van de 95% onzekerheidsmarge in de gecorrigeerde bodemhoogte.

Bij directe doorvertaling van berekende geodetische bodemdaling naar veranderingen in plaatoppervlak blijkt dat de LiDAR metingen te kort zijn om effecten van bodemdaling te herkennen. De berekende jaarlijkse bodemdaling maakt op kombergingsschaal maar 1-3% uit van de LiDAR onzekerheidsmarge in plaatareaal. Er is een meetreeks van 40+ jaar nodig om bodemdaling te kunnen detecteren tussen andere factoren zoals korte termijn fluctuaties (meteorologisch), middellange termijn variaties (bijv. 18,6 jaar getijdecyclus) en lange termijn veranderingen (systeem cycli, zeespiegelstijging). Voor een individueel gebied, zoals Ameland Zuid, kan de meetreeks statistisch gezien mogelijk korter zijn op basis van berekende jaarlijkse bodemdaling, welke hier met 5,2% een groter deel uitmaakt van de onzekerheidsmarge ten opzichte van het hele kombergingsgebied. Ook ten opzichte van vergelijkbare gebieden bij Schiermonnikoog zuid, welke volgens het geodetisch bodem daling model nauwelijks onderhevig zijn aan bodemdaling. Echter moeten deelgebied verandering ook dan worden geplaatst in de context van morfologische veranderingen op grotere (kombergings-) schaal.

Wanneer de LiDAR metingen tussen 2010-2025 worden geplaatst in de context van lange termijn ontwikkelingen in de Vaklodingen tussen 1987-2024, 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. Een eventuele trend op kombergingsniveau is zo klein is dat het totale plaatareaal zich niet buiten de onzekerheidsband ontwikkelt. Er vindt geen significante aangroei van het totale plaatareaal plaats, en ook geen significante afname.

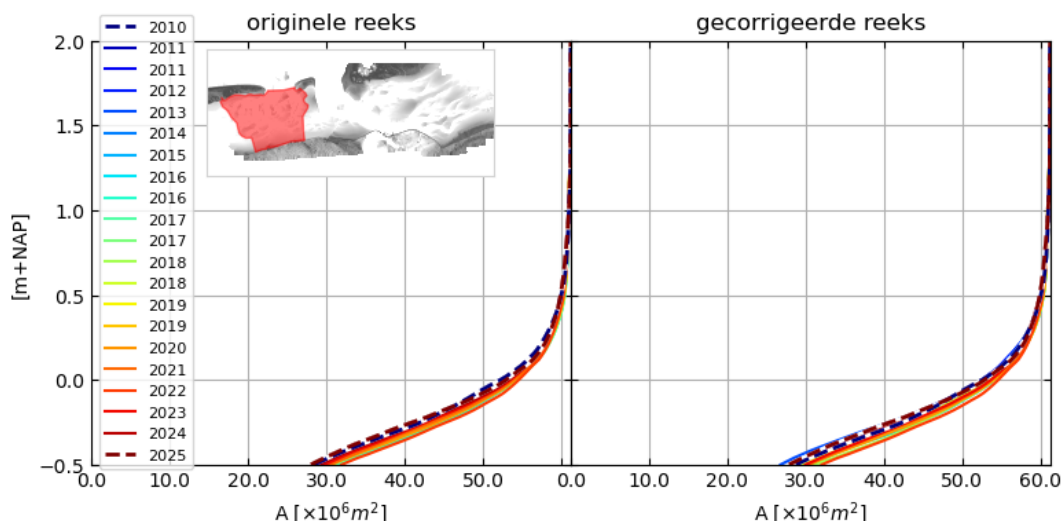
4 Analyse ontwikkeling plaathoogte

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 individuele platen/deelgebieden. Daarnaast wordt een aantal dwarsdoorsneden 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.

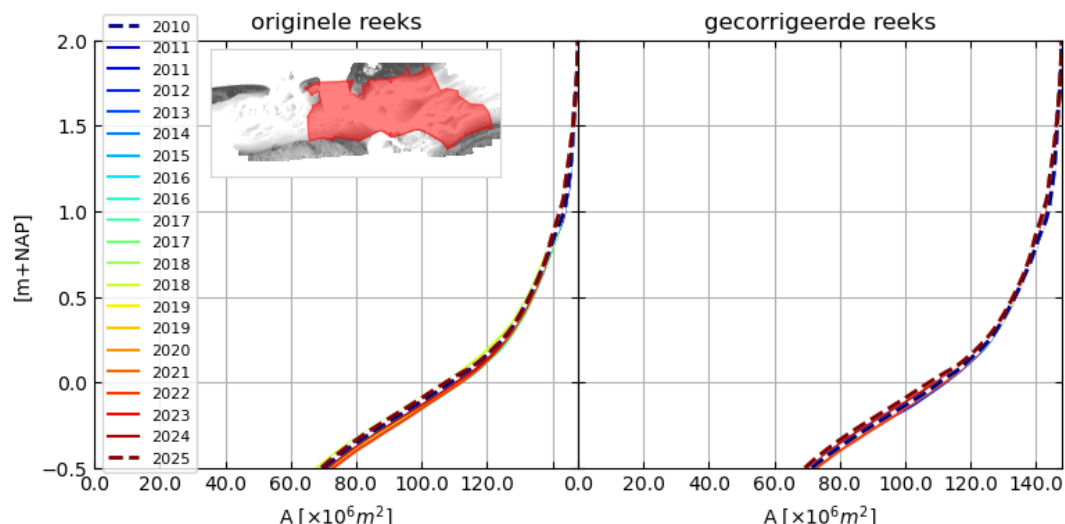
4.1 Hypsometrie kombergingsgebieden

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 tussentijdse afname is binnen het Pinkegat en Zoutkamperlaag echter gering. De hypsometriën van 2025 liggen zelfs iets boven die van 2010 voor zowel het Pinkegat als ook de Zoutkamperlaag (zie gestippelde rode en blauwe lijnen in Figuur 4-1 rechts en Figuur 4-2 rechts).



Figuur 4-1 Hypsometrische curven voor het Pinkegat kombergingsgebied. Op de horizontale as is het wateroppervlak horende bij een hoogte op de verticale as geplotted. 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).

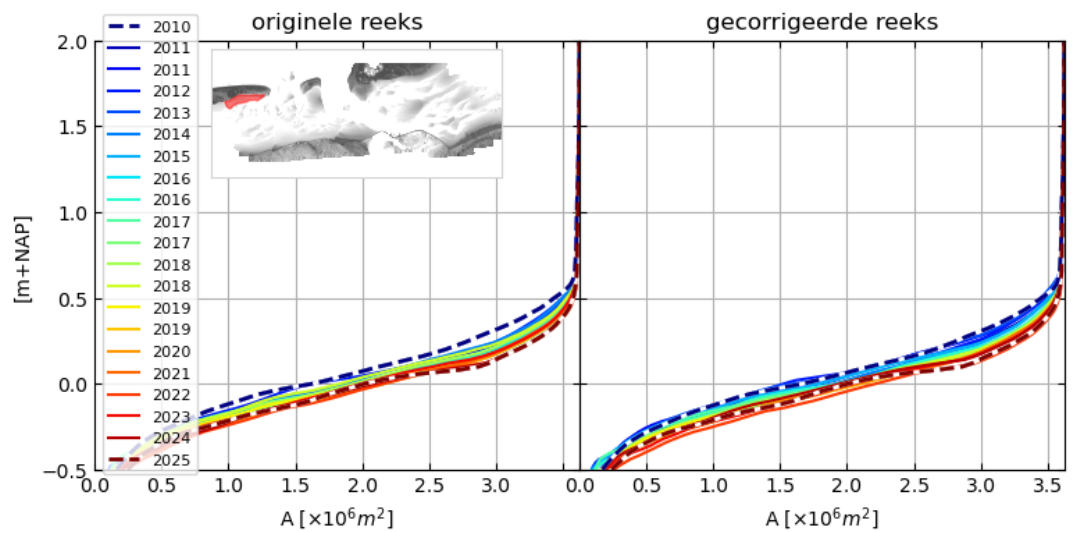
4.2 Hypsometrie individuele platen

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).

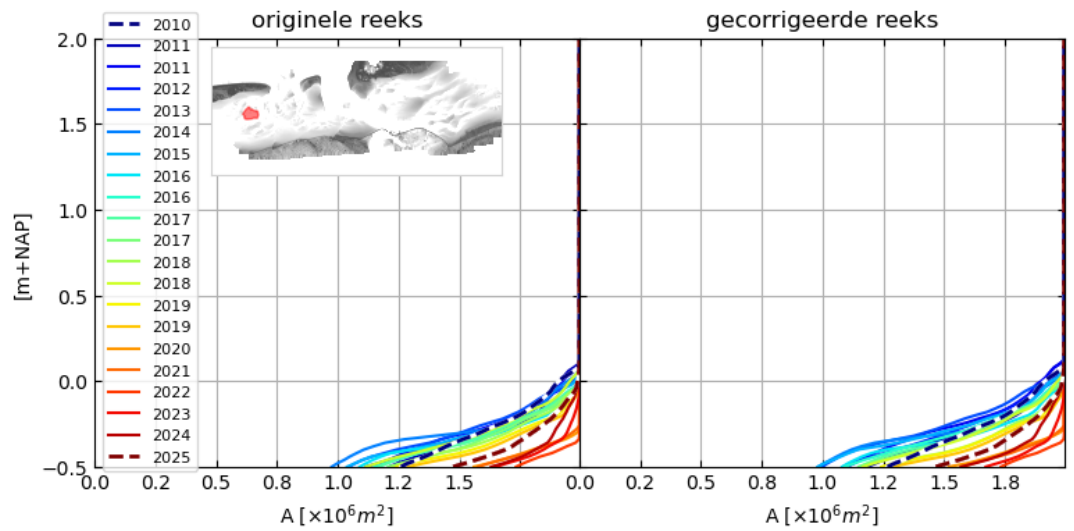
Uit de areaalontwikkeling van platen boven NAP-0,5m leiden we af dat de bodemdaling mogelijk invloed had op de areaalontwikkeling in het gebied ten zuiden van Ameland-oost (A). De hypsometrische curven laten zien dat bij iedere te kiezen referentiehoogte in gebied A het plaatareaal vrij monotoon afneemt. Hoger in de verticaal betekent bij deze platen ook dichterbij de kwelder gelegen en daarmee ook dichterbij het midden van de bodemdalingskom. Sinds 2020 lijkt het plaatareaal in deelgebied A te stagneren.

De drie meest westelijke platen, pal tegen het wantij gelegen (B, C, D), liggen voornamelijk onder NAP+0m en laten een verlaging (B), ophoging (C) of een vrij stabiele ontwikkeling (D) zien. Het areaal van deze platen verandert over de hele tijdsduur van de dataset. Het areaal van de meest noordelijke van deze platen (B) was tot en met 2022 door een hoogte afname van orde -0,4 m tot een derde van het 2010 oppervlak gekrompen. Na deze krimp is de plaat weer begonnen te groeien en is door een hoogte toename van orde +0,2 m inmiddels weer op twee derde van het 2010 oppervlak gekrompen. De centrale plaat (C) is in de monitoringsperiode duidelijk gegroeid: een hoogtetoename van orde 0,3 m heeft ervoor gezorgd dat deze plaat is verdubbeld in oppervlak (contour NAP-0, 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) is over het algemeen beneden ca. NAP-0,1m in oppervlakte toegenomen, terwijl daarboven de oppervlakte en hoogte afnam. De plaat spreidt uit: vlakt af en wordt groter. 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.

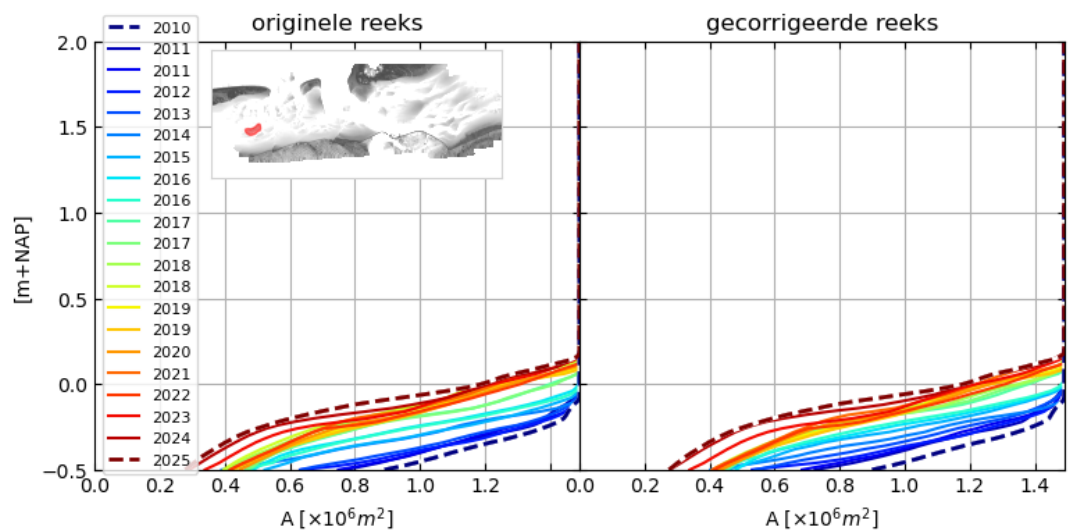
A: Ameland zuidoost



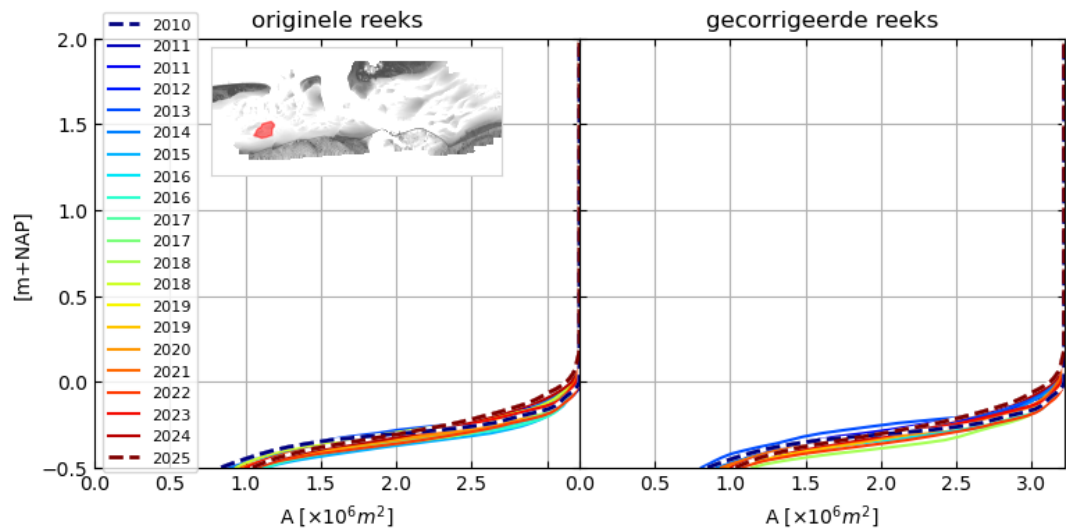
B: Pinkegat west-1



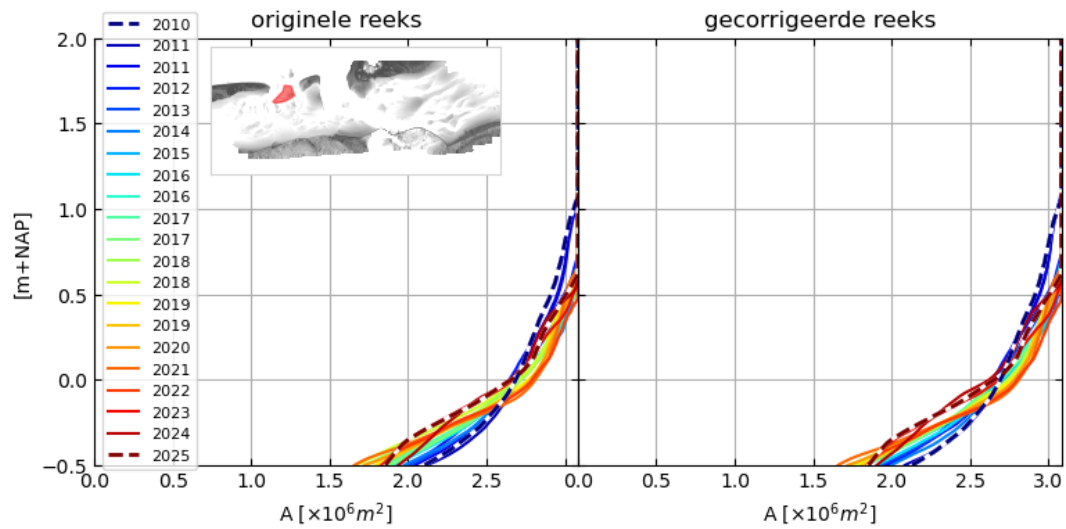
C: Pinkegat west-2



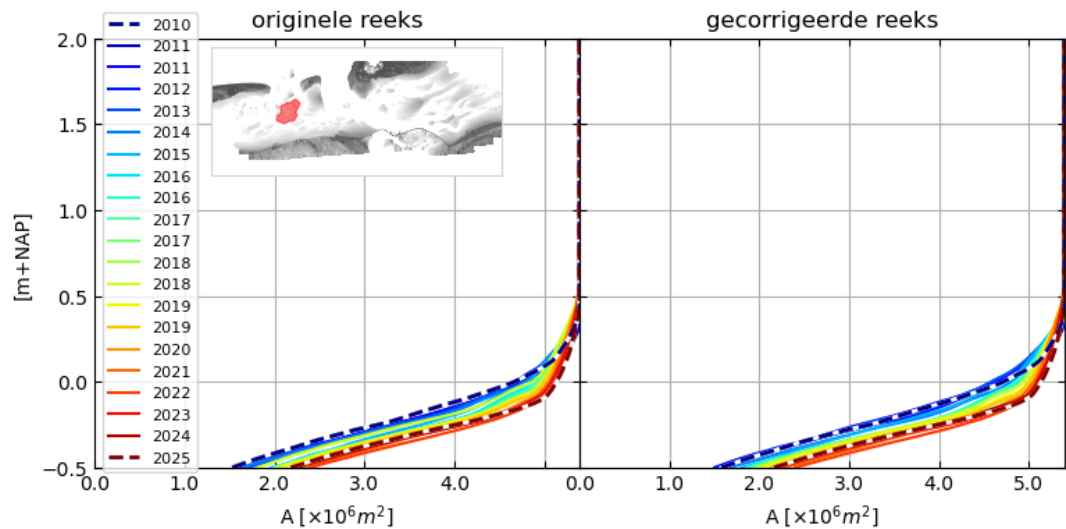
D: Pinkegat west-3



E: Pinkegat oost-1



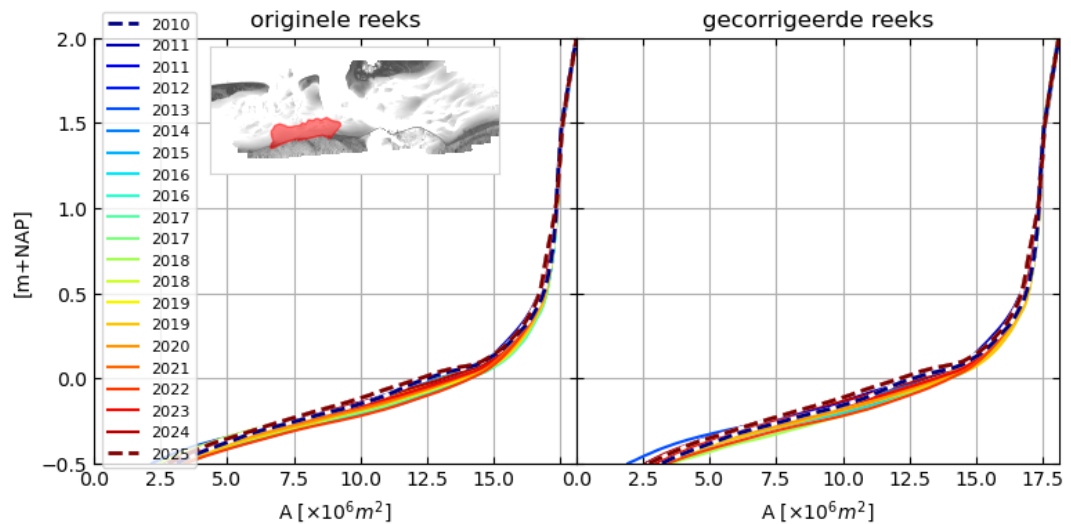
F: Pinkegat oost-2



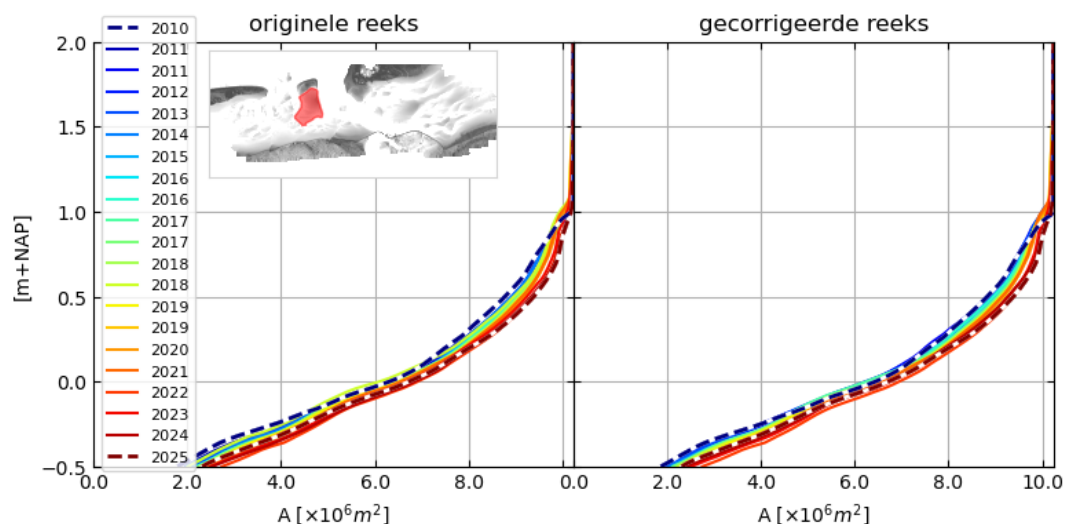
Figuur 4-3 Hypsometrische curves voor de platen van het Pinkegat kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij een hoogte op de verticale as. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0,5 m. 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.

G: Wierumerwad



H: Engelsmanplaat

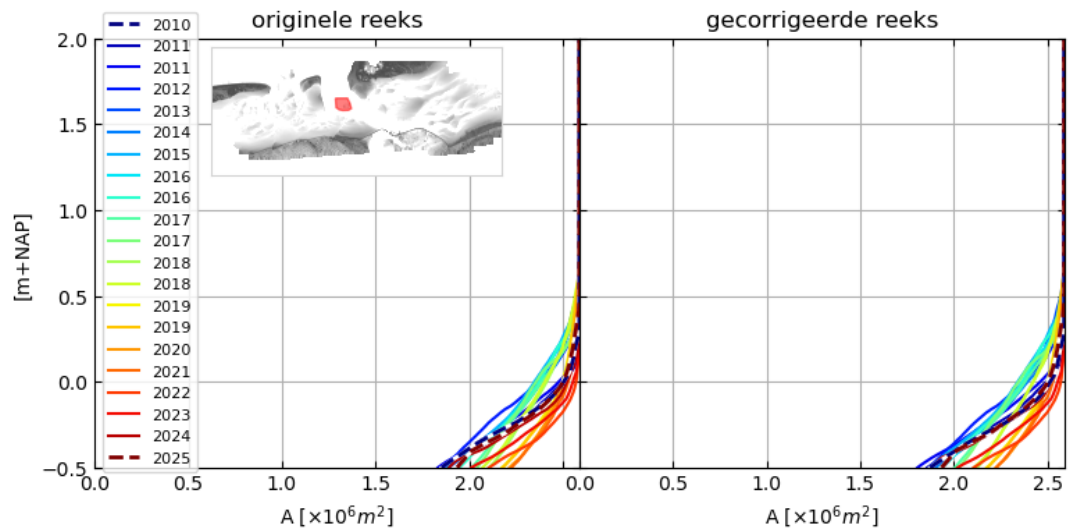


Figuur 4-4 Hypsometrische curven voor de platen tussen de Pinkegat en Zoutkamperlaag kombergingsgebieden. Op de horizontale as is het wateroppervlak horende bij een hoogte op de verticale as geplot. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus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

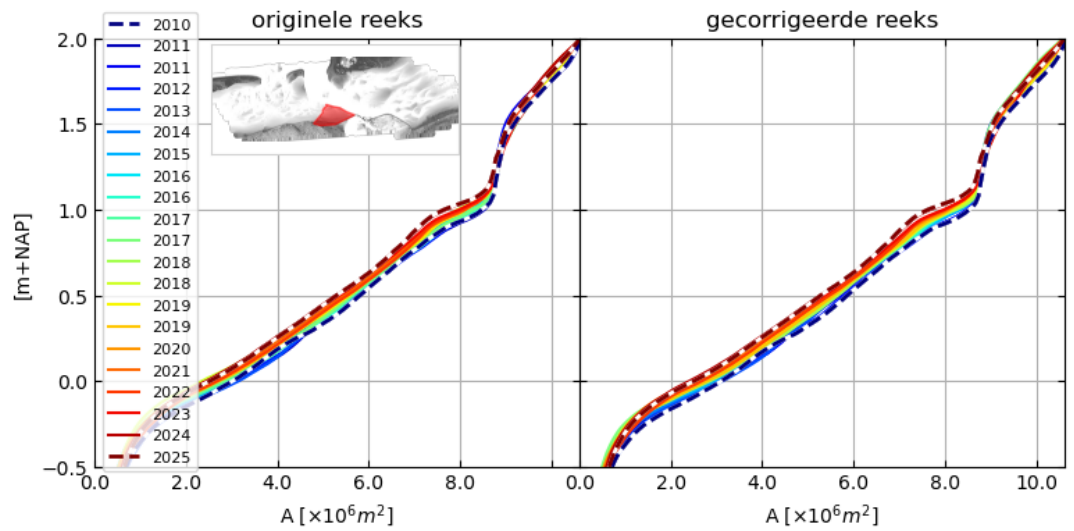
Als laatste beschouwen we hier ook de platen binnen het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (Figuur 4-5). Individuele platen binnen dit gebied vertonen wisselend gedrag. Bijvoorbeeld voor de Kuipersplaat (I) is het signaal van plaatveranderingen veel sterker dan die van het geaggregeerde kombergingsgebied. 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 -0,1 m is toegenomen, de plaat afvlakt en in 2025 weer nagenoeg de hypsometrie van 2010 heeft. De plaat is een boegbeeld voor de sterke natuurlijke morfodynamiek, want in de 15 jaar sinds de LiDAR meting van 2010 is de plaathoogte eerst toegenomen, dan tussentijds met orde -0,3 m afgenomen en dan weer toegenomen tot de oorspronkelijke staat van 2010. Het plaatareaal is in die tussentijd ook tijdelijk gehalveerd. De platen tussen Eilanderbult en Paesens (J) vertonen een lichte groei in hoogte tussen NAP-0,5m en NAP+1,2m. In tegenstelling hiermee, vertoont Schiermonnikoog zuid-1 (K) groei in hoogte boven NAP+1m en een afname in hoogte daaronder. Grote Siege Zuid (N) en Zoutkamperlaag zuidoost-1 (Q) zijn stabiel.

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) en het Roode Hoofd (O) 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, Q en R laat de referentievlakcorrectie het signaal van de deelgebieden meer gelijkmatig veranderen.

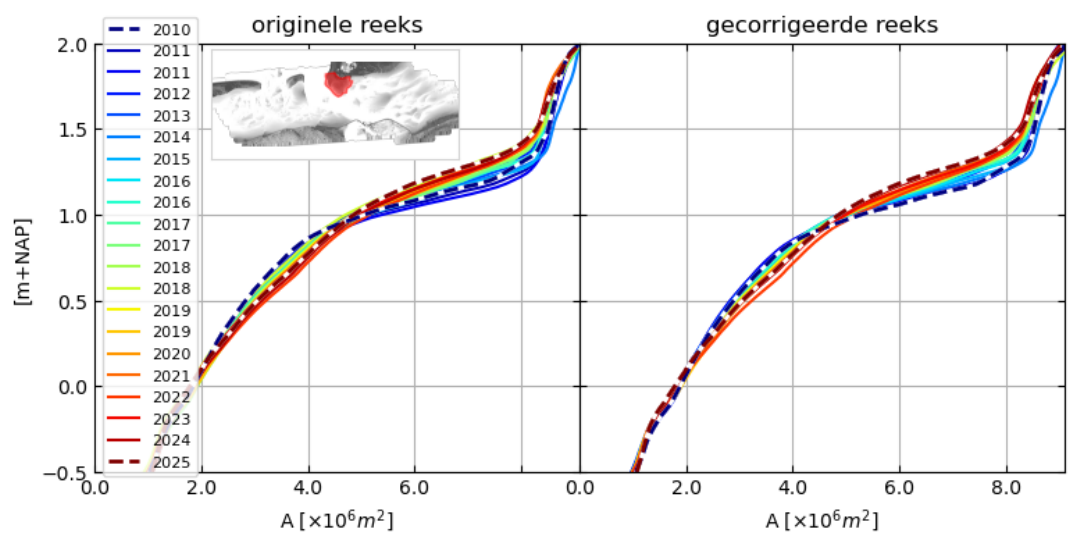
I: Kuipersplaat



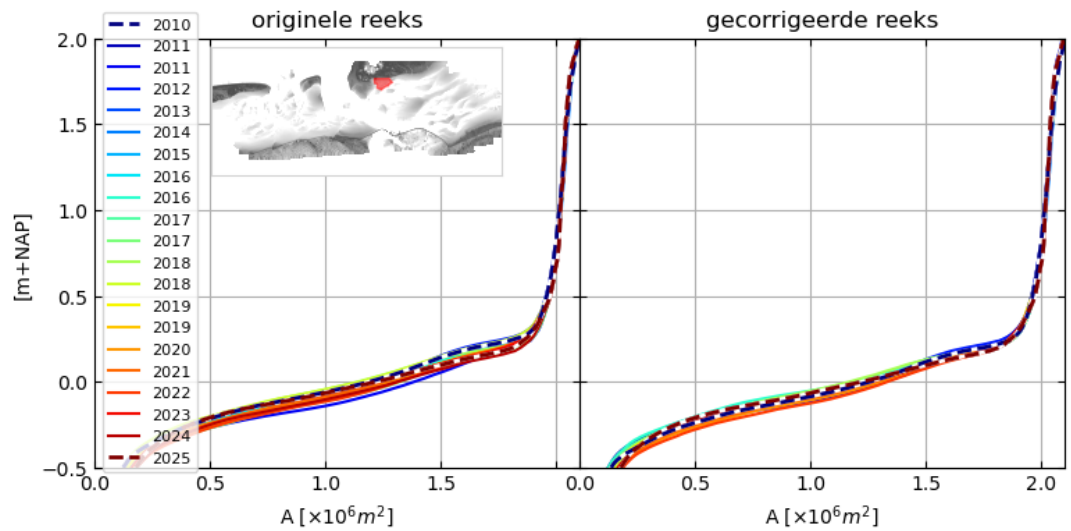
J: Eilanderbult



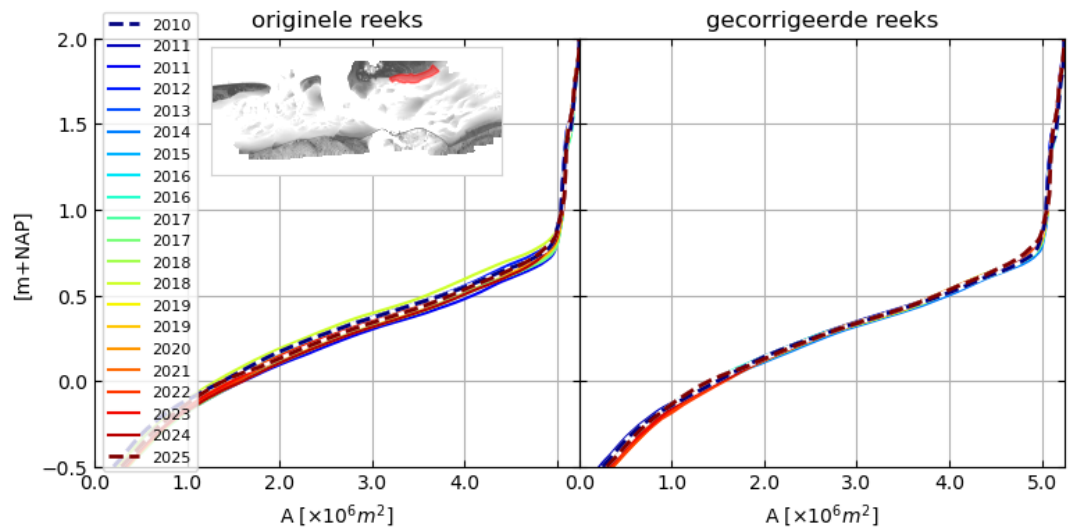
K: Schiermonnikoog zuid-1



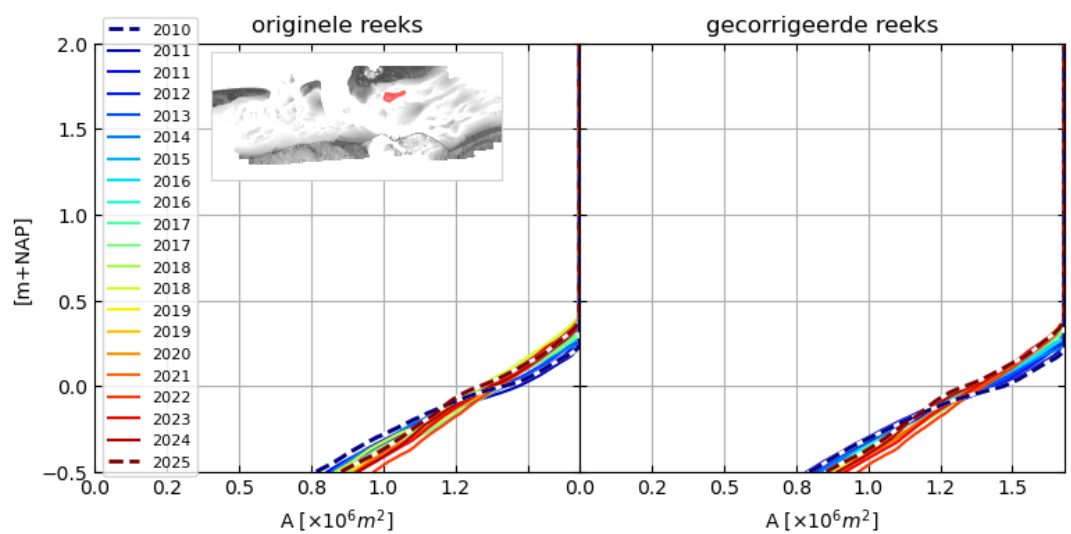
L: Schiermonnikoog zuid-2



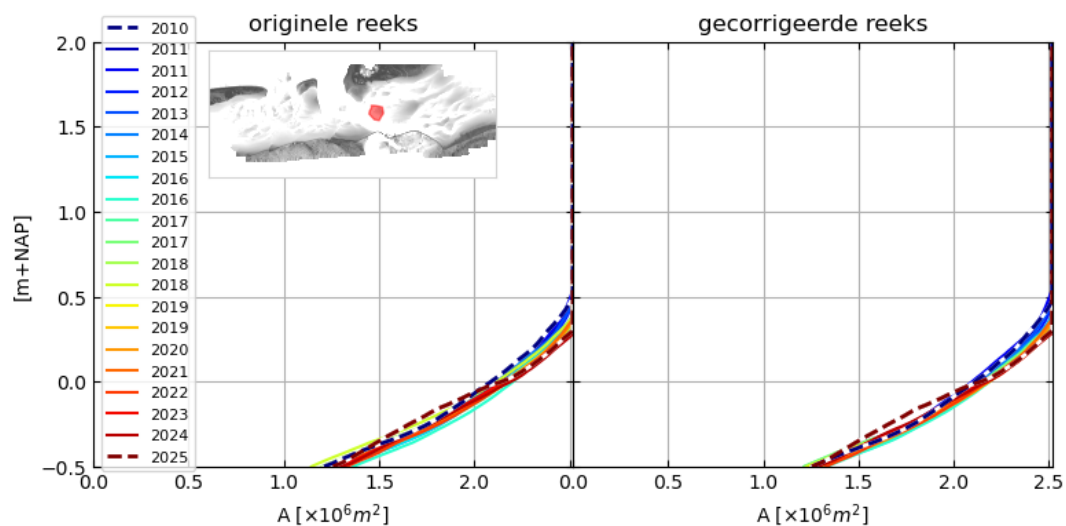
M: Schiermonnikoog zuid-3



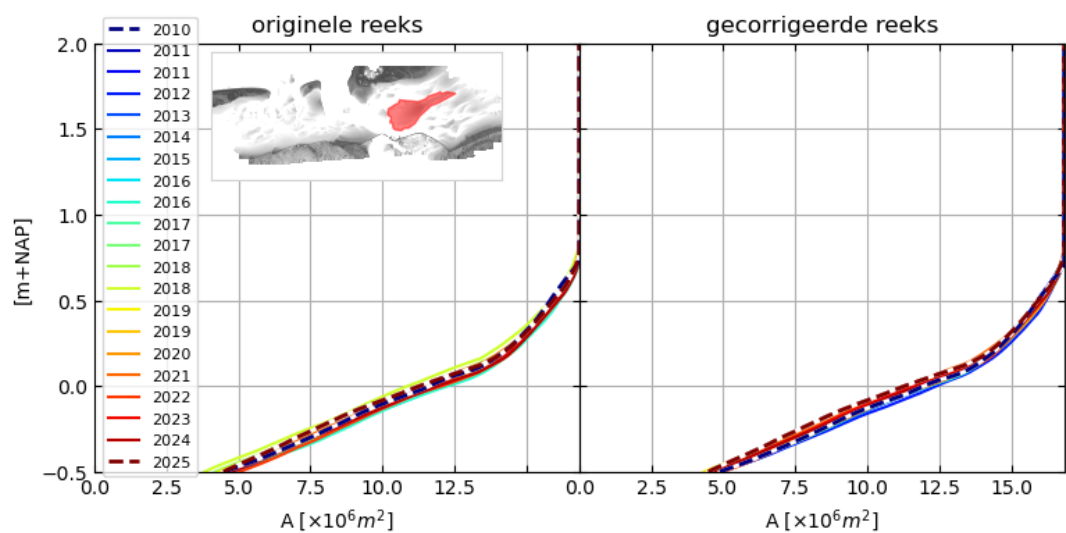
N: Grote Siege zuid



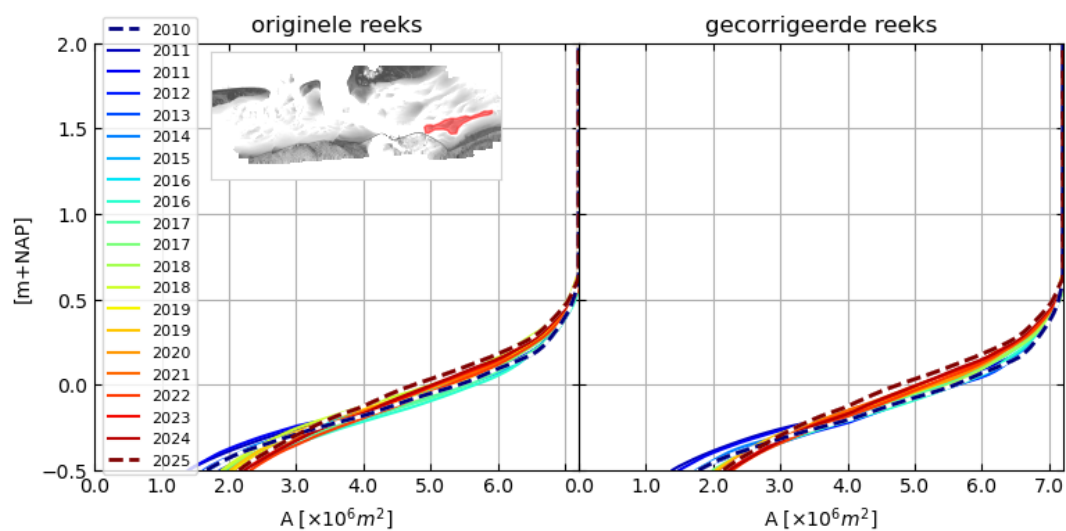
O: Roode Hoofd

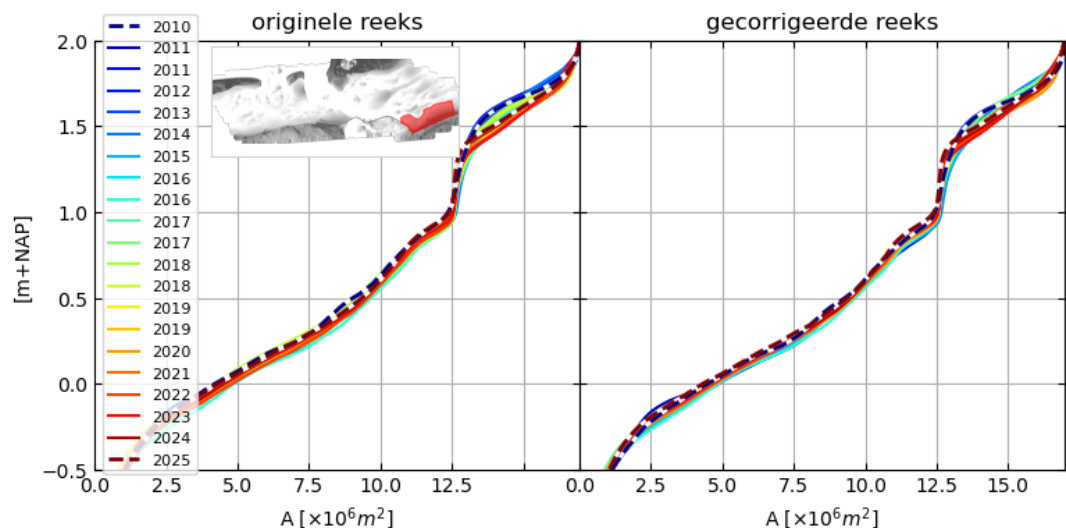


P: Brakzand



Q: Zoutkamperlaag zuidoost-1



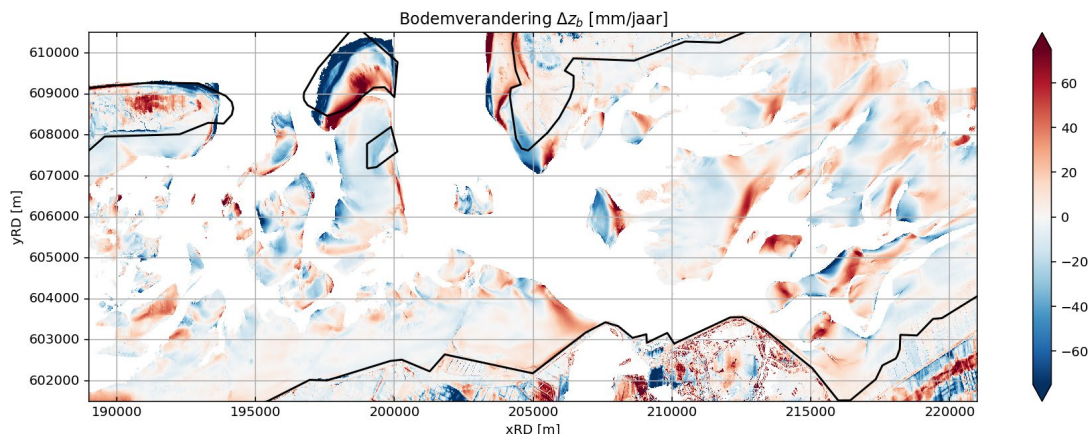


Figuur 4-5 Hypsometrische curven voor de platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij een hoogte op de verticale as. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0,5.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

4.3 Tijdsgebiddelde ontwikkeling

Tijdsgebiddelde 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 geeft een redelijk representatief beeld van de daadwerkelijke veranderingen. Uit eigenfunctie analyse blijkt dat de meeste dynamiek ligt in een bij benadering lineaire mode/verandering (zie ook Gawehn, 2023). Dit wordt ook bevestigd door een projectie van de bodemveranderingen op een lineaire basis. Zowel uit eigenfunctieanalyse als ook uit lineaire projectie van de bodemdata volgt dat 65% van alle energie in lineaire verandering zit. Andere niet-lineaire veranderingen vinden vooral op kortere termijn plaats en beschrijven per mode < 16% van de totale bodemverandering gedurende de afgelopen 15 jaar.

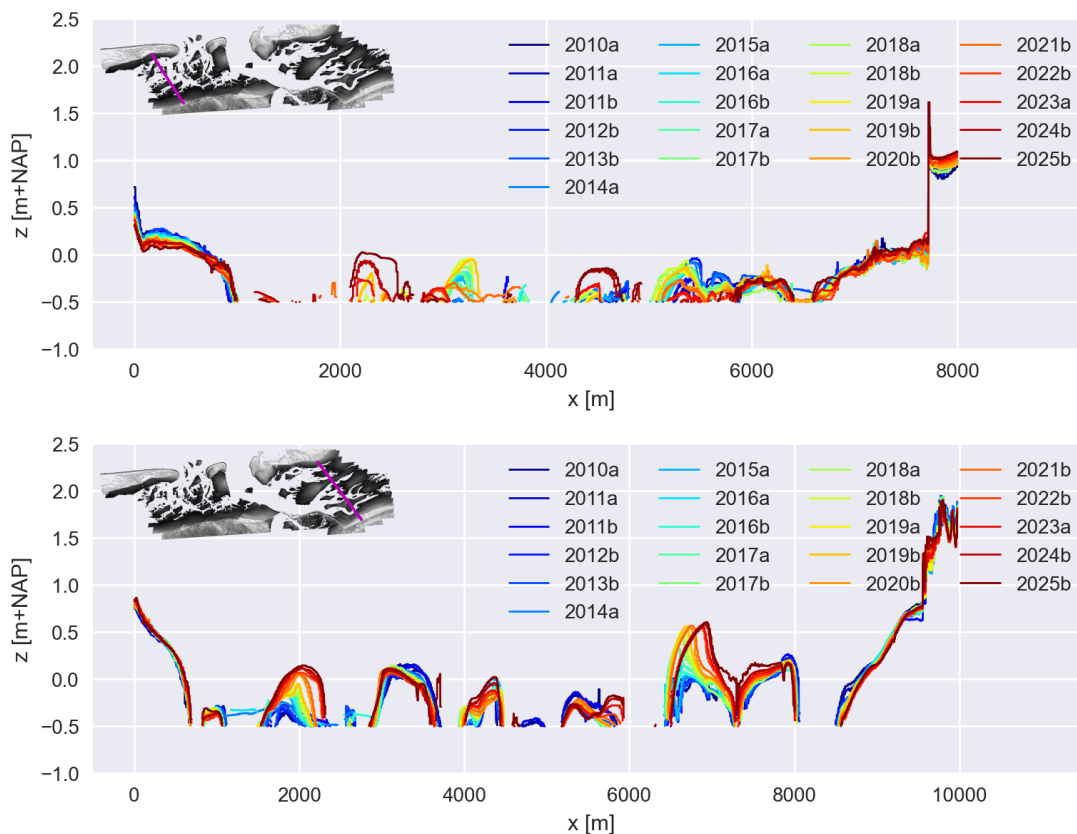
Migratiepatronen domineren het verkregen beeld. De grootste veranderingen zijn de aanlanding van het Rif op de Engelsmanplaat waardoor het Oude Smerig Gat (OSG) verzandt (zie Figuur 1-2 voor benamingen). Er vindt sterke erosie plaats aan de oostzijde van het Binnenplaatgat en het Roode Hoofd migreert sterk oostwaarts. De 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.



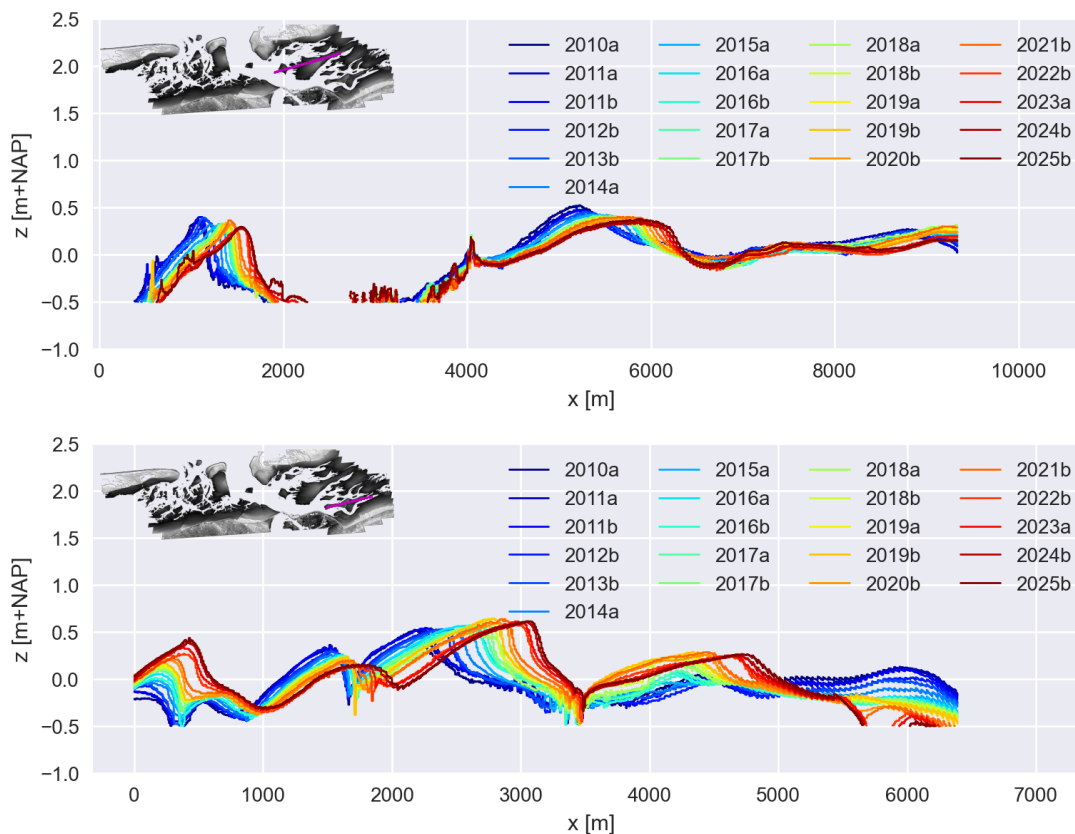
Figuur 4-6 De gemiddelde verandering in bodemhoogte (mm/jaar) zoals berekend per roostercel op basis van de tijdserie 2010-2025 met voorgestelde correctie. Blauwe kleuren geven verlaging weer, rode kleuren sedimentatie. Cellen waar minder dan 8 waarnemingen aanwezig waren in de tijdreeks zijn uitgesloten van de berekening en blijven dus wit (geen data).

4.4 Profielen

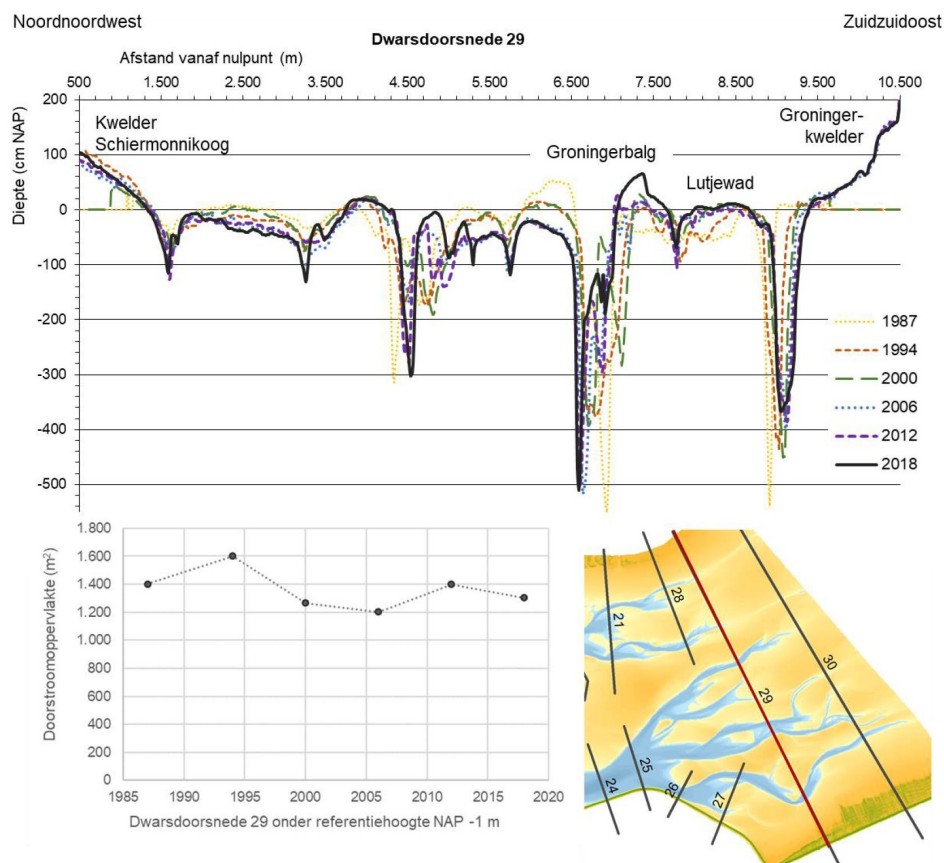
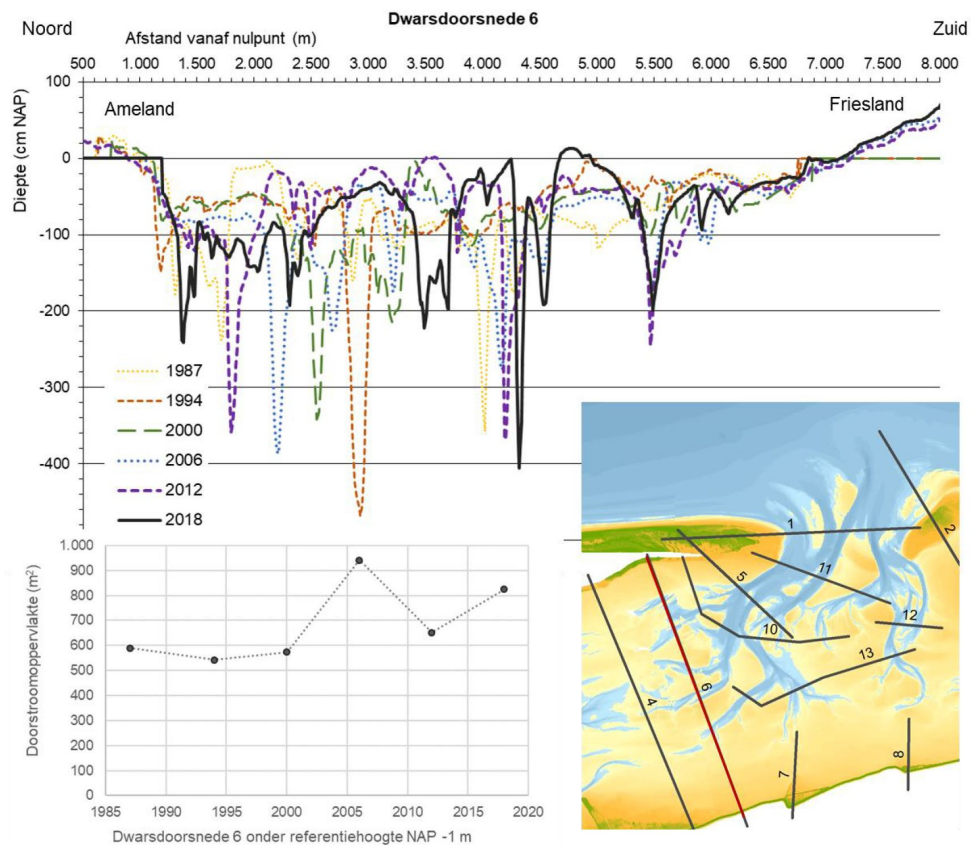
Aan de hand van een aantal profielen verifiëren we conclusies uit de geaggregeerde data. De platen in het westelijk deel van het kombergingsgebied Pinkegat liggen grotendeels lager dan de ondergrens van de LiDAR opnamen (NAP-0,5m, zie Figuur 4-7, bovenste paneel). In het kombergingsgebied Zoutkamperlaag 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 Zoutkamperlaagegebied zijn diep en relatief 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) en ook daarna gaat de verplaatsing door.



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 2025b (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 2025b (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 Vaklodingendataset 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-0,5 m. 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 2010-2025 is de plaathoogte tussen NAP-0,5 m en NAP+0,5 m in het Pinkegat tussentijds licht afgenomen en recent ook weer gegroeid. Zowel de plaathoogte als ook het plaatareaal zijn in 2025 op eenzelfde niveau of zelfs iets hoger dan in 2010. Al vinden de veranderingen plaats 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 0,3 m) en deelgebied C het sterkst omhoog (eveneens orde 0,3 m). 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 (0,1 m). Deelgebied A vertoont ook een gelijkwaardige afname als vergelijkbare deelgebieden in de Zoutkamerplaag (L, M) die niet in de bodemdalingssom zitten. Het geeft aan dat de afname in A gerelateerd is aan natuurlijke morfodynamiek. 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 mogelijk dat verlagingen in plaathoogtes onderdeel uitmaken van dit periodieke gedrag en zo vooral van tijdelijke aard zijn. Bij een overgang van een meergeulen naar een 1-geul systeem in het Pinkegat kan de dynamiek tijdelijk veel groter zijn. Op basis van geobserveerde cycli zou zo'n overgang binnen 10 jaar kunnen plaatsvinden. Afhankelijk van de locatie van een plaat kan deze dynamiek een verhoging of verlaging in plaathoogte initiëren.

5 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. In Gawehn (2023) is de bepaling en analyse van windrichtingen gedaan op basis van vectoren waardoor duidelijke verbanden naar voren kwamen voor de stormachtigheid tussen opeenvolgende LiDAR metingen en de (gelijktijdige) veranderingen in plaatareaal van zowel het Pinkegat als ook de Zoutkamperlaag. Daarnaast is in Gawehn (2023-2025) gezocht naar (verwachte) verbanden tussen golfcondities en veranderingen in plaatareaal. Hiervoor werden golfdata bij Nes gebruikt gezien het de meest representatieve, beschikbare golfmetingen zijn van het golfklimaat in het Friesche Zeegat. In deze eerdere studies zijn golfdata vanaf 2019 gebruikt die beschikbaar waren gesteld via de Rijkswaterstaat MATROOS¹ dataverbinding. In de huidige studie zijn golfdata via een nieuwe Rijkswaterstaat ddlpy² dataverbinding verkregen en zijn deze voor station Nes al beschikbaar vanaf het begin van de LiDAR meetreeks in 2010. Hierdoor hoeven in de huidige studie ook geen Random Forest modellen te worden gebruikt (zie Gawehn 2024,2025) om datareeksen te verlengen met externe informatie. In Gawehn (2024) is een negatieve correlatie gevonden tussen veranderingen in plaatareaal van het Pinkegat en golfhoogtes (afname van plaatareaal bij hoge golven en vice versa), al was deze correlatie op de rand van significantie. In Gawehn (2025) dook deze correlatie onder het niveau van significantie.

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-0,5 m. 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 LiDAR datareeks bestaat nu uit 21 punten waarvoor ook windgegevens beschikbaar zijn. 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 21 datapunten ligt de significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt op 0,43. Dat betekent dat voor deze dataset er minder dan 5% kans bestaat dat het geconstateerde verband willekeurig is wanneer de correlatiecoëfficiënt boven 0,43 (of onder -0,43) 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 als er nog 70 LiDAR metingen bij komen. Het aantal LiDAR metingen waarbij ook representatieve golfdata beschikbaar zijn beslaat 19 punten (door tussentijdse perioden met

¹ <https://matroos.rws.nl/>

² <https://pypi.org/project/rws-ddlpy/0.1.0/>

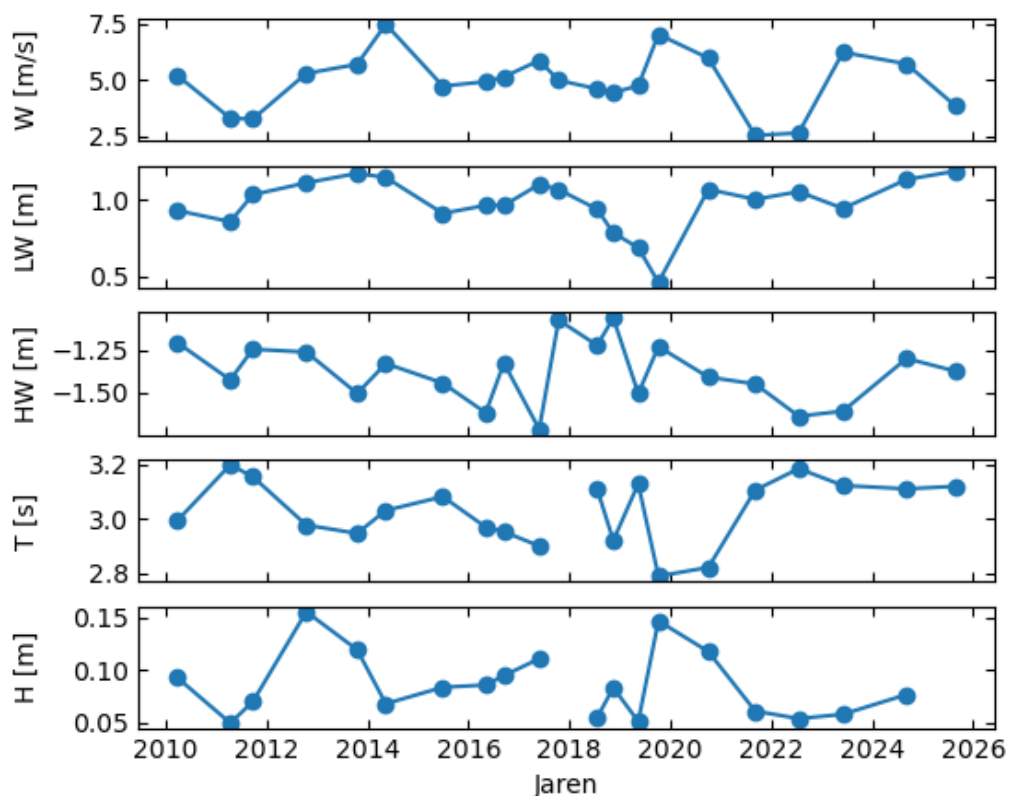
ontbrekende data) en gaat gepaard met een significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt van 0,46.

5.1 Invloed condities tijdens inwinning

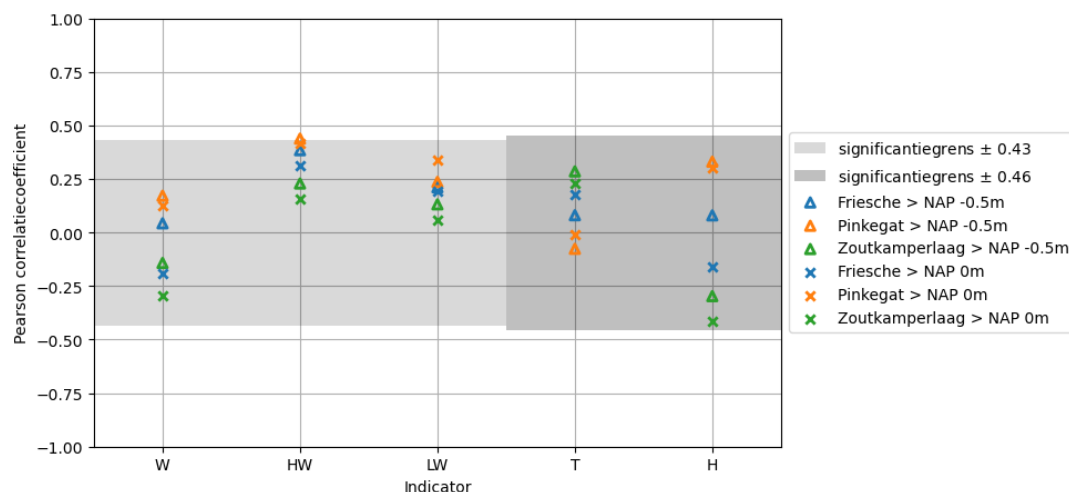
Voor vijf fysische indicatoren is onderzocht of er een correlatie bestaat tussen hun waarde tijdens de inwinning en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. Indicator W voor windsnelheid is berekend uit de tijdreeksen van potentiële wind (gemeten windsnelheid omgerekend naar de windsnelheid bij een standaard 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 gehaald uit de gemeten waarden bij Nes voor de periode 2010-2025. De berekende tijdsreeksen voor de indicatoren tijdens LiDAR inwinning zijn geplot in Figuur 5-1. (Van der Lugt et al., 2020a)

Tabel 5.1 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van het gemeten areaal.

Parameter	Definitie
W	Gemiddelde windsnelheid tijdens de metingen en 1 dag vooraf [m/s]
LW	Gemiddeld laagwater tijdens de metingen en 1 dag vooraf [m tot NAP]
HW	Gemiddeld hoogwater tijdens de metingen en 1 dag vooraf [m tot NAP]
H	Gemiddelde golfhoogte tijdens de metingen en 1 dag vooraf [m]
T	Gemiddelde golfperiode tijdens de metingen en 1 dag vooraf [s]



Figuur 5-1 Tijdreeksen van de hydrologische en meteorologische indicatoren tijdens de metingen.



Figuur 5-2 Pearson correlatiecoëfficiënten voor het verband tussen gemeten arealen en hydrologische en meteorologische indicatoren tijdens het inwinnen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,43 voor windgegevens en waterstanden, en een significantiegrens van 0,46 voor golfgegevens. Friesche zeegat = Pinkegat+Zoutkamperlaag.

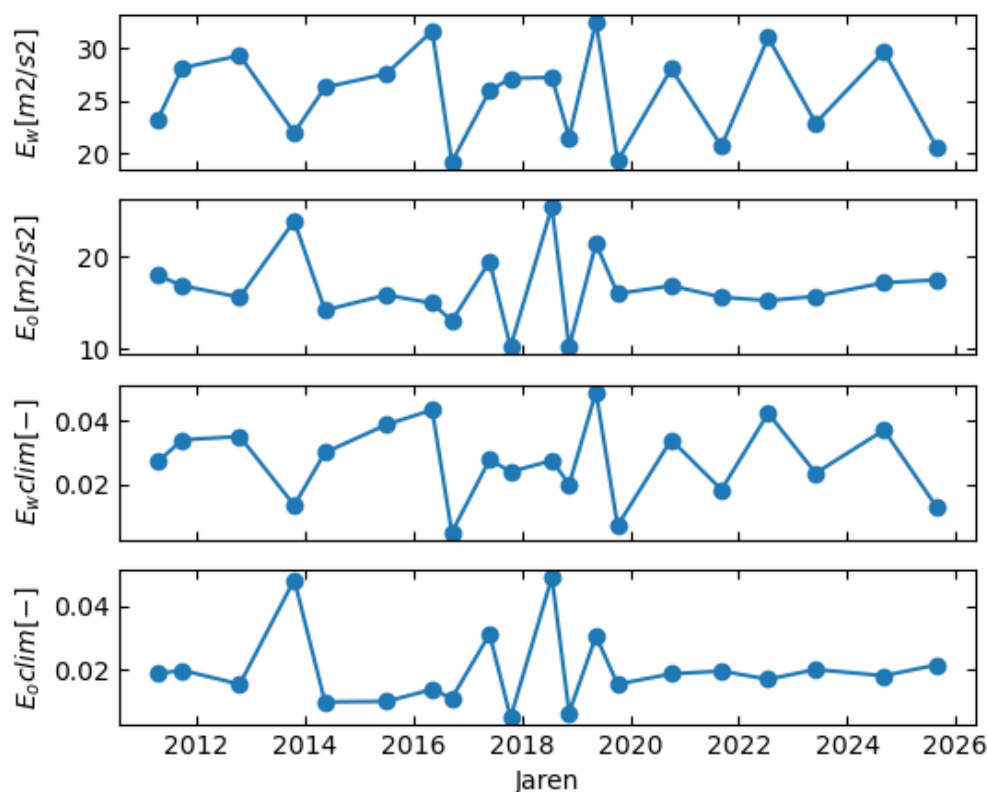
In Figuur 5-2 zijn de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten weergegeven tussen de verschillende indicatoren en zowel het areaal boven NAP-0,5m en het areaal boven NAP+0m. Er bestaat een enkele correlatie op de rand van significantie. Het is een positieve correlatie tussen het plaatareaal boven –NAP 0,5 m en het gemiddeld hoogwater tijdens observatie. Als het water hoger heeft gestaan blijft mogelijk meer water op de platen en is het water nog niet volledig afgestroomd ten tijde van de LiDAR opname. Dit effect is eerder beschreven door Van der Lugt et al. (2019) en zou zich moeten uiten door een positieve correlatie. Gezien de correlatie op de rand van significantie is zijn vervolgmetingen nodig om dit effect structureel te kunnen vaststellen.

5.2 Invloed stormachtigheid tussen opnamen

Voor vier windsnelheidsindicatoren (zie Tabel 5.2 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 windtjeddreeksen van het KNMI voor het station Lauwersoog. Tjeddreeksen voor deze indicatoren laten zien dat er variatie zit in de gemiddelde windenergie en stormachtigheid tussen opeenvolgende LiDAR metingen (Figuur 5-3). Deze variatie kan mogelijk ook aanleiding geven tot periodieke verschillen in plaatareaal.

Tabel 5.2 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van areaalveranderingen op basis van stormachtigheid tussen twee metingen.

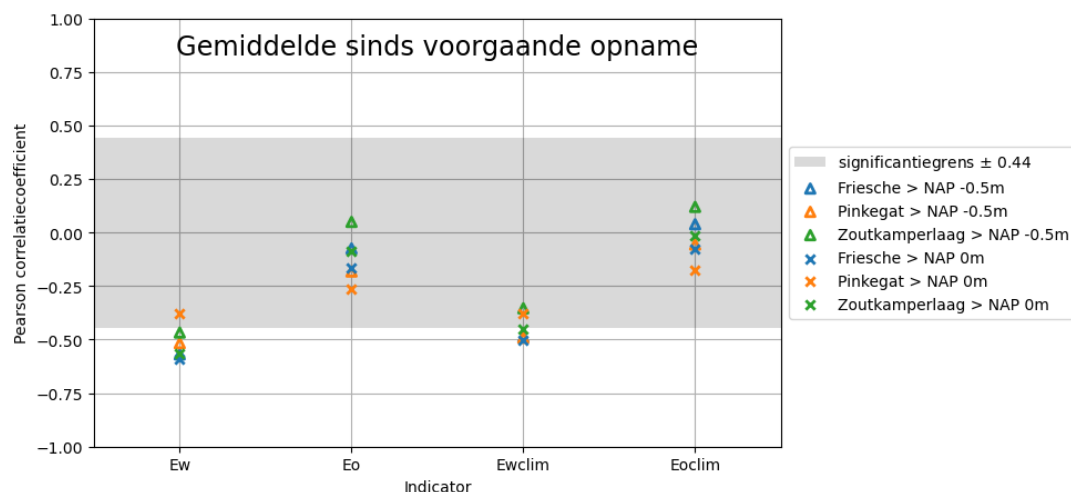
Parameter	Definitie
E_w	Gemiddelde van het kwadraat van de west→oost component van de windsnelheid in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [m^2/s^2]
E_o	Gemiddelde van het kwadraat van de oost→west component van de windsnelheid in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [m^2/s^2]
E_{wclim}	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op windklimaat 2010-2025 [-] voor west→oost component
E_{oclim}	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op windklimaat 2010-2025 [-] voor oost→west component



Figuur 5-3 Tijdreeksen van windindicatoren tussen twee opeenvolgende metingen.

Voor het gehele Friesche Zeegat en ook de afzonderlijke kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag bestaan significante correlaties tussen westelijke wind in de periode van opeenvolgende metingen en de verandering van plaatareaal (Figuur 5-4). De gevonden correlaties zijn negatief, wat betekent dat het plaatareaal krimpt als de windkracht uit westelijke richting bovengemiddeld sterk is (Figuur 5-4, E_w) of er bovengemiddeld veel krachtige stormen voor zijn gekomen (Figuur 5-4, 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 (verdronken) plaatareaal kunnen bereiken en eroderen. Een goed voorbeeld daarvan is het jaar 2022 waarin het stormachtig was vanuit de westelijke windcomponent (Figuur 5-3) en het plaatareaal afnam (Figuur 3-2). Daar komt bij, dat de golven bij harde wind ook vaak groter zijn en dus nog effectiever sediment kunnen afslaan. Correlaties voor het Pinkegat en de Zoutkamperlaag zijn vergelijkbaar in grootte. De verwachting is dat dat plaatafslag door golfbreking mogelijk nog sterker aanwezig is in het Pinkegat gezien de platen gemiddeld genomen lager liggen dan in de Zoutkamperlaag. Een verhoogde waterstand leidt dan tot relatief sterkere golfbreking en meer afslag van de wadplaten (zie Gawehn, 2025).

Wind uit oostelijke richting wordt juist in verband gebracht met een verlaagde waterstand waardoor er ook geen significante afname van plaatareaal wordt verwacht (Figuur 5-4, E_o en E_{oclim}). Hier zijn dan ook geen significante correlaties waar genomen.



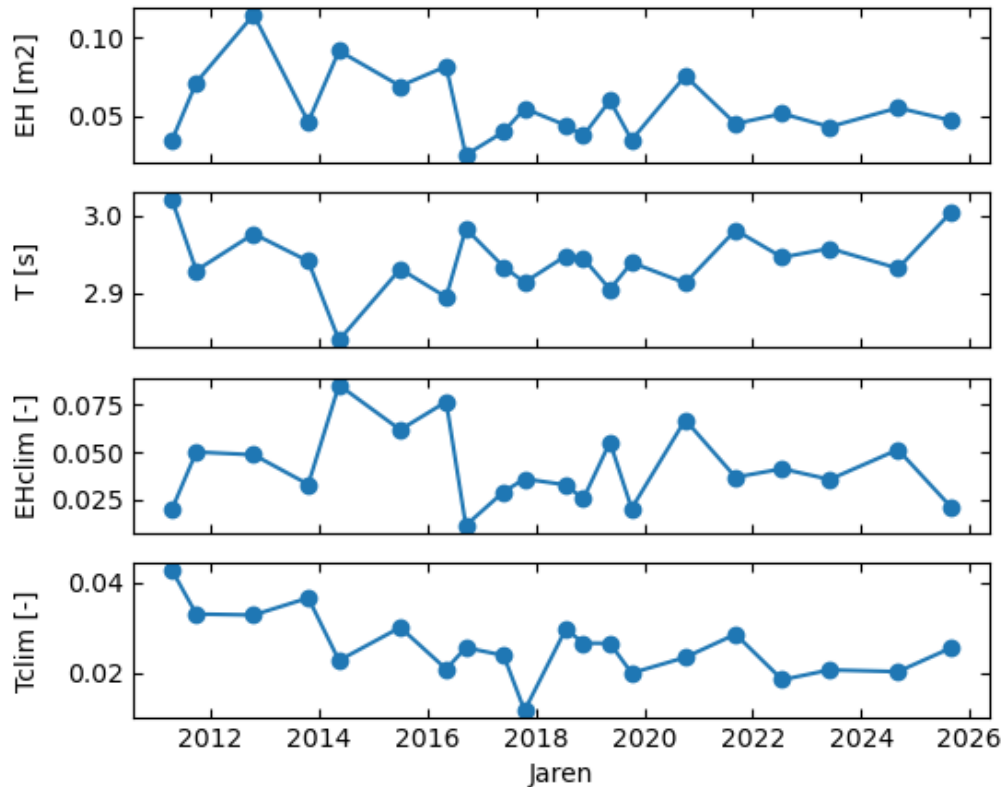
Figuur 5-4 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal boven referentiehoogten NAP-0,5 m, NAP+0 m en windcondities tussen opnamen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,44.

5.3 Invloed golfklimaat tussen opnamen

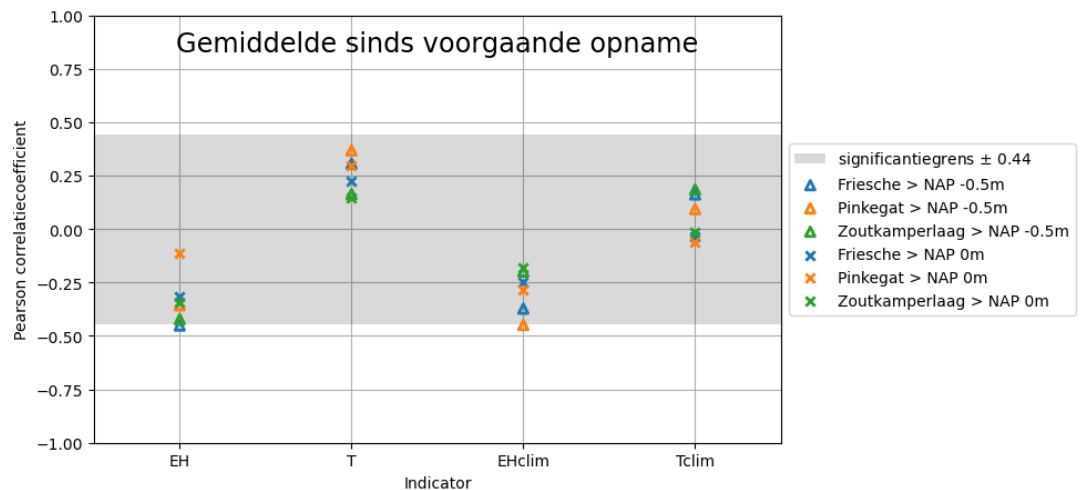
Naast de windindicatoren is ook voor vier golfindicatoren (zie Tabel 5.3 voor de gehanteerde definities) onderzocht of er een correlatie bestaat van hun waarden tussen de opnamen en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. De indicatoren E_H , T , E_{Hclim} en T_{clim} zijn bepaald uit de golfmetingen bij het station Nes. Het meetstation bij Nes zit vrij beschut 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 5-5). In Gawehn (2024) zijn negatieve correlaties gevonden met het plaatareaal die aanduiden dat de wadplaten van het Pinkegat eroderen als de golven hoog zijn. In Gawehn (2025) trokken deze correlaties weer onder de rand van significantie. In de huidige rapportage zijn de negatieve correlaties weer op de rand van significantie en bestaan nu voor zowel het Pinkegat (zie ook Gawehn, 2024) als ook de Zoutkamperlaag. De tijdsreeksen voor golfhoogte en golfperiode zijn langer en is weer een nieuwe LiDAR meting van 2025 toegevoegd. De significantiegrens is daardoor verder verlaagd en de correlaties worden robuuster. Het blijkt dat wadplaten in het hele Friesche Zeegat gevoelig zijn voor afslag door golven: als er tussen twee LiDAR metingen meer golfactie was, werden wadplaten kleiner.

Tabel 5.3 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 overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op het golfklimaat eind 2010-2025 [-]
T_{clim}	ratio van de tijd dat de referentie golfperiode voor 95% kwantiel is overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op golfklimaat eind 2010-2025 [-]



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



Figuur 5-6 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal boven referentiehoogten NAP-0,5m, NAP+0m en golfcondities tussen opnamen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,55.

5.4 Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities

Er zijn geen structurele relaties gevonden tussen het plaatareaal en de condities tijdens de inwinning. Mogelijk is er een lichte positieve correlatie met hoge waterstanden, wat suggereert dat staand en/of langzaam afstromend water op de wadplaten het plaatareaal positief beïnvloeden, maar er zijn vervolgmetingen nodig om dit duidelijk te kunnen vaststellen. 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. Voorbeeld

daarvan is het jaar 2022 waarin het stormachtig was vanuit de westelijke windcomponent en het plaatareaal afnam. 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 waarschijnlijk sterker is dan bij de Zoutkamperlaag. Golfcondities spelen een belangrijke rol in de erosie van wadplaten. Zo bestaat ook een directe negatieve correlatie tussen golfhoogte en verandering in plaatareaal. Hoe hoger de golven des te meer slaan de wadplaten af en wordt het oppervlak kleiner. Deze correlaties zijn nog wel dicht op de rand van significantie.

6 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?”. Uit de metingen blijkt niet dat het areaal droogvallend wad is veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning. Deze conclusie is gebaseerd op de in Hoofdstuk 1 geformuleerde onderzoeksvragen die hier worden beantwoord en op basis waarvan aanbevelingen worden gegeven voor vervolgonderzoek en methodiek.

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

Het gerapporteerde plaatareaal van de Zoutkamperlaag is constanter gebleven door de tijd heen dan het plaatareaal van het Pinkegat. Voor het Pinkegat lijkt na 2010 een licht lineair dalende trend in het signaal te zitten, deze is echter klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge in de gecorrigeerde bodemhoogte. Voor de periode van 2016-2025 is het areaal vrij stabiel en zowel plaatareaal als plaathoogte van 2025 liggen boven die als gemeten in 2010.

De deelgebiedsanalyse toont aan dat verandering in plaatareaal in actieve (deel)gebieden goed kan worden gemonitord met LiDAR. Individuele plaatcomplexen groeien aan of nemen in omvang af, gerelateerd aan de grootschalige dynamiek van het bekken. Op de schaal van het kombergingsgebied vallen deze ontwikkelingen min of meer tegen elkaar weg.

Voor het plaatareaal van het Pinkegat wordt geconcludeerd dat er geen significante aangroei plaats vindt en ook geen significante afname. Het plaatareaal in de Zoutkamperlaag is relatief constant en ook de variaties in deelgebieden daarvan zijn relatief klein.

6.2 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. De grootste daling van plaatoppervlak wordt echter 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. De afname ten zuiden van Ameland-oost is gelijkwaardig aan vergelijkbare gebieden ten zuiden van Schiermonnikoog-west die niet in de bodemdalingsschik zitten. De gemeten plaatveranderingen zijn veel groter dan berekende effecten van diepe bodemdaling (Van der Vegt en Van der Lugt, 2022) en maken voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag jaarlijks maar respectievelijk 3% en 2% uit van de meetonzekerheid. Op individueel plaatniveau bij Ameland Zuid is dat 5%.

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. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen leidt tot veranderingen in plaathoogte die veel groter zijn dan de effecten van bodemdaling. De morfologische dynamiek, en daardoor plaatareaal en -hoogte, wordt vooral gestuurd door een combinatie van hydrodynamische condities, zoals bijvoorbeeld getij, en meteorologische condities. De LiDAR datareeks moet waarschijnlijk 40+ jaar lang zijn om op kombergingsniveau verschillende invloedsfactoren op het plaatareaal van elkaar te onderscheiden en zo ook mogelijke effecten van bodemdaling te detecteren. Voor individueel plaatniveau, met name Ameland Zuid, volstaat mogelijk een

kortere tijdsreeks maar ook hier zullen veranderingen altijd in de context van de grotere kombergingsschaal moeten worden gezien. Op basis van de huidige dataserie kan er nog geen effect van bodemdaling worden vastgesteld. Hierbij geldt echter wel dat om een goed onderscheid te kunnen maken tussen de effecten van bodemdaling en andere invloedfactoren tijdreeksen van minimaal 40 jaar benodigd zijn. Jaarlijkse LiDAR metingen zijn belangrijk geweest omdat zij statistische zekerheid bieden dat verschillende invloedfactoren op korte en lange tijdschaal van elkaar kunnen worden gescheiden en niet een toevallig product zijn.

Voor individuele platen in het Pinkegat kan wel een verandering 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.

6.3 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. Verhoogde golfenergie correleert ook direct met plaatverandering waarbij hogere golven voor plaatafslag zorgen.

6.4 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 gecorrigeerde LiDAR resultaten en Ground Control Point grids ligt in de orde van 1-2 cm. Daarmee kunnen de LiDAR data na correctie als relatief nauwkeurig bestempeld worden.

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. Ook hoge golven relateren aan plaatafslag al is dat nog op de rand van significantie. We bevelen aan om deze relaties daarom verder te onderzoeken. Met toekomstige LiDAR metingen zullen ook de golfmeetreeksen langer zijn geworden, waardoor structurele correlaties tussen golfcondities en veranderingen in plaatareaal kunnen uitkristalliseren. Dit helpt om de verschillende oorzaken voor bodemveranderingen verder te kwantificeren en van elkaar te scheiden.

Referenties

- Commissie MER (2025). "Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2024." Projectnummer: 3950. Commissie voor de MilieuEffectRapportage, Utrecht, Nederland.
- Dillingh, D., (2013). "Kenmerkende waarden kustwateren en grote rivieren". In opdracht van RWS, WV. Rapport: 1207509-000-ZKS-0010. Delft, Nederland.
- Elias, E. (2019). "Een actuele zandbalans van de Waddenzee." Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002. Delft, Nederland.
- Elias, E., Oost, A. (2021). "Morfologische processen van het Friesche Zeegat: Een conceptueel model." Deltares rapport 11205236-003. Delft, Nederland.
- Elias, E. en de Wilde, T. (2025). "Morfologische Analyse Centrale Waddenzee. Een studie van de kombergingsgebieden van het Ameland en Friesche Zeegat". Rapport 11210370-003-ZKS-0001, Deltares, Delft, 145 p.
- Elias, E. (2025). "Morfologische ontwikkeling Het Oerd". Rapport 11210370-003-ZKS-0001, Deltares, Delft, Nederland.
- Gawehn, M. (2023). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2022)". Deltares rapport 11206685-005-ZKS-0002. Delft, Nederland.
- Gawehn, M. (2024). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2023)". Deltares rapport 11206685-006-ZKS-0001_v1.2. Delft, Nederland.
- Gawehn, M. (2025). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2024)". Deltares rapport 11206685-007-ZKS-0001_v1.0. 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 wadplaat hoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag" Versie 2; 30-3-2017. <https://commissiener.nl/projectdocumenten/00002797.pdf>, opgehaald 12-04-2022.
- NAM B.V. (2023). "Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2022". EP Document Nummer: EP202303212588
- Oost, A., Cleveringa, J., Taal, M. (2020). "Kombergingsrapport Friesche Zeegat - Pinkegat en Zoutkamperlaag". Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0002. Delft, Nederland.
- Field (2025). "43225 Waddenzee – LiDAR acquisition for 2025". Rapport. Oslo, Norway
- 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-bijlage 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 <i>Fugro Geospatial B.V. (2010)</i>	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 <i>Fugro Geospatial B.V. (2011)</i>	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 <i>Fugro Geospatial B.V. (2011a)</i>	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 <i>Fugro Geospatial B.V. (2012)</i>	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 <i>Fugro Geospatial B.V. (2013)</i>	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 <i>Fugro Geospatial B.V. (2014a)</i>	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 getijvenster 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 getijvenster 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 getijvenster
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
2023 (voorjaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560 II-S	03-06-2023	14:11	16:47	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2024 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560 II-S	05-09-2024	16:37	19:05	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2025 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560 II-S	26-08-2025	06:10 17:29	07:08 19:18	7-13, 17, 18 1-6, 14-16	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

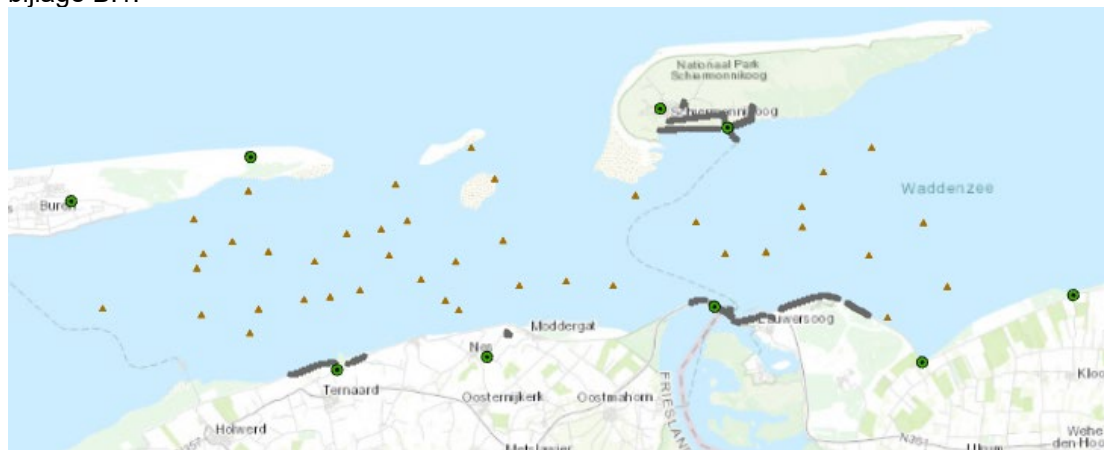
In de 2026 LiDAR analyse van de surveys tot en met 2025 zijn de surveys wederom gecorrigeerd met een lineair correctievlak ten opzichte van een referentie survey (de acquisitie in het voorjaar van 2019). De correctie parameters zijn integraal geschat op basis van harde topografie, de sediment grids, en de Ground Control Point grids.

De correcties liggen voor het grootste gedeelte binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Met name in de jaren na 2019 zijn de correcties klein.

B.1 Meetpunten voor de berekening van correctie parameters

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.

De meetpunten voor de berekening van de correctie parameters worden getoond in Figuur-bijlage B.1.



Figuur-bijlage 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..

B.1.1 Ground Control Point grids

Sinds 2022 worden de hoogtes van de GCP grids bepaald op basis van InSAR metingen, gecombineerd met de waterpashoogtes die tot 2021 ten opzichte van naburige NAP peilmerken zijn berekend.

In (Field, 2025) 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-bijlage B.1. De afwijkingen hebben een vergelijkbare orde grootte als die in voorgaande jaren.

Tabel-bijlage B.1 Vergelijking hoogtes LiDAR puntenwolk met Ground Control Point grids (uit Field, 2025).

Control Surface	Average dZ (m)	Minimum dZ (m)	Maximum dZ (m)	Average magnitude (m)	RMS	Std. Dev
GCP - 1	-0.022	-0.036	-0.012	0.022	0.022	0.006
GCP - 2	-0.003	-0.021	0.009	0.005	0.007	0.007
GCP - 3	-0.008	-0.042	0.013	0.011	0.015	0.013
GCP - 4	0.029	-0.006	0.07	0.03	0.035	0.019
GCP - 5	-0.007	-0.043	0.011	0.008	0.012	0.01
GCP - 6	-0.007	-0.019	0.01	0.008	0.01	0.007
GCP - 7	-0.01	-0.029	0.002	0.01	0.013	0.008
GCP - 8	-0.021	-0.061	0.008	0.021	0.025	0.014
GCP - 9	0.046	0.015	0.077	0.046	0.049	0.016

B.1.2 Harde topografie punten

In deze monitoringscyclus is dezelfde set harde topografie punten gebruikt als in de vorige. Alle harde topografie punten zijn gecorrigeerd op basis van de bodemdaling die integraal berekend is uit alle geodetische metingen. De meeste harde topografie punten liggen echter (initieel) in gebieden buiten de bodemdalingscontouren.

B.1.3 Sediment grids

Op het Wad worden bij de peilmerk clusters waar GNSS metingen worden 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.2 Correctie parameters

De correctie parameters zijn voor de monitoringscyclus 2025 integraal bepaald op basis van de sets meetpunten zoals beschreven in paragraaf B.1.

B.2.1 Berekening correctie parameters

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

De correctie ϵ 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 ϵ een vector van hoogteverschillen is ten opzichte van de referentie survey (in meters); x en y vectoren met coördinaten in het Rijksdriehoekstelsel (in kilometer); en a , b , en c de parameters van het lineaire vlak.

De correctie parameters (zie Tabel-bijlage B.2) zijn bepaald op basis van de Deltares grids met 1 meter resolutie. Door

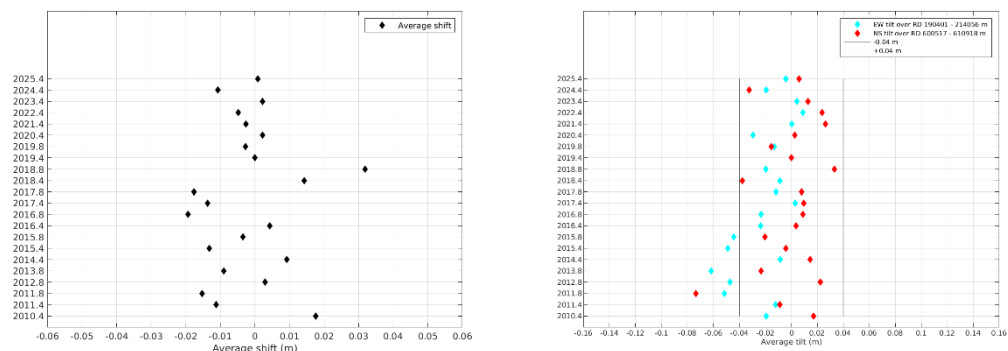
middel van kleinste kwadraten schatting zijn de correctie parameters uit de hoogteverschillen van de harde topografie punten (inclusief extra ground control point clusters), de sediment grids en de Ground Control Point grids berekend. De getallen zijn iets gewijzigd ten opzichte van het vorige monitoringsjaar, 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 correctie parameters (zie Figuur-bijlage B.2), welke op centimeter niveau overeenkomen met de berekende shifts en tilts in de vorige monitoringscyclus.

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

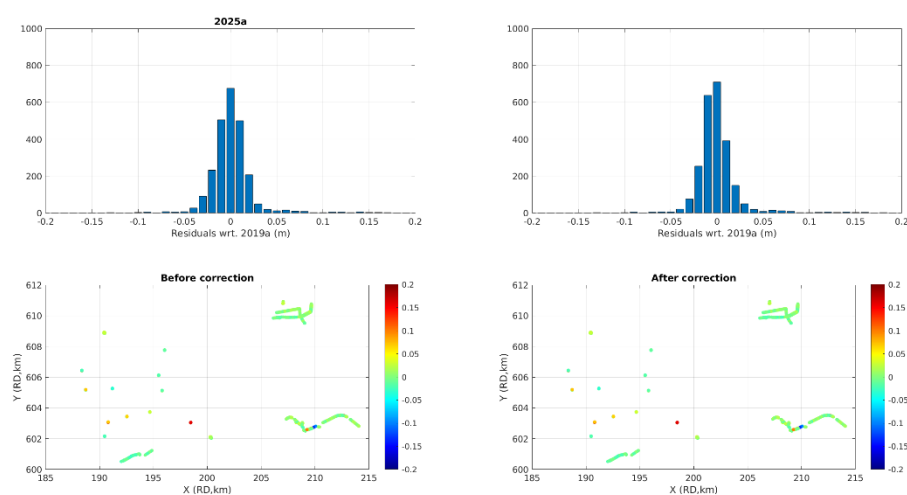
survey	a	b	c
2010a	0,0008	0,0016	-1,1435
2011a	0,0005	-0,0009	0,4020
2011b	0,0022	-0,0071	3,8292
2012b	0,0020	0,0021	-1,6953
2013b	0,0026	-0,0023	0,8260
2014a	0,0004	0,0014	-0,9037
2015a	0,0021	-0,0004	-0,1752
2015b	0,0019	-0,0020	0,8012
2016a	0,0010	0,0004	-0,4166
2016b	0,0010	0,0008	-0,7254
2017a	-0,0001	0,0009	-0,5500
2017b	0,0005	0,0008	-0,5758
2018a	0,0004	-0,0036	2,1283
2018b	0,0008	0,0032	-2,0632
2019a	0,0000	0,0000	0,0000
2019b	0,0006	-0,0015	0,7907
2020a	0,0013	0,0003	-0,4088
2021a	0,0000	0,0025	-1,5367
2022a	-0,0004	0,0023	-1,3095
2023a	-0,0002	0,0012	-0,7004
2024a	0,0008	-0,0031	1,7260
survey	a	b	c
2025a	0,0002	0,0006	-0,3767

B.2.2 Evalutie 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-bijlage B.2. De correcties vallen binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Figuur-bijlage B.3 toont de residuen voor de 2025 survey voor en na toepassing van de correctie parameters.



Figuur-bijlage 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.



Figuur-bijlage B.3 Residuen hoogteverschillen (m) survey 2025a ten opzichte van 2019a, voor (links) en na (rechts) correctie. In de berekening van de correctie parameters zijn uitschieters verwijderd.

Tabel-bijlage 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 een selectie is gemaakt van harde topografie punten met het doel om de nauwkeurigheid van de schatting van de correctie parameters te verbeteren. Daarbij zijn in de initiële selectie harde topografie punten 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. Deze selectie is de afgelopen jaren ongewijzigd gelaten. In de berekening van de correctie parameters worden aanvullend uitschieters gedetecteerd en verwijderd. De harde topografie punten zijn ruim in de meerderheid ten opzichte van de GCP en sediment grid punten, waardoor de percentielen in Tabel-bijlage B.3 relatief laag uitvallen.

Tabel-bijlage 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	-4,9	4,5
2011b	2,3	-1,4	1,4	-4,7	4,1
2012b	2,6	-1,3	1,6	-6,0	4,1
2013b	1,7	-1,1	1,1	-3,5	3,2
2014a	2,0	-1,4	1,2	-3,5	4,1
2015a	1,7	-0,8	0,8	-3,0	2,8
2015b	1,9	-1,3	1,4	-3,8	3,6
2016a	2,5	-1,1	0,7	-3,9	4,3
2016b	2,3	-1,4	1,4	-4,3	5,0
2017a	1,6	-0,9	0,8	-3,1	4,0
2017b	1,2	-0,7	0,7	-2,2	2,6
2018a	1,8	-1,1	0,9	-3,1	4,0
2018b	1,2	-0,9	0,9	-2,1	2,4
2019a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2019b	1,2	-0,6	0,7	-2,1	2,4
2020a	1,5	-1,0	0,9	-2,8	3,2
2021a	1,3	-0,8	0,8	-2,3	3,1
2022a	1,9	-1,1	0,8	-3,7	4,1
2023a	2,0	-0,9	0,6	-2,5	4,2
2024a	2,0	-0,8	0,7	-2,5	3,8
2025a	2,4	-1,1	0,6	-3,3	6,0

B.3 Referenties

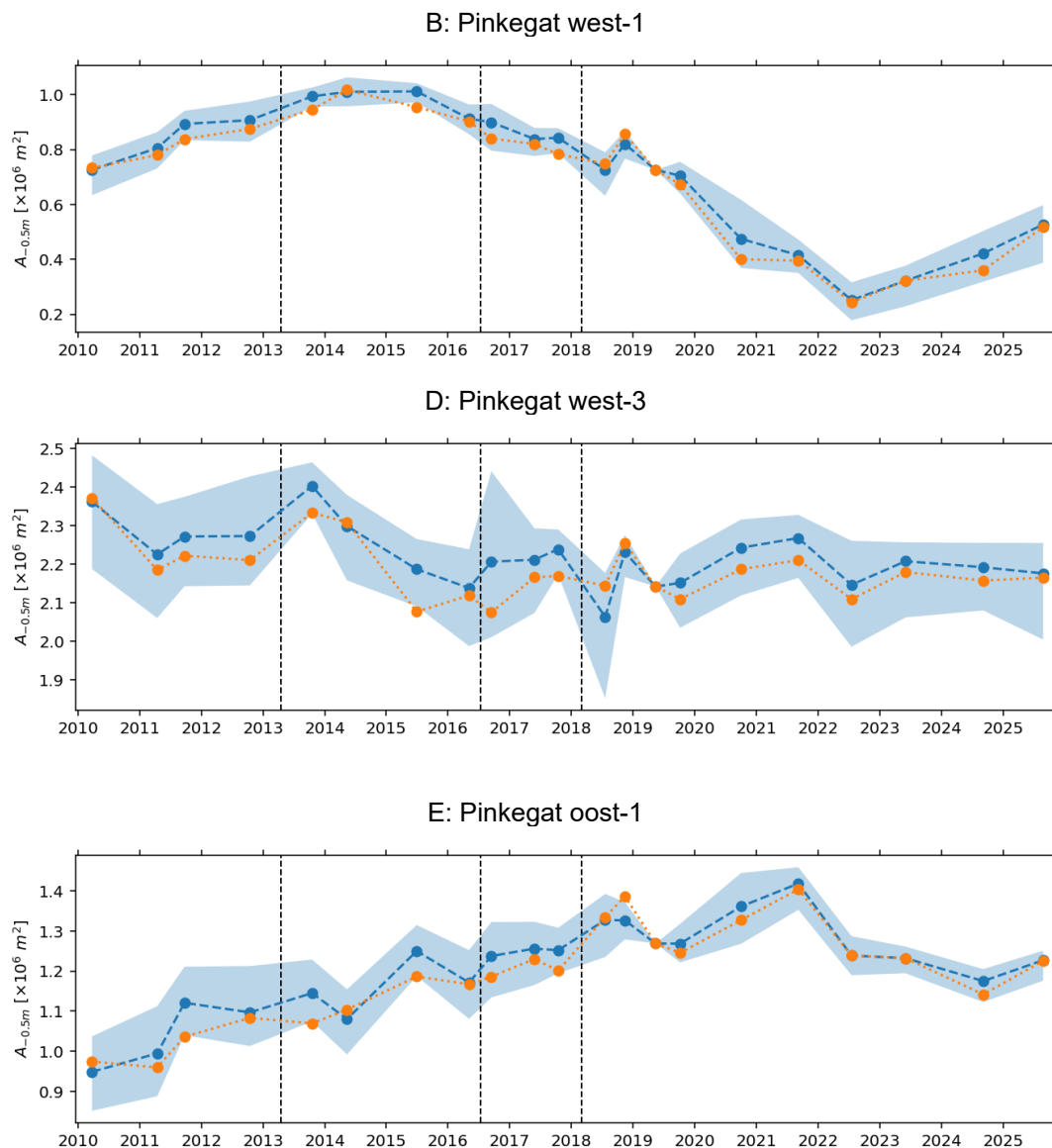
van der Lugt, M., Visser, M., Ketelaar, G. (2020). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019)". Deltares rapport 11203620-002-ZKS-0006. Delft, Nederland.

Field (2025) Project report '43225 – Waddenzee; LiDAR acquisition for 2025'.

C Deelgebied veranderingen

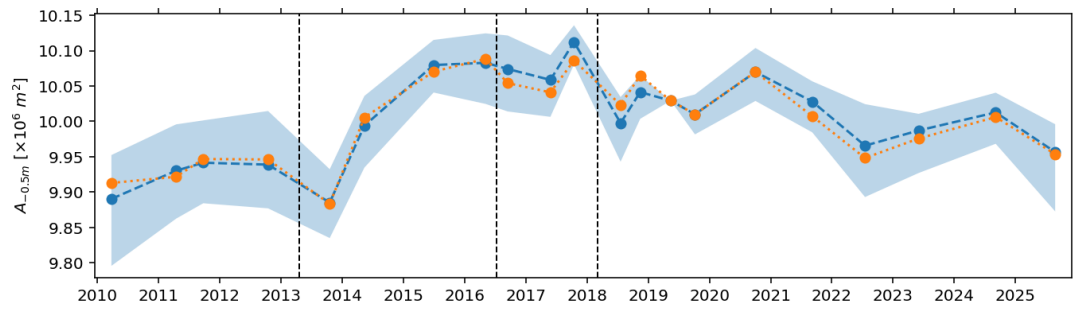
Auteur: Matthijs Gawehn (Deltares)

C.1 Tijdsreeks deelgebieden

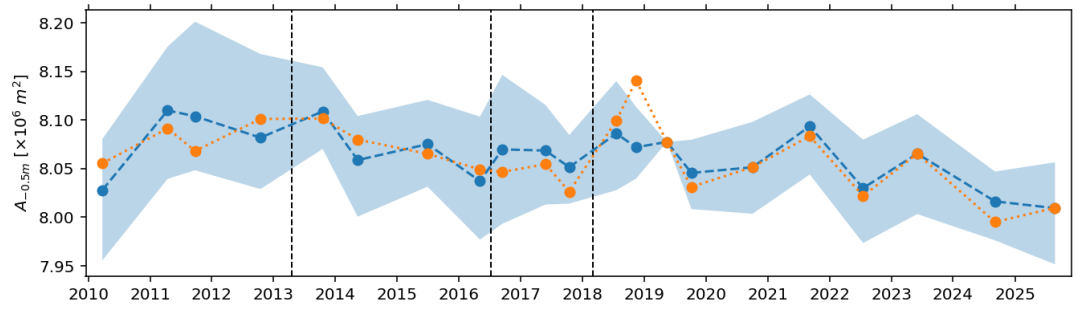


Figuur-bijlage C.1 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP-0,5 m voor platen in het Pinkegat (B,D,E in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toont de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de 95% onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

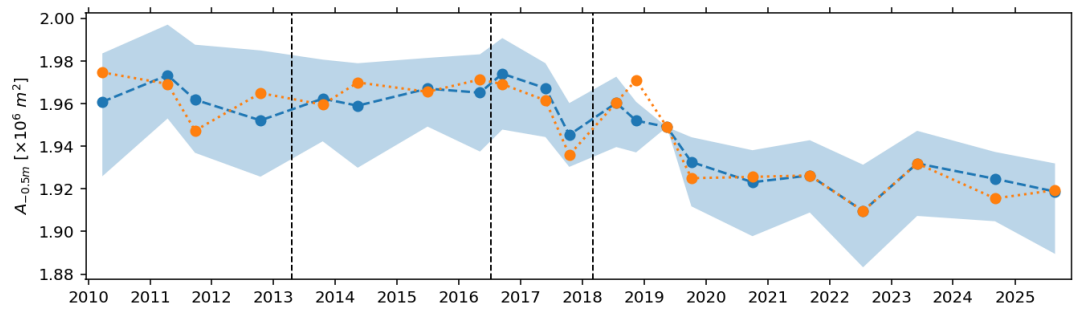
J: Eilanderbult



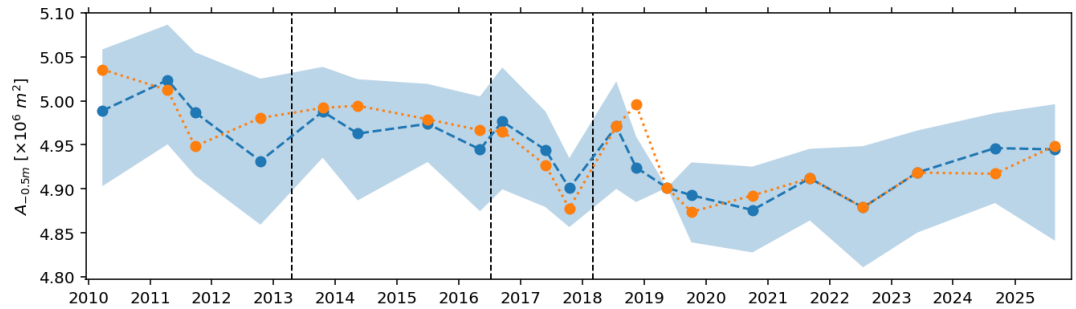
K: Schiermonnikoog zuid-1

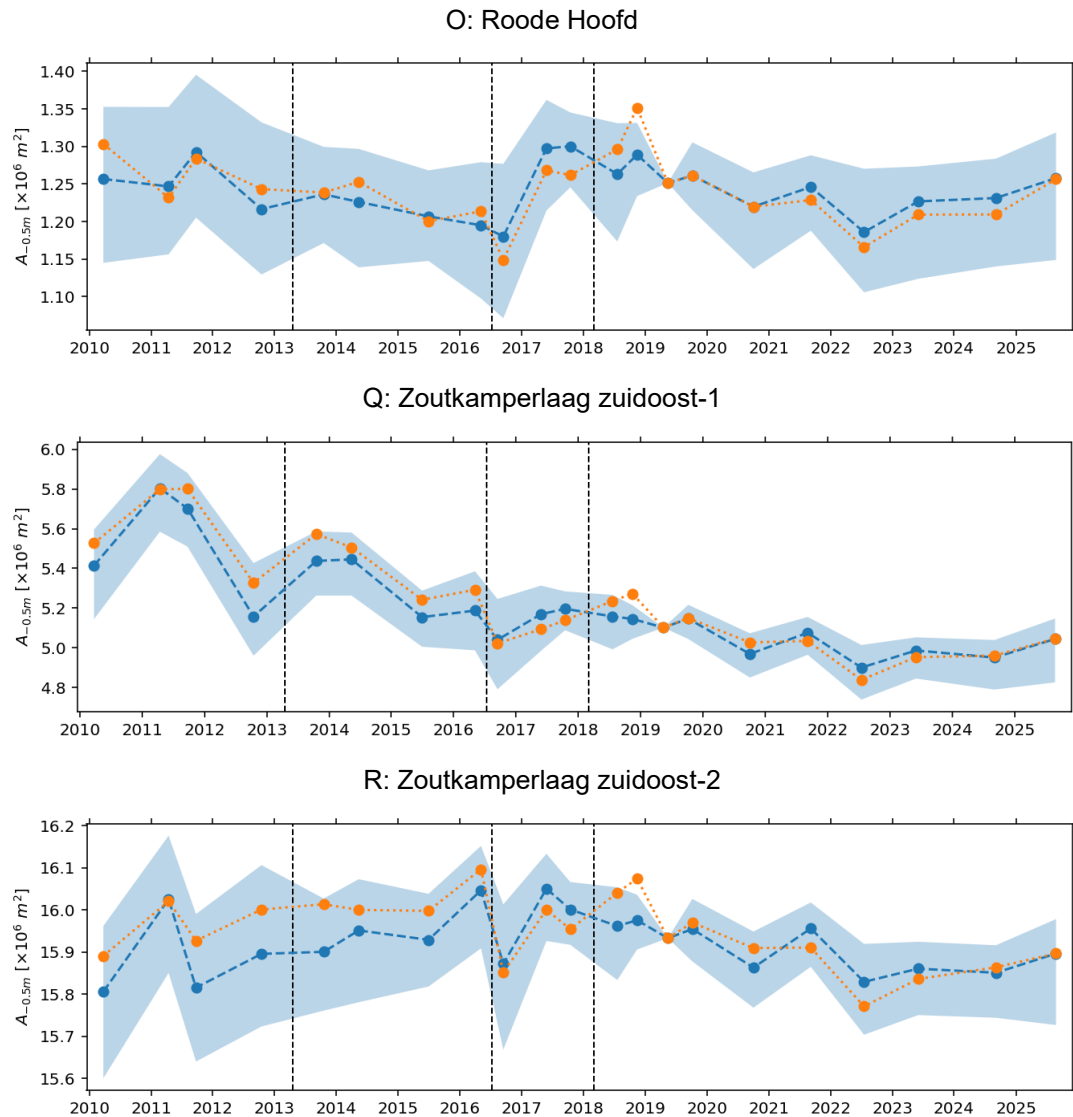


L: Schiermonnikoog zuid-2



M: Schiermonnikoog zuid-3

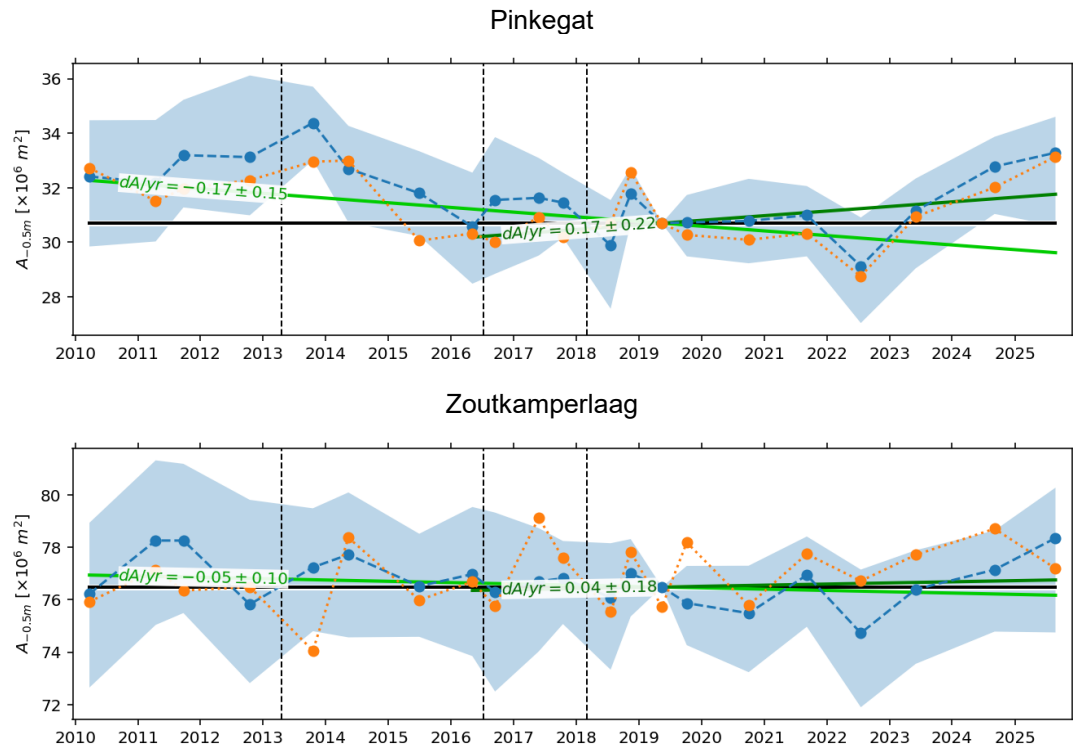




Figuur-bijlage C.2 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0,5 m voor individuele platen van het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (J,K,L,M,O,Q,R in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toon de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de 95% onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

C.2 Lineaire trends in tijdseries Pinkegat en Zoutkamperlaag

De regressielijnen in de tijdseries voor het Pinkegat en de Zoutkamperlaag zijn gekwantificeerd samen met de onzekerheid (twee keer de standaarddeviatie) van de regressie coëfficiënten. Voor de berekening van regressielijnen zijn de onderliggende datapunten gewogen op basis van het bijbehorende onzekerheidsinterval (voor meting A_j is het gewicht $w_j = 1/(A_{j,97.5\text{pct}} - A_{j,2.5\text{pct}})$, waarbij A het plaatoppervlak is van LiDAR meting j), om ervoor te zorgen dat metingen met grote onzekerheid minder invloed hebben op de regressielijn dan punten met een kleine onzekerheid.



Figuur-bijlage C.3 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP -0,5 m 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 lichtgroene lijn (—) geeft de lineaire trend weer sinds start van de metingen in 2010 onder vermelding van de helling en de onzekerheid. De donkergroene lijn (—) geeft de lineaire trend weer sinds 2016 onder vermelding van de helling en de onzekerheid. De horizontale zwarte lijn (—) is de referentie waarbij het plaatareaal niet veranderd. De verticale streepjeslijnen geven de wisseling van type laserscanner weer.

Bekijkt men opeenvolgende LiDAR metingen van plaatareaal voor het Pinkegat, lijkt er een dalende trend in het signaal te zitten van $-0,17 \text{ km}^2$ per jaar voor de periode tussen 2010 en 2025. Daarbij wordt aangenomen dat de plaatveranderingen gedurende deze periode lineair zijn verlopen. Deze trend is echter niet constant en dat wordt duidelijk als men naar de lineaire ontwikkelingen over de recente periode 2016 tot 2025 kijkt, want gedurende deze 9 jaar is het plaatareaal in het Pinkegat vrij stabiel en neemt de afgelopen drie jaar zelfs toe: de lineaire ontwikkelingen zijn nu tegenovergesteld ($+0,17 \text{ km}^2$ per jaar). Voor zowel de gehele periode 2010-2026 als de periode 2016-2026 zijn de trends niet significant ten opzichte van de bijbehorende onzekerheden (respectievelijk $\pm 0,15$ en $\pm 0,22 \text{ km}^2$ per jaar). Voor de Zoutkamperlaag is het areaal over de gehele periode 2010-2025 stabiel; de lineaire ontwikkeling is klein ($-0,04 \text{ km}^2$ per jaar) en insignificant ten opzichte van de onzekerheid ($\pm 0,10 \text{ km}^2$ per jaar).

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