

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2023)



Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2023)

Matthijs Gawehn

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2023)

Opdrachtgever	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
Contactpersoon	mevrouw V.B.H. Ketelaar
Referenties	
Trefwoorden	LiDAR, Friesche Zeegat, monitoring




Documentgegevens

Versie	1.2
Datum	12-04-2024
Projectnummer	11206685-006
Document ID	11206685-006-ZKS-0001
Pagina's	70
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	Publicatie
1.2	Matthijs Gawehn 	Helena van der Vegt  Zheng Bing Wang	Bart Grasmeyer 	

Samenvatting

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

In deze monitoringstudie is onderzocht of de morfologie van het Friesche Zeegat (kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag) gevolgen ondervindt van diepe bodemdaling door gaswinning. De analyse wordt uitgevoerd op een dataset van hoogtekarten van het droogvallend wad in het Friesche Zeegat. Deze dataset bestaat uit LiDAR opnamen die sinds 2010 één- tot tweemaal per jaar worden ingewonnen. De huidige studie is een update van de monitoringsstudie die sinds 2010 wordt uitgevoerd, met toevoeging van een nieuwe LiDAR opname uit juni 2023.

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

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

De ontwikkeling van de wadplaten in de deelgebieden van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag laat grote variaties zien. Op de geaggregeerde schaal van de Zoutkamperlaag heffen deze variaties in oppervlak en hoogte elkaar op. Voor het Pinkegat lijkt een licht dalende trend in het signaal te zitten, echter voor de recente periode 2016 tot 2023 is het areaal vrij stabiel. De conclusie is evenals 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 niet hier waargenomen. De natuurlijke morfologische dynamiek van geulen en platen leidt tot veranderingen in plaathoogte die het effect van bodemdaling op lokale schaal kunnen versluieren. Hierdoor komt geen eenduidig bodemdalingssignaal naar voren uit de LiDAR dataset.

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. 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 als referentie, verder te gebruiken voor vervolganalyses. In de analyse van de LiDAR data zijn statistisch significante relaties gevonden tussen veranderingen in plaatareaal, sterke westelijke wind en golfhoogte. Om relaties met de golfhoogte en ook golfperiode te vinden zijn bestaande golfmetingen bij Nes van de jaren 2019-2023 aangevuld met een *hindcast* voor de periode 2014-2019. We bevelen aan om de relatie tussen veranderingen in plaatareaal in de Zoutkamperlaag en golven verder te onderzoeken, door de periode van de metingen verder aan te vullen en de nauwkeurigheid van de *hindcast* verder te verbeteren. Door de LiDAR metingen voort te zetten kunnen korte termijn trends in de verandering van plaatareaal beter worden onderscheiden van de lange termijn trends. Daarnaast kunnen ook de verschillende invloeden op de verandering van het plaatareaal beter van elkaar worden onderscheiden. Hierbij is het ook van belang de nieuwste inzichten in de morfologische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat mee te nemen.

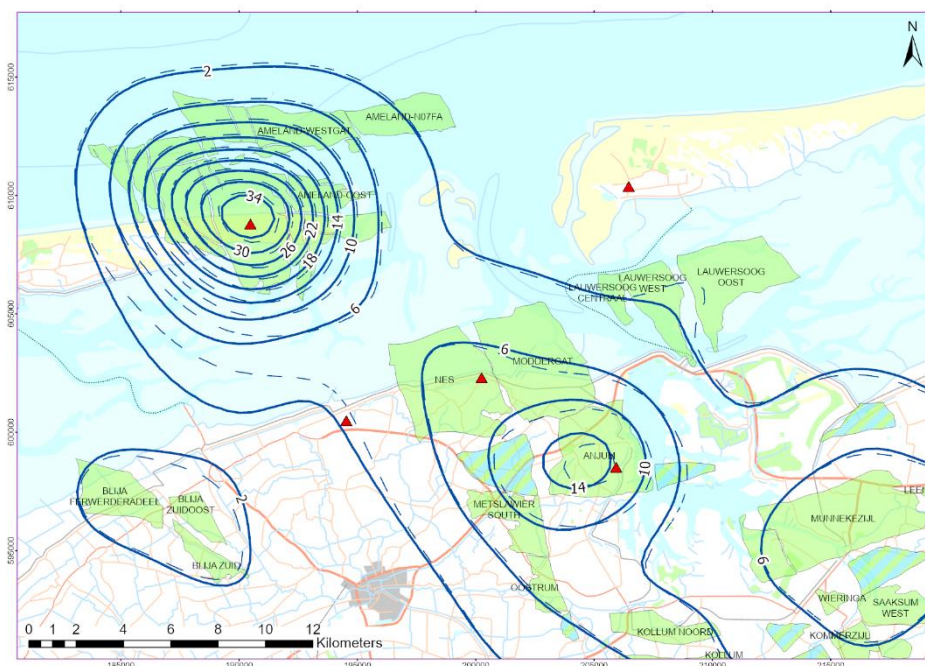
Inhoud

	Samenvatting	4
1	Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat	8
1.1	Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat	8
1.1.1	Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2022	9
1.1.2	Status kennis morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat	10
1.2	Aanbevelingen MER commissie 2023	10
1.3	Onderzoeksvragen	11
1.4	Aanpak en leeswijzer	11
2	Verwerken van LiDAR data	12
2.1	Beschrijving opnamen 2023	12
2.2	Opwerkingsprotocol	13
2.2.1	LiDAR opwerking	13
2.2.2	Correctie systematische afwijking	14
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)	23
3.4	Langetermijntrends	24
3.5	Conclusies areaalontwikkeling	27
4	Analyse ontwikkeling plaathoogte	29
4.1	Hypsometrie kombergingsgebieden	29
4.2	Hypsometrie individuele platen	30
4.3	Tijdsgemiddelde ontwikkeling	37
4.4	Profielen	38
4.5	Conclusies plaathoogte ontwikkeling	41
5	Invloed hydrodynamische en meteorologische condities	42
5.1	Aanvulling van golfmetingen bij Nes	43
5.2	Invloed condities tijdens inwinning	45
5.3	Invloed stormachtigheid tussen opnamen	47
5.4	Invloed golfklimaat tussen opnamen	49

5.5	Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities	50
6	Conclusies en aanbevelingen	52
6.1	Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?	52
6.2	In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?	52
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?	53
6.4	Aanbevelingen	53
Referenties		54
A	Overzicht vluchtgegevens	56
B	NAM rapportage datareeks correctie	59
Samenvatting		59
B.1	Meetpunten voor de berekening van correctie parameters	59
B.1.1	Ground Control Point (GCP) grids	60
B.1.2	Harde topografie punten	60
B.1.3	Sediment grids	60
B.2	Correctie parameters	61
B.2.1	Berekening correctie parameters	61
B.2.2	Evalutie correctie parameters	62
B.3	InSAR deformatie tijdseries Ground Control Point grids	63
B.4	Referenties	65
C	Deelgebied veranderingen	66
C.1	Tijdseries deelgebieden	66
C.2	Lineaire trends in tijdseries Pinkegat en Zoutkamperlaag	68
70		

1 Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat

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



Figuur 1-1 Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2023) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2022 volgens de M&R-rapportage over 2021. De rode driehoeken geven de posities van de GNSS stations aan.

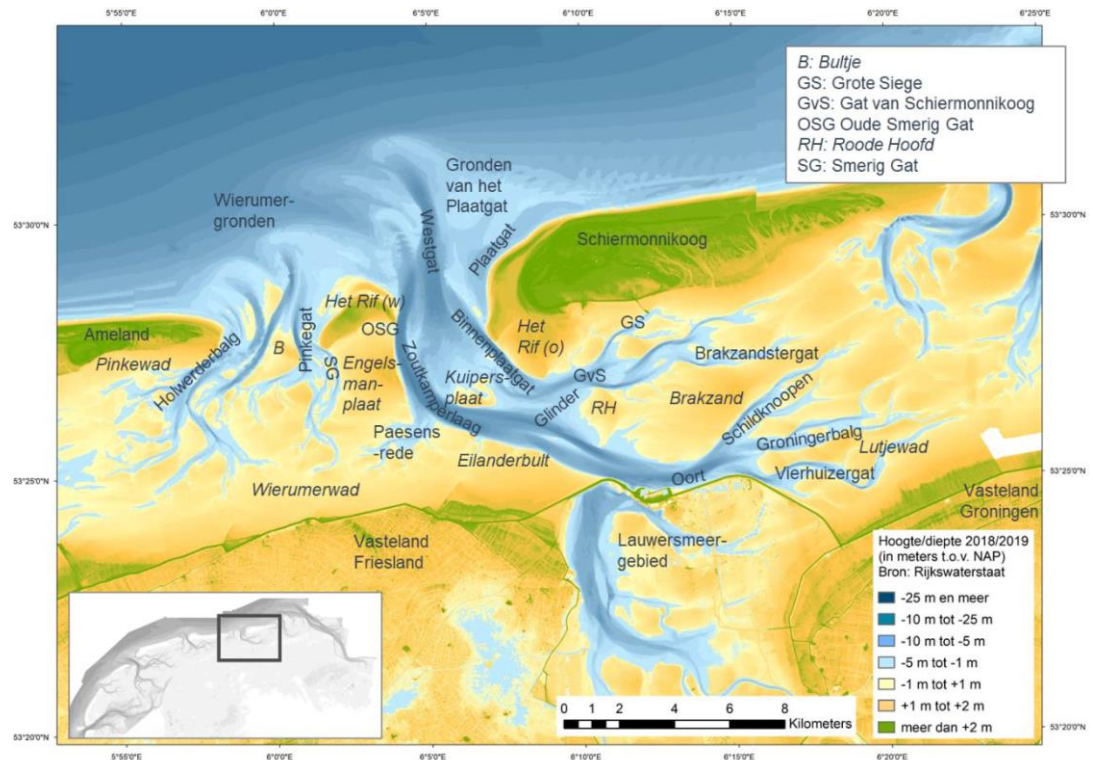
Voor de gaswinning geldt het hand-aan-de-kraan principe waarbij monitoring van veranderingen in het gebied een belangrijke rol speelt (NAM, 2007). De effecten van bodemdaling op morfologie en ecologie in het Waddengebied worden voortdurend onderzocht. Deltares voert jaarlijks een morfologische analyse uit. Het voorliggende rapport is onderdeel van de monitoringscyclus 2023. Leidend in deze rapportage is de vraag of de morfologie van de wadplaten gevolgen ondervindt van de diepe bodemdaling door gaswinning.

De morfologische analyse is gebaseerd op de hoogteontwikkeling van het droogvallend wad in het Friesche Zeegat. Deze ontwikkeling wordt afgeleid uit een reeks LiDAR opnamen van het gebied die sinds 2010 één- tot tweemaal per jaar worden ingewonnen. Sinds het vorige rapport (Gawehn, 2023) is één nieuwe opname uit juni 2023 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 het conceptuele model voor 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 2022

Gawehn (2023) constateerde dat over de meetperiode 2010-2022 zowel in het kombergingsgebied Pinkegat als in de Zoutkamperlaag de veranderingen in plaatareaal binnen de foutmarge van de metingen bleven. Daarmee liet de LiDAR data geen effecten van bodemdaling zien. Op de schaal van deelgebieden binnen de kombergingsgebieden zijn morfologische veranderingen groter dan de foutmarge van de metingen waargenomen. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen en het daarbij behorende sedimenttransport leiden tot veranderingen in plaathoogte die het effect van bodemdaling op lokale schaal versluieren. Een eenduidig bodemdalingssignaal in de morfologie kwam niet naar voren uit de LiDAR dataset. Dit kwam overeen met het feit dat geodetische modelberekeningen ook een verwaarloosbare invloed lieten zien ten opzichte van de natuurlijke morfodynamiek (Van der Vegt en Van der Lugt, 2022).

Om opeenvolgende LiDAR metingen nauwkeuriger met elkaar te kunnen vergelijken, is er de afgelopen jaren een correctiemethode ontwikkeld om systematische fouten weg te filteren aan de hand van de metingen op harde oppervlakten waarvan de hoogtes bekend zijn (Van der Lugt et al., 2019; Van der Lugt et al., 2020a; Van der Vegt & Van der Lugt, 2021). Door toepassing van de correctie zijn de meetfouten gereduceerd, wat er toe heeft geleid dat de geconstateerde areaalveranderingen beter te interpreteren zijn.

1.1.2 Status kennis morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat

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

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

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

1.2 Aanbevelingen MER commissie 2023

Deze paragraaf refereert naar het advies van de Auditcommissie "Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen" van 8 November 2023 (Commissie MER, 2023).

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

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

- Herhaal de InSAR opname met enige regelmaat. Dit is van belang voor de hoogteligging van de Ground Control Points. (Zie Appendix B)
- De commissie onderschrijft het feit dat hoge waterstanden bij harde wind gecombineerd met meer energierijke golven erosie van platen oplevert, maar dat de dataset voor golven nog te beperkt is voor een goede analyse. (Zie paragraaf 5.1)
- In de tijdreeksen van plaatareaal voor Pinkergat en Zoutkamperlaag, zou een regressielijn met standaardafwijkingen van de coëfficiënten de boodschap eenduidiger maken. (Zie Appendix C.2)

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 sedimentverdeling in de verticaal (boven NAP-0.5 m) verandert. Hoofdstuk 5 beschrijft de correlatie van de ontwikkeling van het plaatareaal in de verlengde meetreeks met meteorologische factoren en golfinformatie. Tenslotte worden in Hoofdstuk 6 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

2 Verwerken van LiDAR data

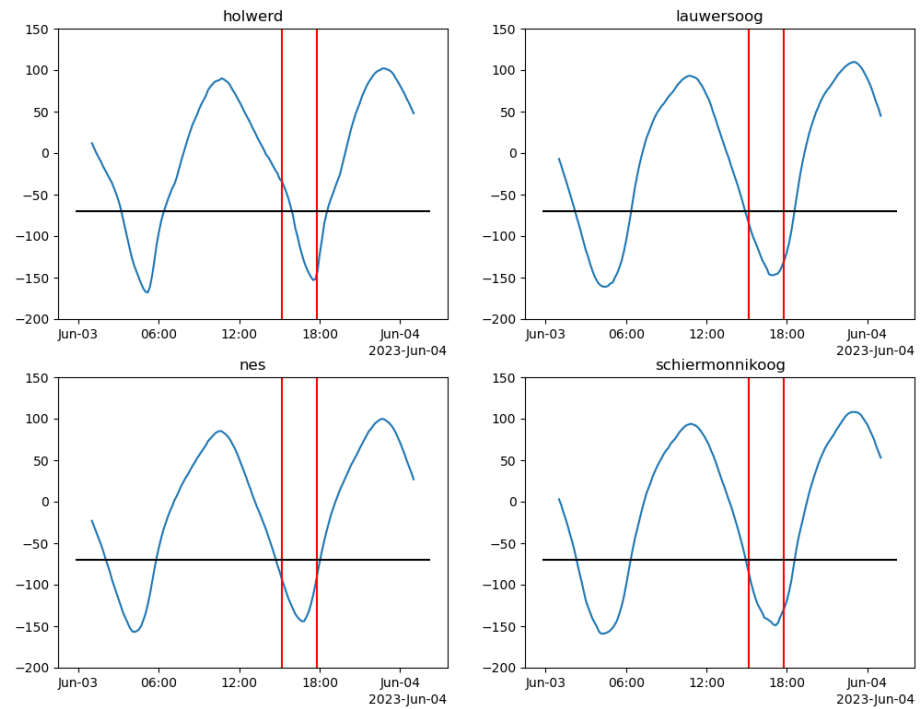
In dit hoofdstuk wordt de kwaliteit van de nieuwste LiDAR opnamen besproken. Daarnaast wordt de methodiek beschreven van opwerking van de LiDAR data tot een geschikte dataset voor het analyseren van plaatareaalveranderingen.

2.1 Beschrijving opnamen 2023

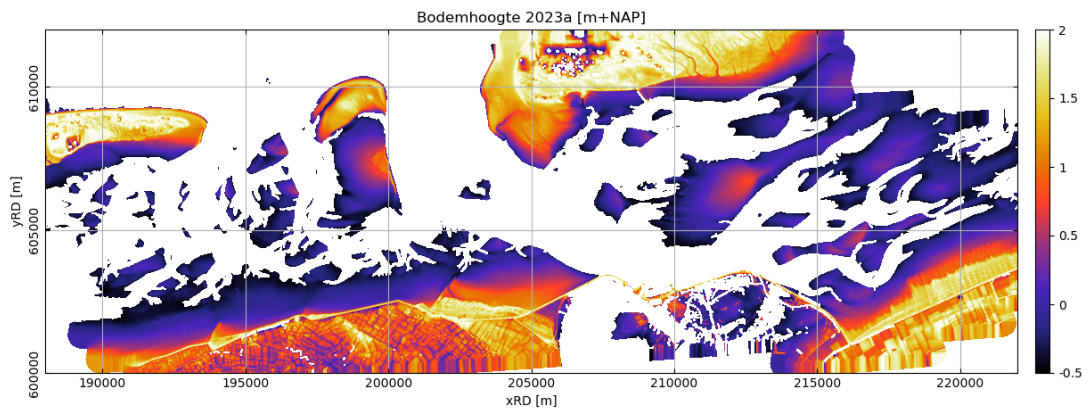
Op 3 Juni 2023 heeft Terratec wederom LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat gemaakt. Het rapport van Terratec (2023) beschrijft het vliegplan, de vlakdekking, puntendichtheid en de kwaliteitscontrole. Net als in de jaren 2020 tot 2022 is ook in 2023 een vluchthoogte van 1750 m aangehouden. De minimale 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, Schiermonnikoog en Holwerd, waarbij de waterstand op al deze stations lager dan NAP -0.7 m moet zijn. Hierdoor ligt er zoveel mogelijk plaatareaal droog tijdens de metingen. De opname in juni 2023 viel niet helemaal binnen het getijvenster bij station Holwerd (Figuur 2-1). Dit was voor deze locatie geen probleem omdat de vlieglijnen van noord naar zuid zijn ingewonnen en de zuidwestelijke hoek van het gebied niet in het eerste uur werd opgenomen. In het eerste uur werd een vlieglijn gevlogen van vlak onder Ameland tot vlak onder Schiermonnikoog (zie Terratec AS. 2023, vlieglijn 4 in Figuur 4). Terwijl de waterstanden bij het meetstation Schiermonnikoog lager waren dan NAP -0.7 m, bleken de waterstanden ten oosten daarvan, dicht bij het wantij, op enkele plekken NAP-0.5 m licht te overschrijden. Dit komt omdat de getijgolf van west naar oost loopt en de getijtrog nog net niet ver genoeg was doorgelopen. Om mogelijke effecten van deze overschrijding op wadplaatberekeningen te voorkomen, is deze vlieglijn 4 daarom niet gebruikt. Dit was geen probleem, gezien er voldoende overlap was tussen vlieglijnen (gemiddeld 55%, zie Terratec AS. 2023). De omliggende vlieglijnen 3 en 5 sloten op elkaar aan waardoor er ruim werd voldaan aan de minimale dekkingsgraad van 95% van het kombereingsgebied (Figuur 2-2).

De vlakdekking van de 2023 LiDAR opname bevat het gehele Friesche Zeegat (zie Terratec AS. (2023) en Figuur 2-2) en is vergelijkbaar met eerdere metingen. Een samenvatting van gegevens over meetdienst, instrumentgebruik en inwinduur bij elke opname is getabuleerd in Bijlage A.



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



Figuur 2-2 Hoogtekaart van de ingewonnen data in voorjaar 2023, na toepassing van correctievlak.

2.2 Opwerkingsprotocol

Voor de interpretatie van de NAM meetreeks is de 2023 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 (in 2023 is vlieglijn 4 weg gefilterd)
- Mediaan van de LAS punten binnen een roostercel bepalen op standaard 1x1m, 10x10m en 20x20m rooster, waarbij geen minimum aantal punten wordt aangehouden.
- Wegfilteren van roostercellen met minder dan 3 LAS punten uit het 10x10m rooster.

2.2.2 Correctie systematische afwijking

In de recente rapportages bleek een deel van de verschillen tussen opeenvolgende LiDAR opnamen te kunnen worden verklaard door systematische verschillen in het referentievlak van de puntenwolk. Door verschillen tussen opeenvolgende opnamen op 'harde oppervlakken' te minimaliseren, kan voor de systematische fout worden gecorrigeerd. Deze correctie wordt door NAM afgeleid. Hiervoor hanteren zij de hoogtekaarten op 1x1m van alle opnamen (2010-2023) als uitgangspunt.

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

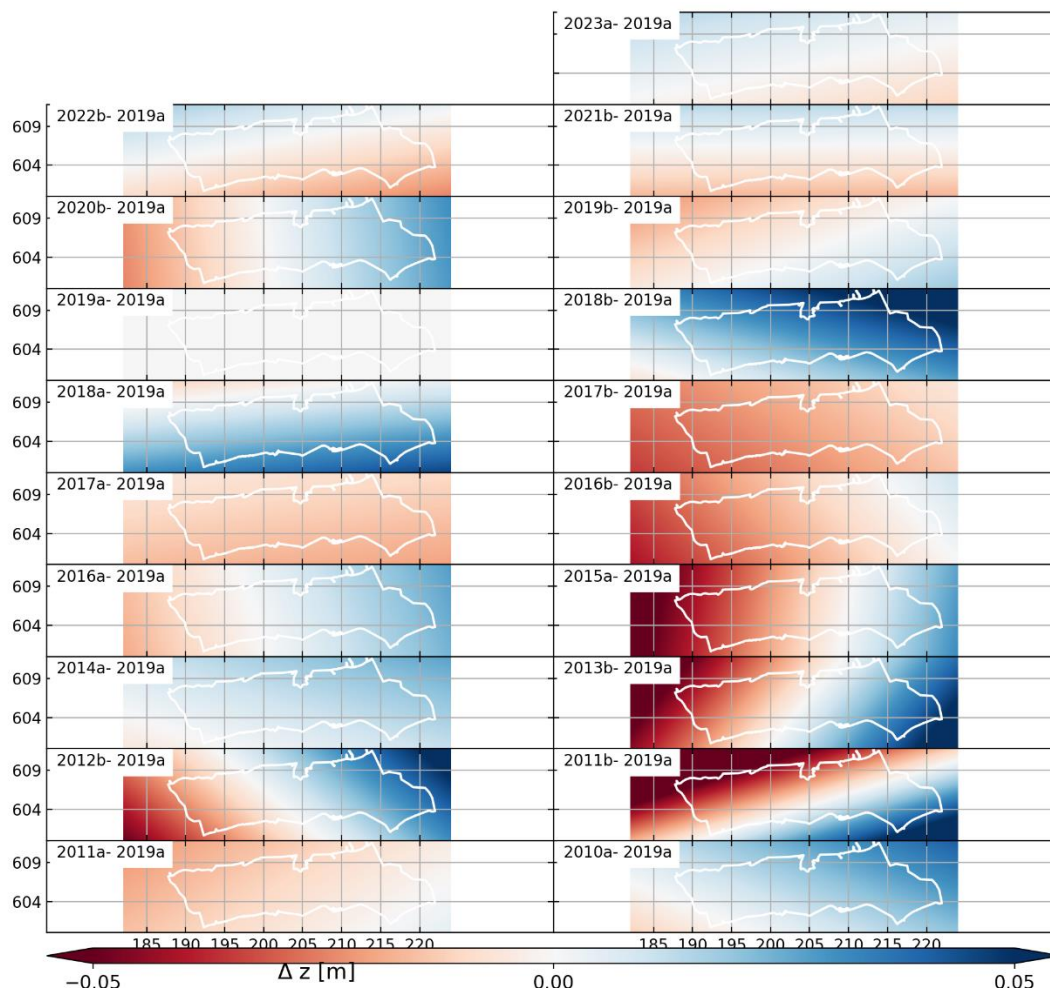
Hier vatten we het uiteindelijke stappenplan waartoe NAM is gekomen samen:

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

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

Tabel 2.1 Correctievlak coëfficiënten per survey.

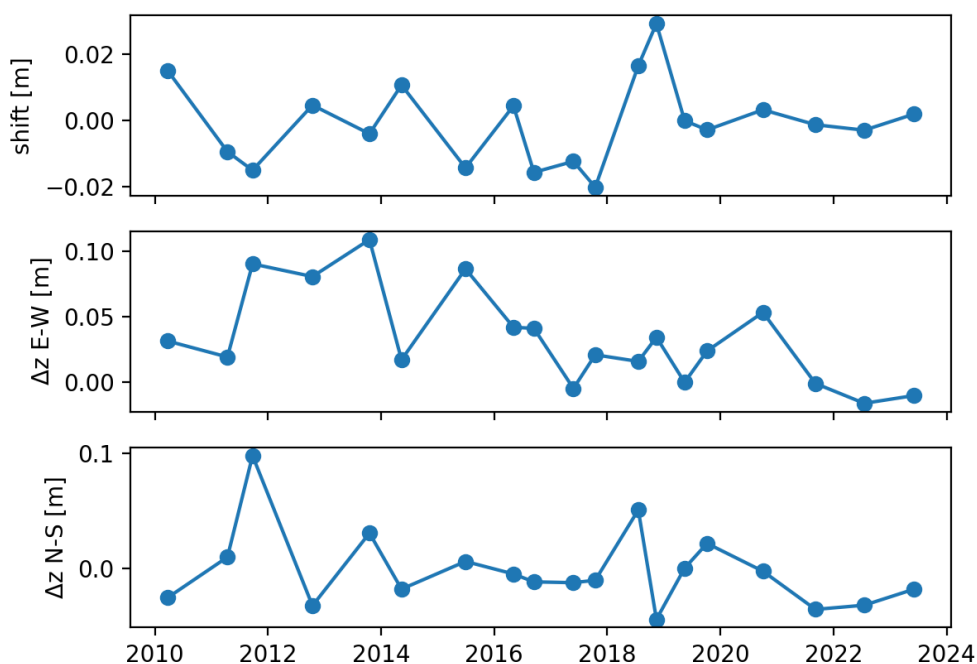
survey	a	b	c
2010a	0.00075	0.00183	-1.24615
2011a	0.00046	-0.00069	0.31541
2011b	0.00215	-0.00699	3.78454
2012b	0.00192	0.00233	-1.79706
2013b	0.00259	-0.00218	0.79136
2014a	0.00041	0.00130	-0.86028
2015a	0.00206	-0.00042	-0.17790
2016a	0.00100	0.00036	-0.41667
2016b	0.00098	0.00085	-0.72962
2017a	-0.00011	0.00090	-0.53534
2017b	0.00050	0.00075	-0.57608
2018a	0.00038	-0.00362	2.13316
2018b	0.00082	0.00318	-2.06426
2019a	0.00000	0.00000	0.00000
2019b	0.00057	-0.00154	0.81475
2020b	0.00127	0.00019	-0.36967
2021b	0.00002	0.00256	-1.54852
2022b	-0.00038	0.00230	-1.31953
2023a	-0.00024	0.00131	-0.74317



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

De effecten van de correctie zijn samengevat in Figuur 2-4. De vastgestelde effecten in dit rapport zijn consistent met de studie van 2023 (Gawehn, 2023), omdat het zelfde referentiejaar 2019a wordt gehanteerd. Opnamen worden gemiddeld genomen bijgesteld met -1.5 tot 3 cm (Figuur 2-4, bovenste paneel) en centreren rond 0 cm. Het verschil in de correctie tussen de oostrand van het domein en de westrand kan oplopen tot 10 cm (zie 2013b, middelste paneel Figuur 2-4), net als het verschil tussen de noordrand en de zuidrand (zie 2011b, onderste paneel Figuur 2-4). Voor de opname van 2023a zijn de correcties relatief klein en vergelijkbaar met de opnamen van 2021b en 2022b (Figuur 2-3 en Figuur 2-4).

plane coefficients wrt 2019a



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

2.2.3 Data overzicht

Voor de verdere analyse zijn in deze studie 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 teveel vlieglijnen buiten het getijdenster gevlogen, waardoor opvullen van het beeld met voorgaande metingen en omliggende observaties niet nuttig bleek. Voor een visueel overzicht van de kaartbeelden 2010-2018 verwijzen we naar Van der Lugt et al. (2019), en voor de recentere kaartbeelden van 2019-2022 verwijzen wij naar de corresponderende jaarlijkse rapporten (Van der Lugt et al., 2020a; Van der Vegt en Van der Lugt, 2021,2022; Gawehn 2023). De nieuwe dataset van 2023 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

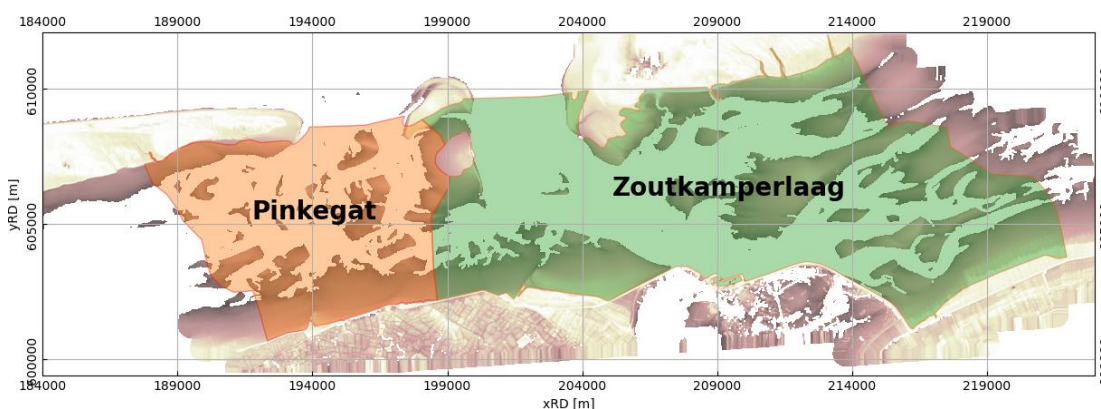
In dit hoofdstuk rapporteren we de ontwikkeling van het plaatareaal voor zowel de kombergingsgebieden als individuele platen op basis van 10x10 m grids van de LiDAR opnamen van 2010 tot en met 2023. Ook plaatsen we deze observaties in de context van de Vaklodingen dataset van Rijkswaterstaat. Alle ontwikkelingen vinden plaats binnen een marge van meetonzekerheid, welke verschilt per LiDAR data inwinning.

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 afgelopen jaar (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 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. Naar aanleiding van het advies van de commissie m.e.r (zie paragraaf 1.2) zijn in deze rapportage ook lineaire regressielijnen opgenomen. Echter kunnen er geen uitspraken worden gedaan op basis van deze regressielijnen door het beperkte aantal meetpunten en de grote verschillen in de kwaliteit van de LiDAR opnamen. De regressielijnen zijn daarom opgenomen in Appendix C.2.

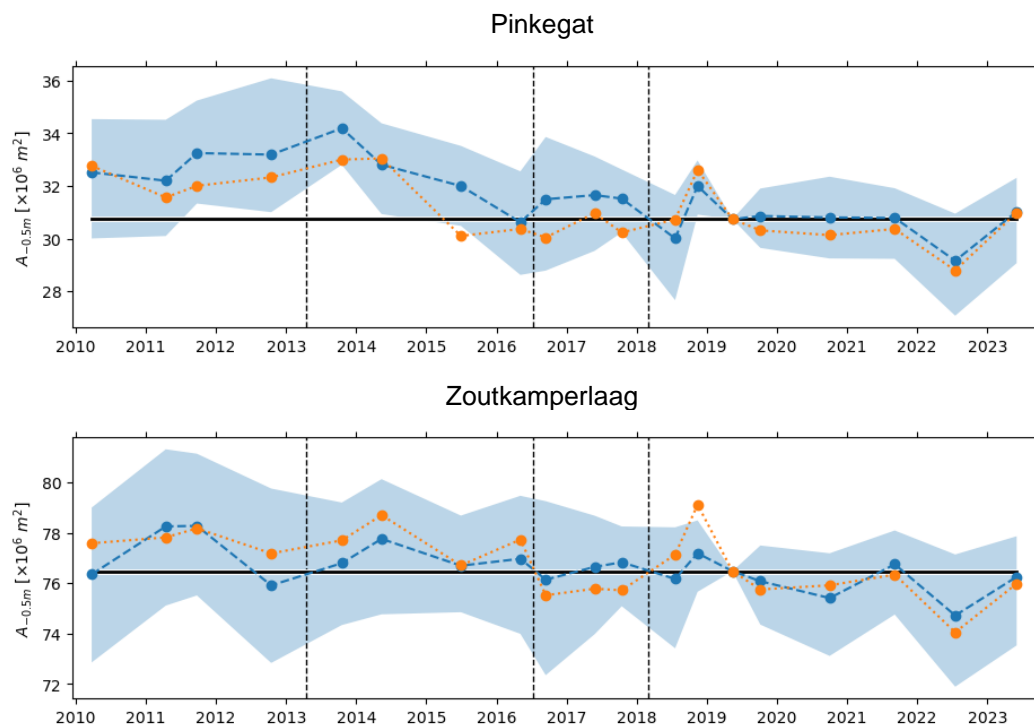


Figuur 3-1 Analysepolygoenen voor areaalontwikkeling op kombergingsschaal. Deze polygoenen zijn hetzelfde als in voorgaande jaren.

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 een

licht dalende trend in het signaal te zitten, echter voor de recente periode 2016 tot 2022 is het areaal vrij stabiel (wat ook blijkt uit berekende lineaire trends voor deze periode, zie Appendix C.2). De meetdienst en het type laserscanner zijn juist in deze periode veranderd (zie ook Tabel A.1), waardoor het moeilijk is om morfologische trends te onderscheiden van mogelijk foutieve trends die veroorzaakt worden door kwaliteitsverschillen met LiDAR data uit de periode 2010-2016. Als men het begin 2010 en het eind 2023 van de metingen bij het Pinkegat beschouwd, kan het plaatareaal volgens de onzekerheidsmarge geheel onveranderd zijn (Figuur 3-2, blauwe onzekerheidsbanden rond 2010 en 2023 overlappen met zwarte referentielijn). Deze observatie is vergelijkbaar met de Zoutkamperlaag (zie ook Appendix C.2). Hier wordt voor de gehele periode 2010-2023 maar weinig verandering van plaatareaal geobserveerd. Vergelijkt men de situatie van 2010 met 2023 is zelfs nagenoeg niets veranderd aan het totale plaatareaal van de Zoutkamperlaag (zie Figuur 3-2: gecorrigeerde LiDAR metingen van 2010 en 2023 liggen op zelfde hoogte op de horizontale referentielijn).

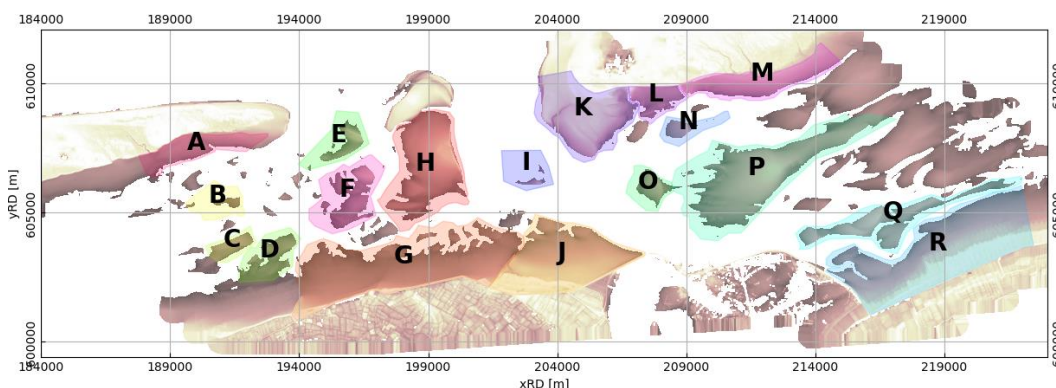
Over het algemeen zijn de plaatontwikkelingen in opeenvolgende jaren vaak een order groter dan de ontwikkelingen op langere termijn: De specifieke LiDAR meting van 2023 laat zien dat de plaatarealen in zowel de Zoutkamperlaag als ook het Pinkegat binnen één jaar zijn toegenomen met 2 km² en daarmee zijn hersteld van de dip in 2022 (zie Gawehn, 2023). Toch zijn zelfs deze fluctuaties relatief klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge rondom de metingen (Figuur 3-2, blauwe onzekerheidsband) en zullen de tijdsreeksen van plaatarealen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag 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 -0.5m voor de kombegingsgebieden 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

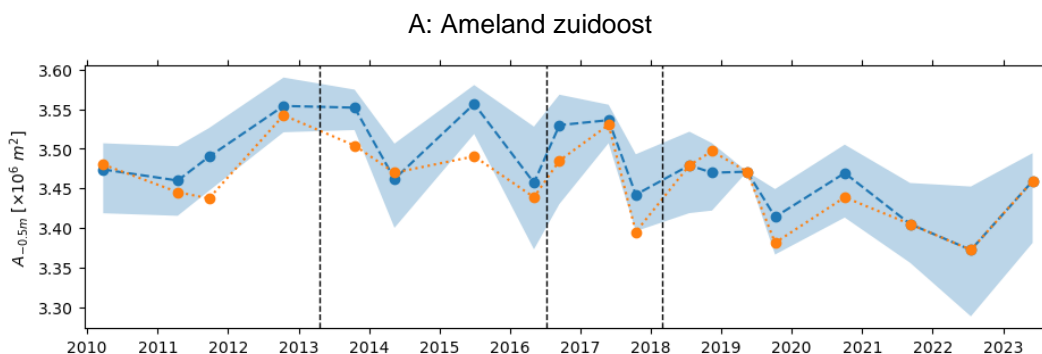
Op geaggregeerd kombergingsniveau is geen structurele ontwikkeling in areaal af te leiden. Dit komt deels door de kwaliteitsverschillen van opeenvolgende LiDAR data, deels door de lange tijdschaal waarop structurele veranderingen kunnen worden vastgesteld (zie paragraaf 3.4), maar ook omdat op geaggregeerde ruimtelijke schaal de ontwikkeling van verschillende platen tegen elkaar wegvallen. Op het niveau van individuele platen vinden wel significante ontwikkelingen plaats, die ook met de LiDAR opnamen duidelijk waar te nemen zijn. Om deze ontwikkelingen te onderzoeken, is een aantal platen (plaatsystemen) nader beschouwd. Deelgebieden (Figuur 3-3) zijn geselecteerd aan de hand van eerdere rapportages en zijn geoptimaliseerd om, waar mogelijk, migrerende platen volledig te omvatten gedurende de tijdreeks. In gebieden met veel dynamiek en kleinere geulen is dat niet eenvoudig, bv. in het westen van het Pinkegat kombergingsgebied (B, C, D). Hier kunnen ook meerdere platen gedeeltelijk door een deelgebied migreren gedurende de tijd die de LiDAR dataset beslaat.



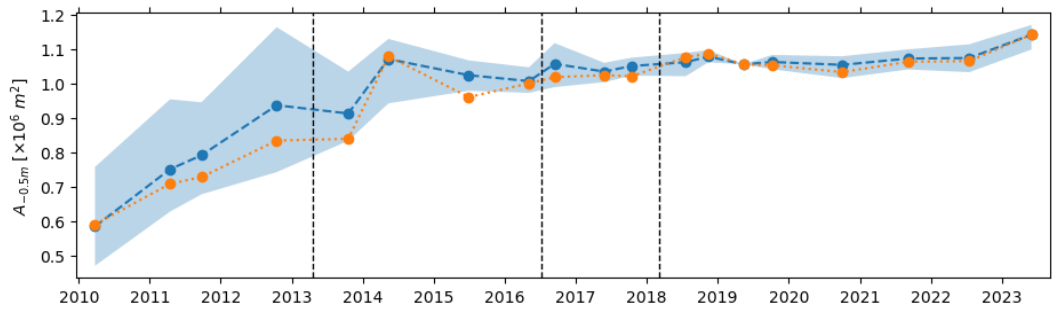
Figuur 3-3 Overzicht van (delen van) platen die individueel zijn bestudeerd.

3.3.1 Pinkegat kombergingsgebied (A – F)

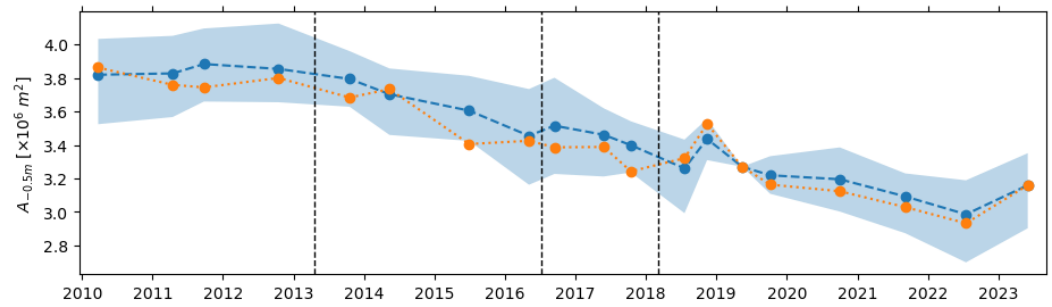
De areaalontwikkeling van individuele platen in het Pinkegat verschilt en kan stijgen en dalen (Figuur 3-4). Bijvoorbeeld in deelgebied A schommelt het plaatareaal sterk, met grote onzekerheid. Het areaal lijkt tussentijds licht te dalen, maar in 2023 is het plaatniveau nagenoeg weer het zelfde als in 2010. 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.



C: Pinkegat west-2



F: Pinkegat oost-2

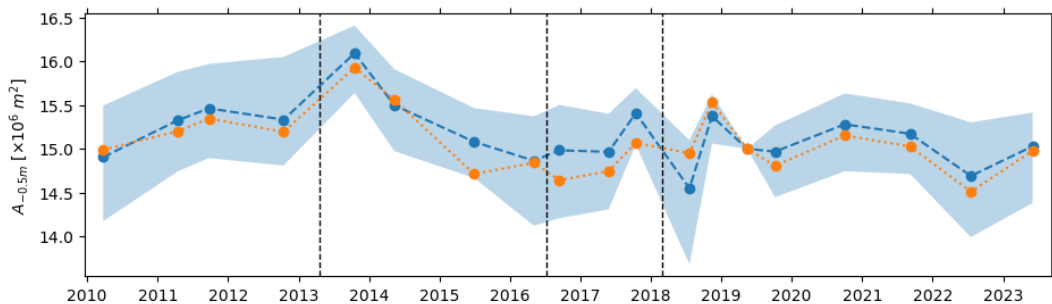


Figuur 3-4 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor enkele voorbeelden van platen in het Pinkegat (A, C, F in Figuur 3-3). De oranje reeks (---o---) toont de originele data en de blauwe reeks (---o---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de correctie.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

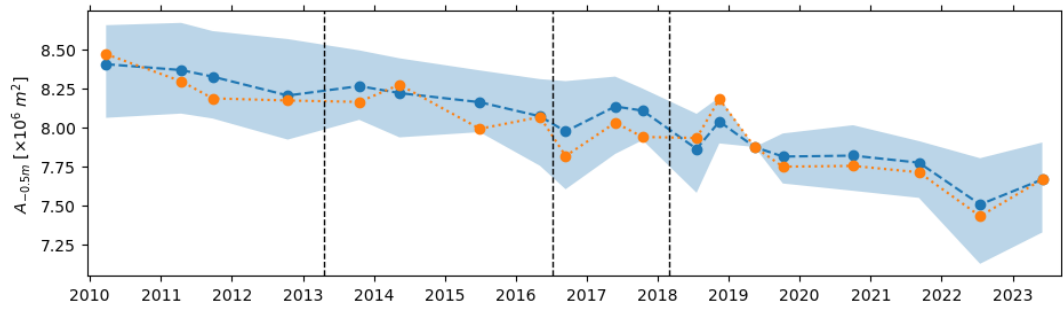
3.3.2 Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G-H)

Het plaatareaal op het Wierumerwad (G, Figuur 3-5) blijft grotendeels constant met geringe fluctuaties ten opzichte van de onzekerheidsmarge. Het areaal van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5) krimpt licht. Kijkend naar de lokale geuldynamiek (Figuur 3-6) blijkt dat dit een gevolg is van de uitbochtiging van de geul ten westen van deze plaat, en daardoor onderdeel is van de natuurlijke morfologische dynamiek.

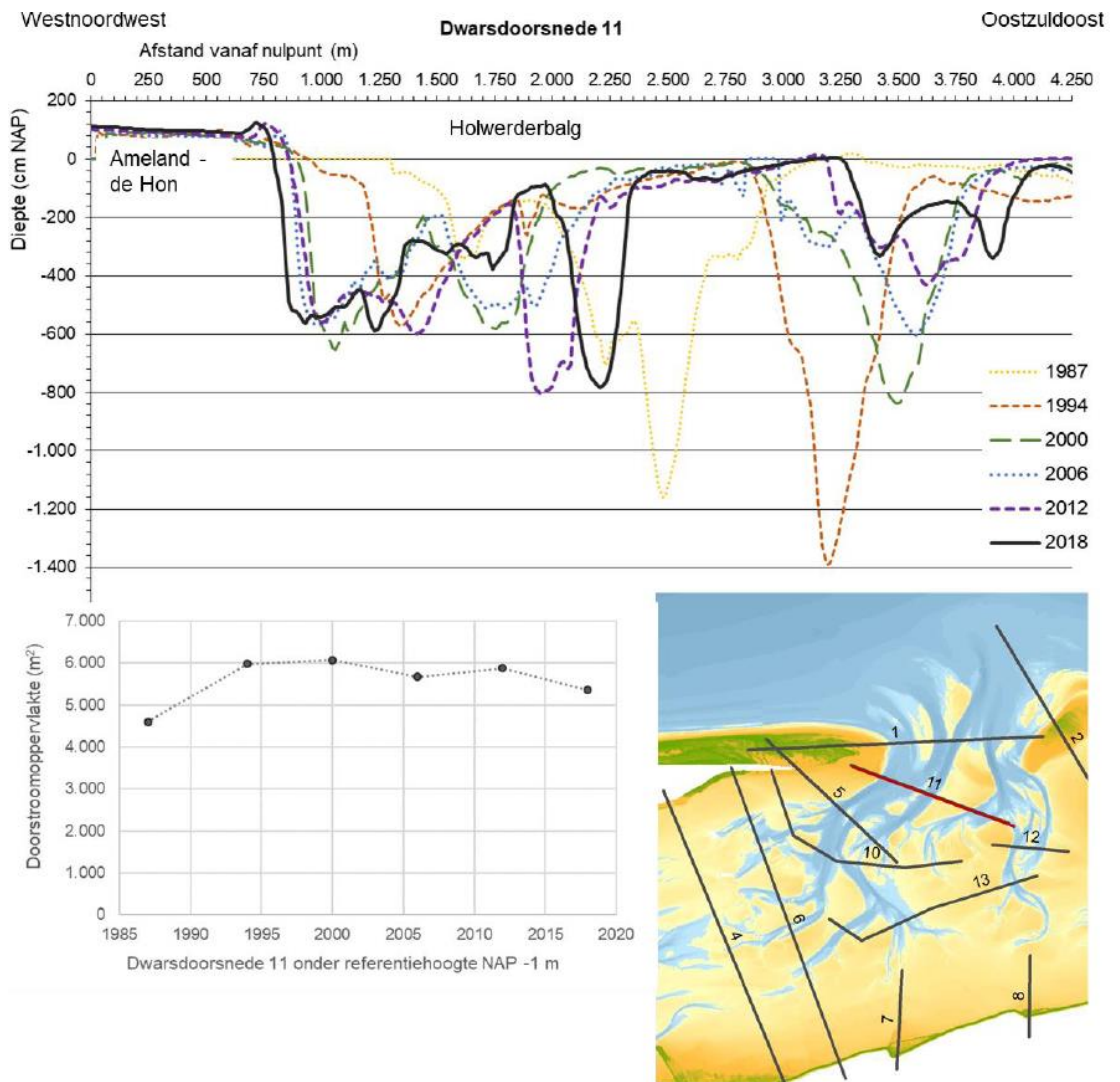
G: Wierumerwad



H: Engelsmanplaat



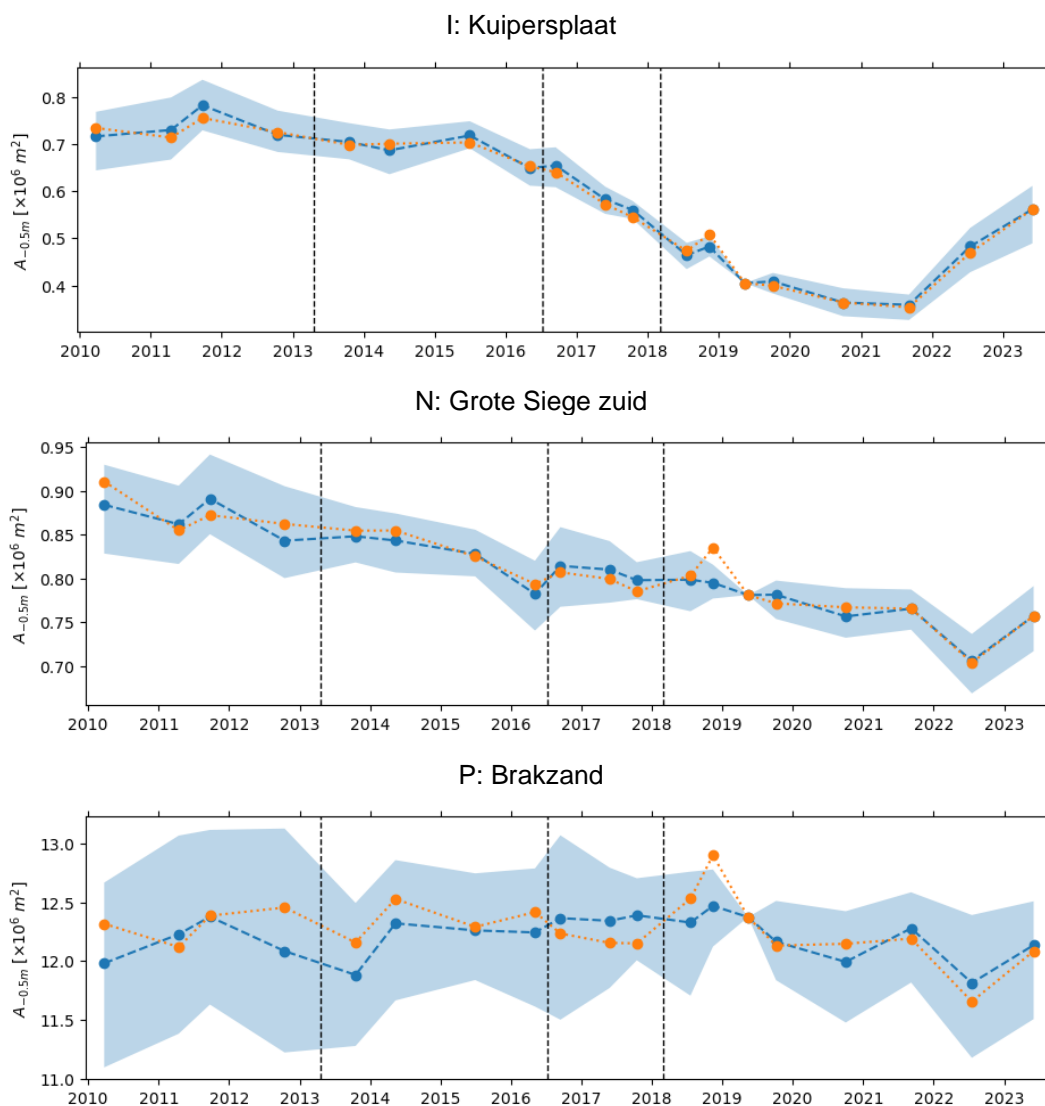
Figuur 3-5 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor platen op het Wierumerwad en de Engelsmanplaat (G-H in Figuur 3-3). De oranje reeks (-.-.-) toont de originele data en de blauwe reeks (-.-.-) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de correctie.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



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

3.3.3 Zoutkamperlaag(I-R)

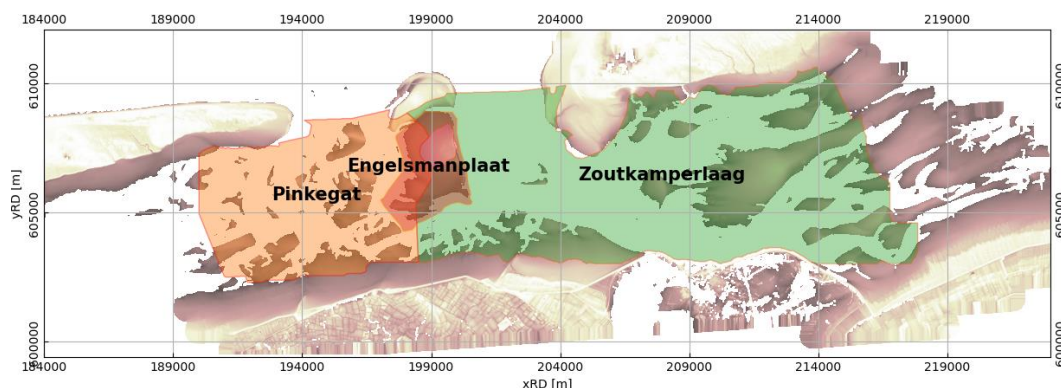
De platen in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag vallen buiten het sterkste bodemdalingsgebied en worden hier ter referentie besproken. Ook in de Zoutkamperlaag zien we hoe natuurlijke dynamiek kan bijdragen aan het krimpen van platen, voornamelijk in de buurt van de grotere geulen, zie bijvoorbeeld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



Figuur 3-7 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor enkele voorbeelden van platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (I,N,P 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.

3.4 Langetermijntrends

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



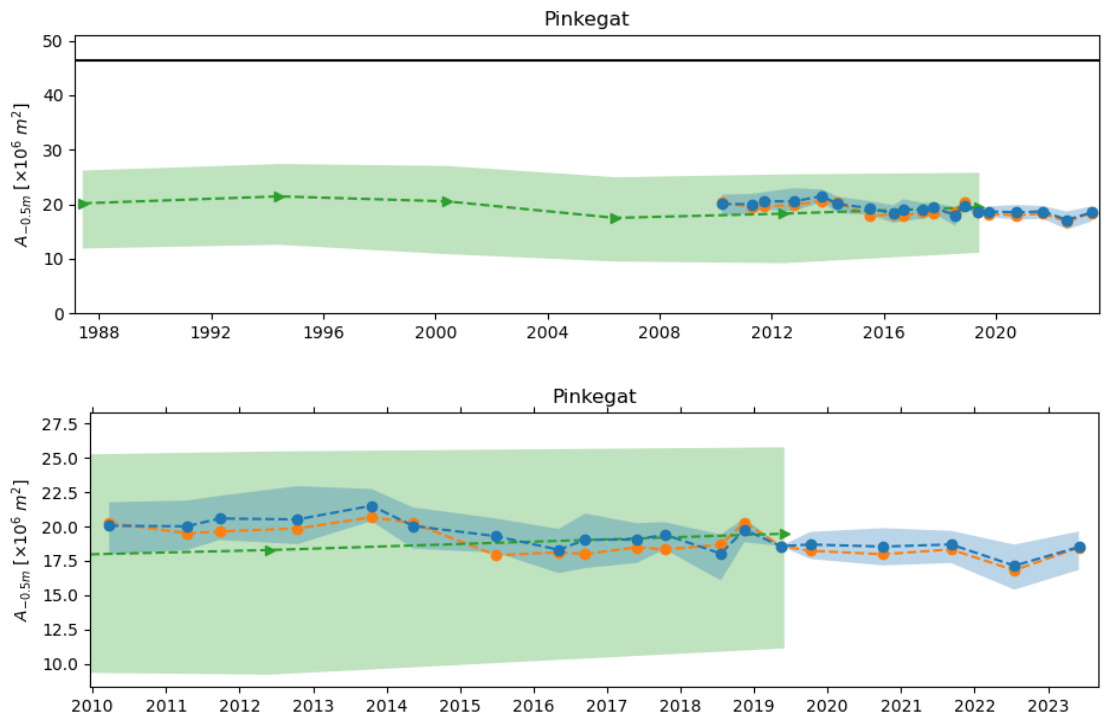
Figuur 3-8 De bijgesneden polygonen voor de analyse van langetermijntrends. Bijsnijding heeft plaatsgevonden op basis van de vlakdekking van de Vaklodingenreeks.

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

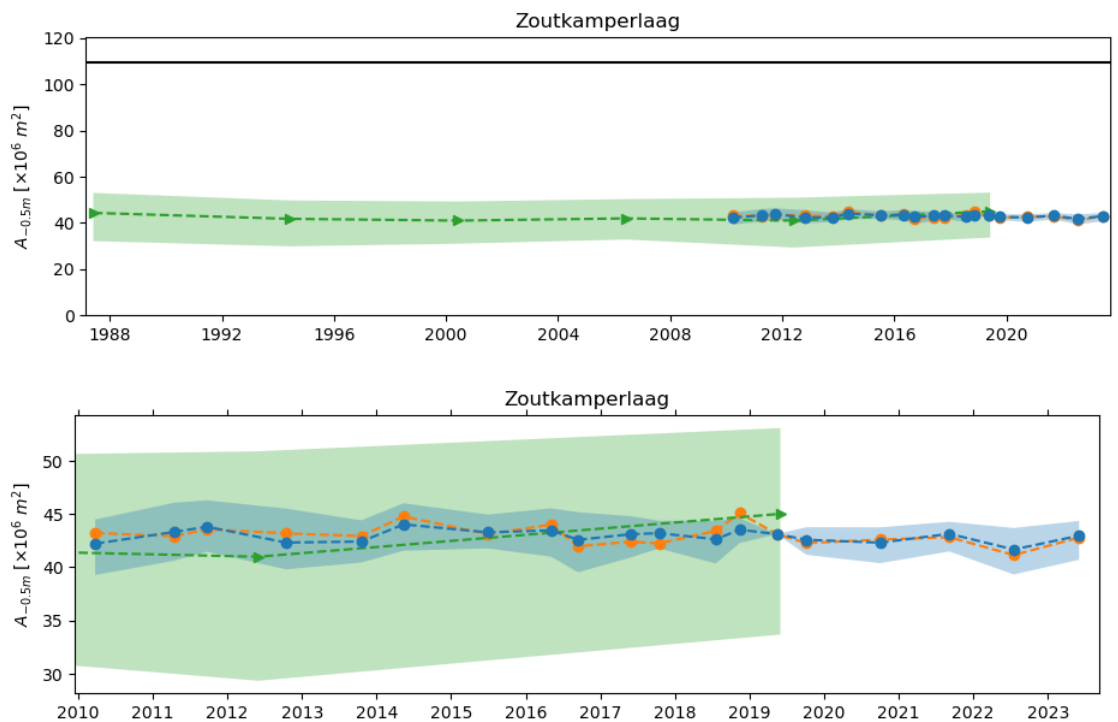
De uit de Vaklodingen afgeleide arealen met onzekerheidsmarges overlappen volledig met de arealen en onzekerheidsmarges van de LiDAR metingen. In Vaklodingen zijn de gegevens voor plaatgebieden eveneens gebaseerd op LiDAR opnamen. Verschillen met de NAM LiDAR kunnen, naast inherente verschillen in de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

Op basis van de NAM data bleek de variabiliteit in de ontwikkeling van het plaatareaal boven NAP-0.5m in het Pinkegat groter te zijn dan in de Zoutkamperlaag. In de RWS dataset is dit verschil in variabiliteit ook te zien, zij het dan op een langere termijn. 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 km^2 . Voor de kortere periode tussen 2000 en 2006 is dit zelfs -0.50 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. De schommelingen in plaatareaal zijn waarschijnlijk deels te wijten aan meetnauwkeurigheid maar ook aan natuurlijk periodiek systeemgedrag van de kombergingsgebieden. Zo is het geulsysteem van het Pinkegat dynamisch en herhalen zich gedragspatronen (Elias & Oost, 2020). Zowel de LiDAR data als ook de Vaklodingen geven geen directe aanwijzingen op effecten van diepe bodemdaling op plaatareaal in het Friesche Zeegat.

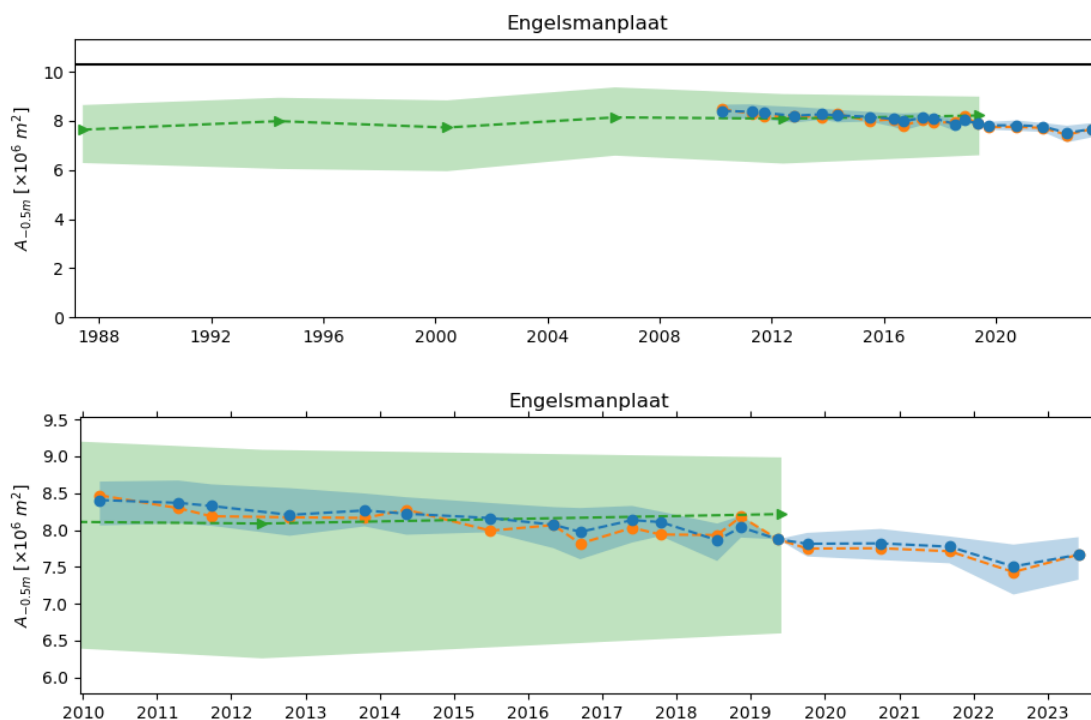


Figuur 3-9 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m voor het Pinkegat kombergingsgebied tussen Vaklodingen (groen \dashrightarrow), de originele NAM LiDAR data (oranje, \dashrightarrow), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, \dashrightarrow). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van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



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

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



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

3.5 Conclusies areaalontwikkeling

Het gerapporteerde plaatareaal in de Zoutkamperlaag is constanter dan in het Pinkegat. Voor het Pinkegat laat de LiDAR meetreeks 2010-2023 een lichte afname van plaatareaal zien. De deelgebiedsanalyse toont aan dat dit met name komt door kleiner wordende platen in de centraal gelegen gebieden, Pinkegat west-1 (B, Figuur 3-4), Pinkegat oost-2 (F, Figuur 3-4) en het westelijke deel van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5) waar een verbreding en uitbochtiging van de geul optreedt. Deze afname is klein ten opzichte van de 95% onzekerheidsmarge in de gecorrigeerde bodemhoogte. De opname van 2023 laat een toename van plaatareaal zien van zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag en herstelt de voorgaande afname van plaatareaal geobserveerd in 2022 (zie ook Gawehn, 2023). De fluctuatie is vergelijkbaar met fluctuaties in voorgaande jaren en relatief klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge. Wanneer de LiDAR metingen tussen 2010-2023 worden geplaatst in de context van lange termijn ontwikkelingen in de Vaklodingen tussen 1987-2019, dan zijn de geobserveerde plaatveranderingen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag insignificant.

Hoewel de ontwikkeling van het plaatareaal op kombergingsniveau geen significante verandering laat zien, toont de analyse van deelgebieden aan dat veranderingen in plaatareaal in actieve (deel)gebieden wel degelijk kunnen worden gemonitord met LiDAR.

Hieruit concluderen we dat de eventuele trend op kombergingsniveau zo klein is dat het totale plaatareaal zich niet buiten de onzekerheidsband ontwikkelt. Er vindt geen significante aangroei van het totale plaatareaal plaats, en ook geen significante afname.

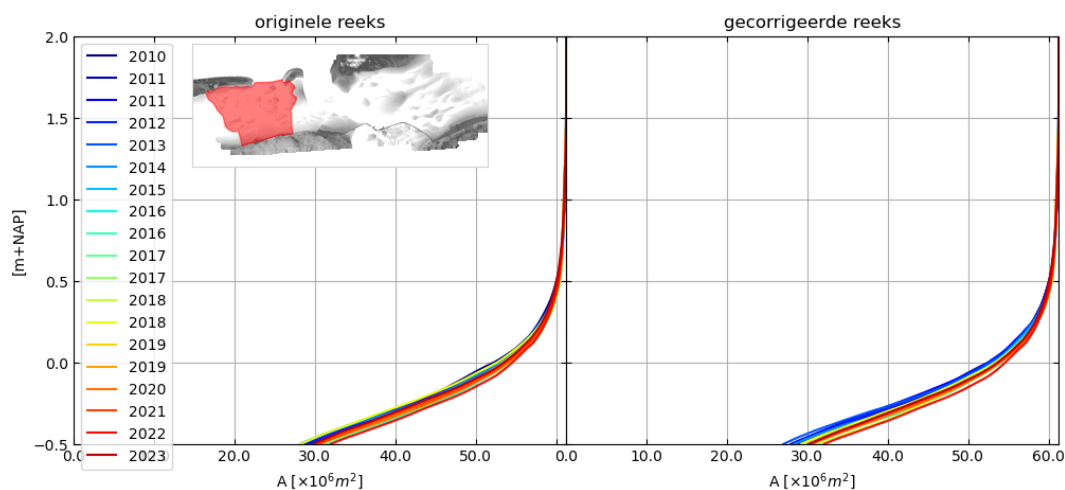
4 Analyse ontwikkeling plaathoogte

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 de deelgebieden, om zo de veranderingen in de hypsometrie beter te verklaren. Daarnaast wordt een aantal dwarsdoorsnedes gepresenteerd om lokale veranderingen in kaart te brengen. Dezelfde kombergings- en deelgebieden als in Hoofdstuk 3 worden geanalyseerd, zie Figuur 3-1 voor de kombergingsgebieden en Figuur 3-3 voor de deelgebieden.

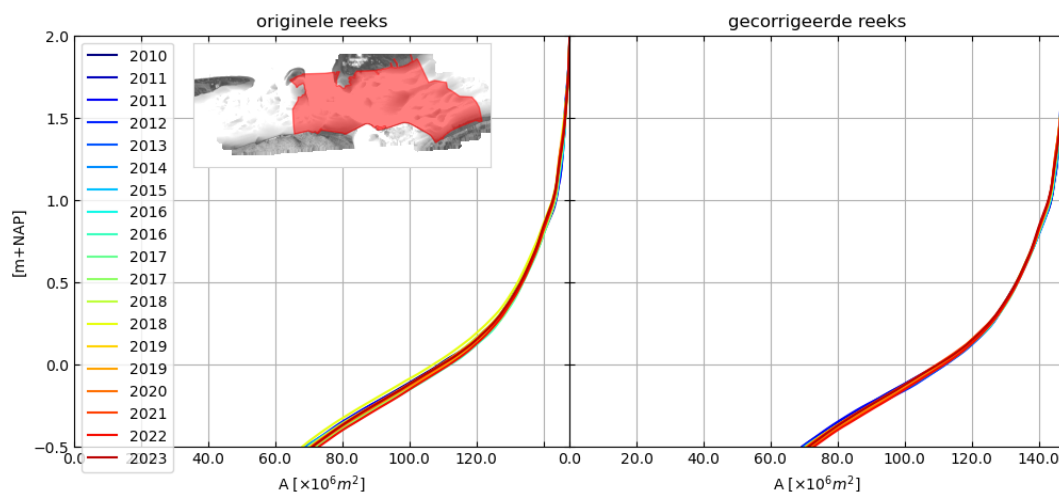
4.1 Hypsometrie kombergingsgebieden

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

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



Figuur 4-1 Hypsometrische curven voor het Pinkegat kombergingsgebied. Op de horizontale as is het oppervlak van de wadplaten bij een hoogte op de verticale as geplote. 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).

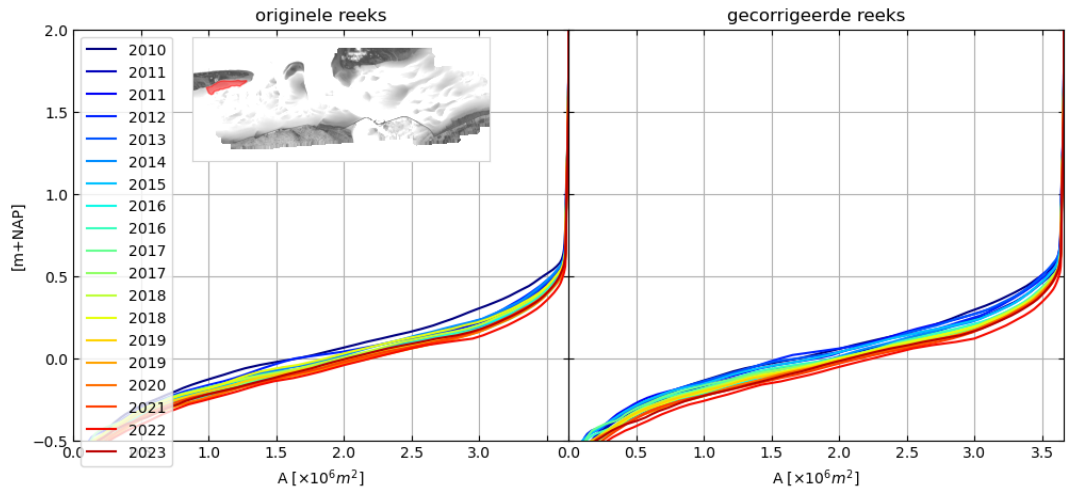
4.2 Hypsometrie individuele platen

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).

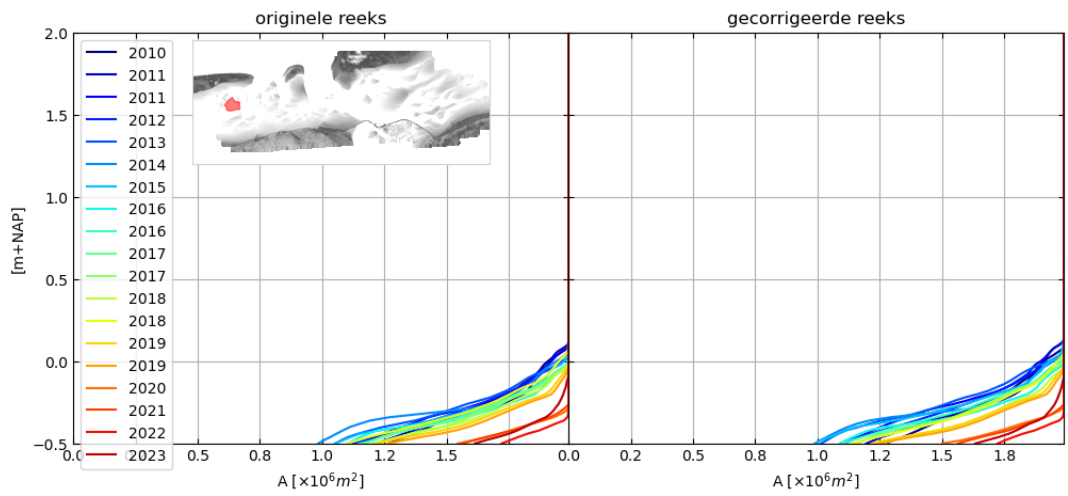
Uit de areaalontwikkeling van platen boven NAP-0,5m leiden we af dat de bodemdaling mogelijk invloed had op de areaalontwikkeling in het gebied ten zuiden van Ameland-oost (A). De hypsometrische curven laten zien dat bij iedere te kiezen referentiehoogte in gebied A het plaatareaal vrij monotoon afneemt.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

De drie meest westelijke platen, pal tegen het wantij gelegen (B, C, D), liggen voornamelijk onder NAP+0m en laten een duidelijke verlaging (B), ophoging (C) of een vrij stabiele ontwikkeling (D) zien. Het areaal van deze platen verandert over de hele tijdsduur van de dataset. Terwijl het areaal van de meest noordelijke van deze platen (B) duidelijke afneemt, vooral in de meest recente jaren, is de centrale plaat (C) in de monitoringsperiode duidelijk gegroeid: een hoogtetoename van 30-40 cm heeft er voor gezorgd dat deze plaat is verdubbeld in oppervlak (contour NAP-0,5m; Figuur 4-3 C). De twee platen in het oosten van het kombergingsgebied Pinkegat (E, F) laten een ander soort ontwikkeling zien. Plaat Pinkegat oost-1 (E) is over het algemeen beneden ca. NAP-0,1m in oppervlakte toegenomen, terwijl daarboven de oppervlakte en hoogte afnam. Vanaf het jaar 2022 lijkt er wat materiaal te worden herverdeeld en schuift materiaal van onder -0.4m omhoog en materiaal van boven NAP +0.3m schuift omlaag. Plaat Pinkegat oost-2 (F) laat een tegenovergestelde ontwikkeling zien: beneden ca. NAP+0,2m neemt het plaatoppervlak af, daarboven groeit het oppervlak en neemt de hoogte toe. De eerste plaat vakt als het ware af, de tweede plaat versteilt.

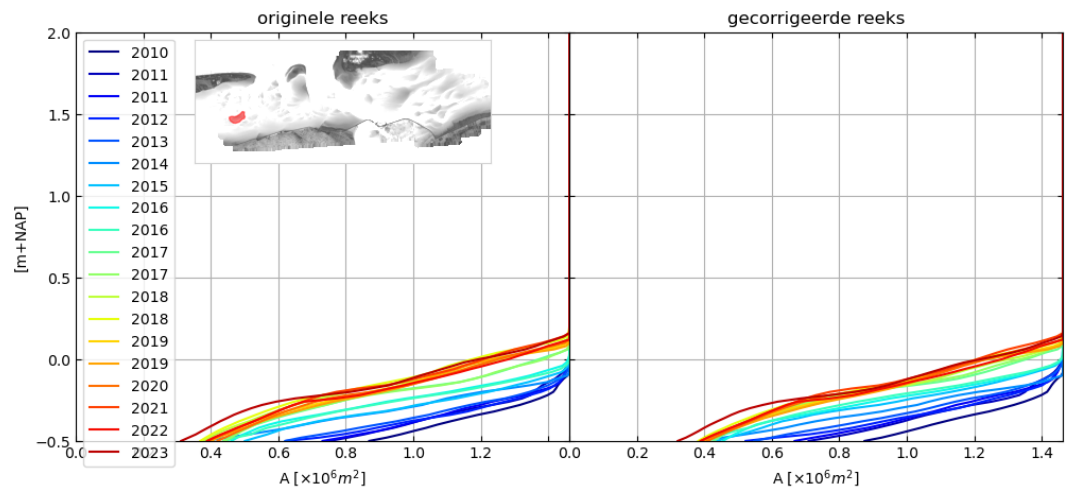
A: Ameland zuidoost



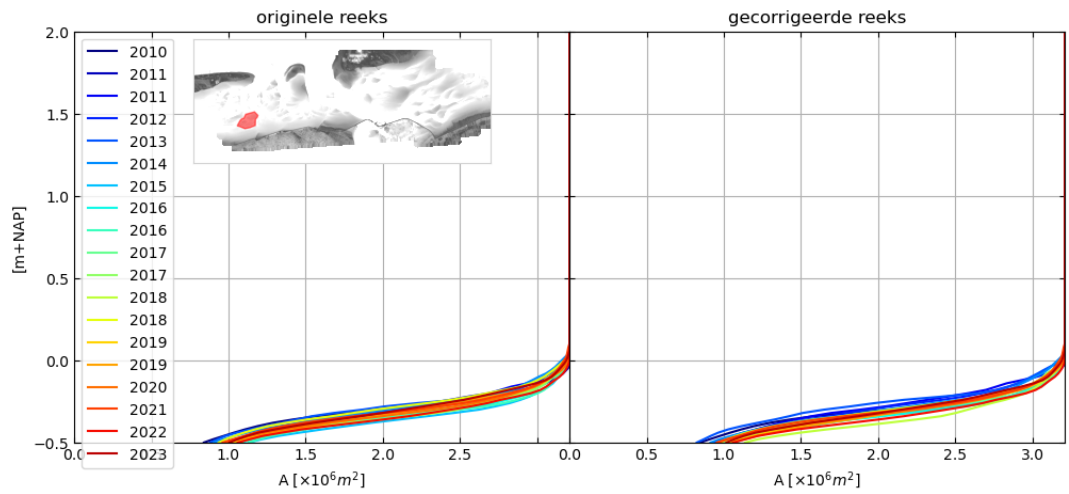
B: Pinkegat west-1



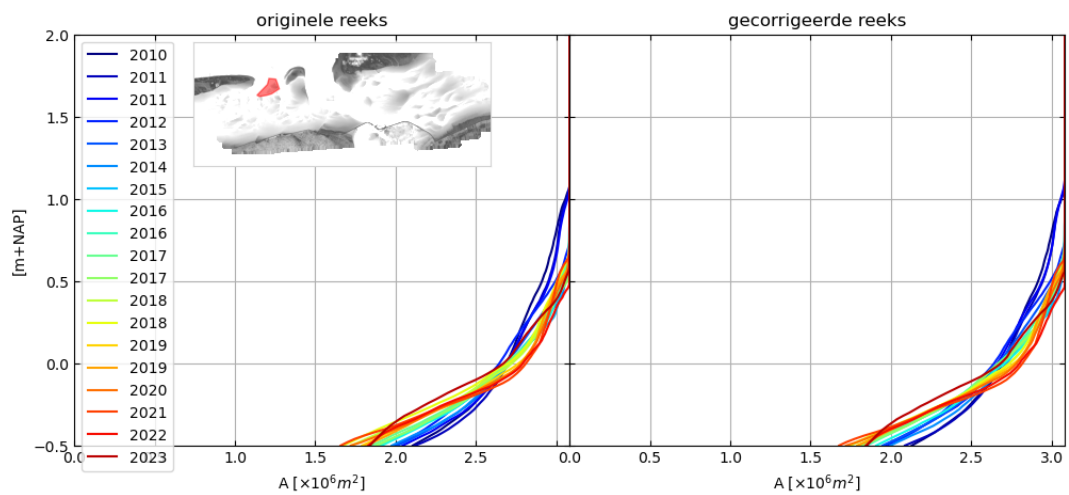
C: Pinkegat west-2



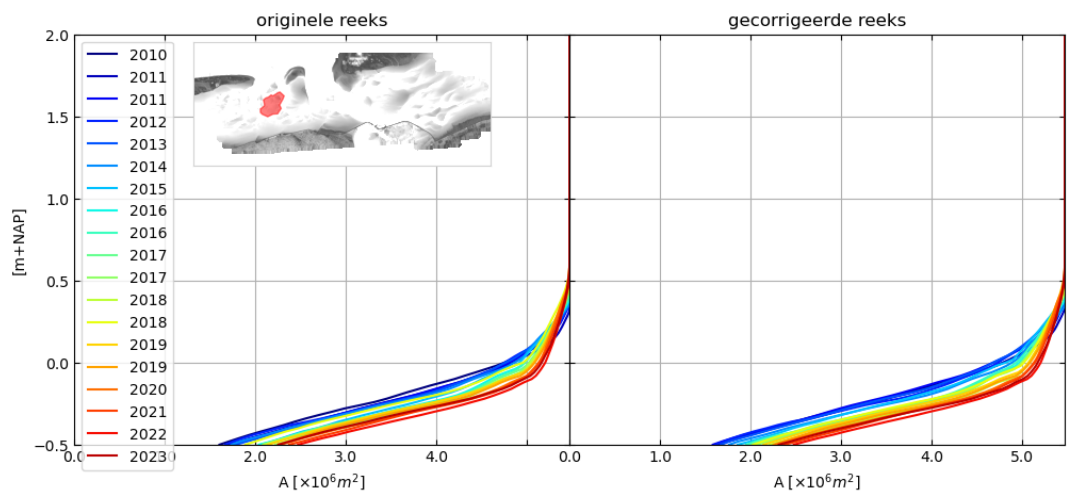
D: Pinkegat west-3



E: Pinkegat oost-1

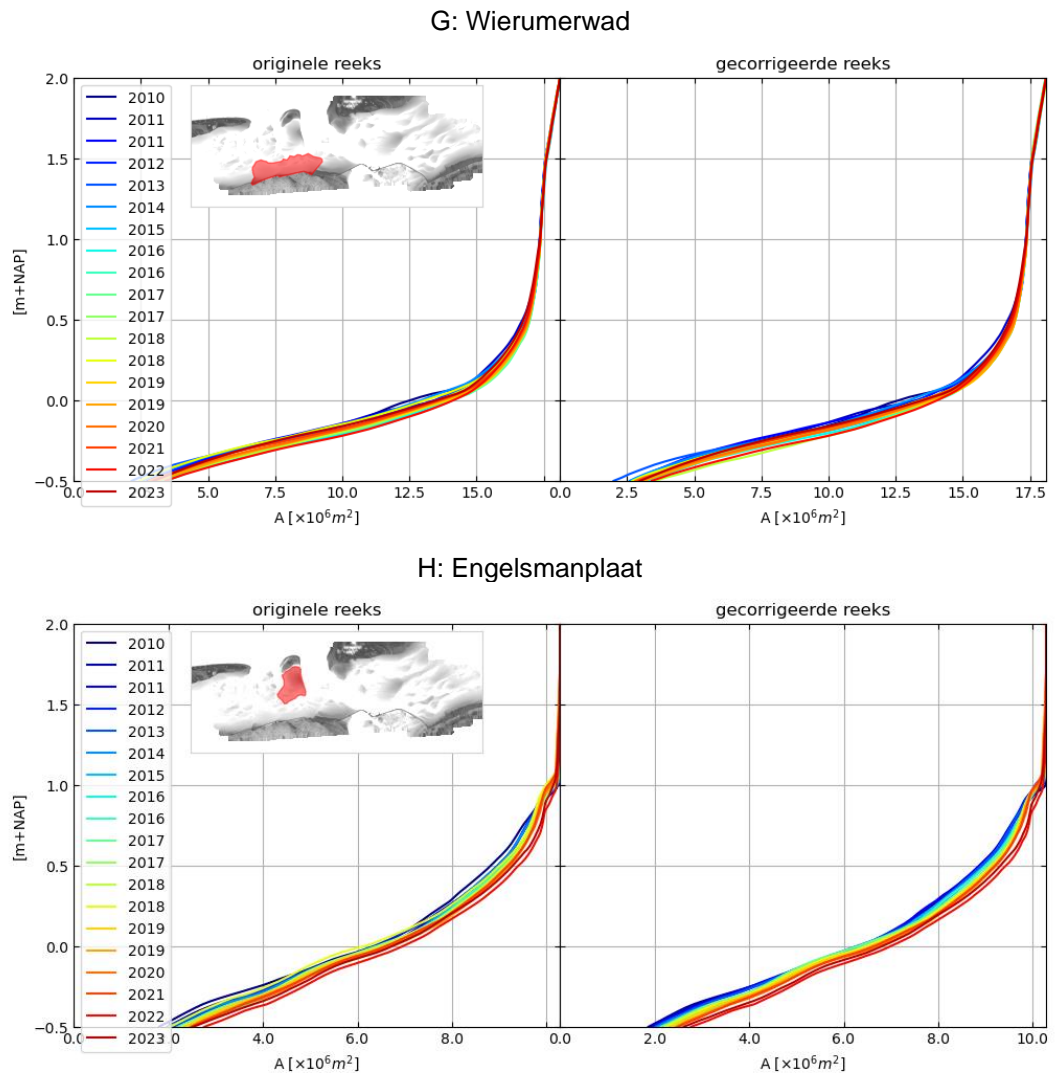


F: Pinkegat oost-2



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

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



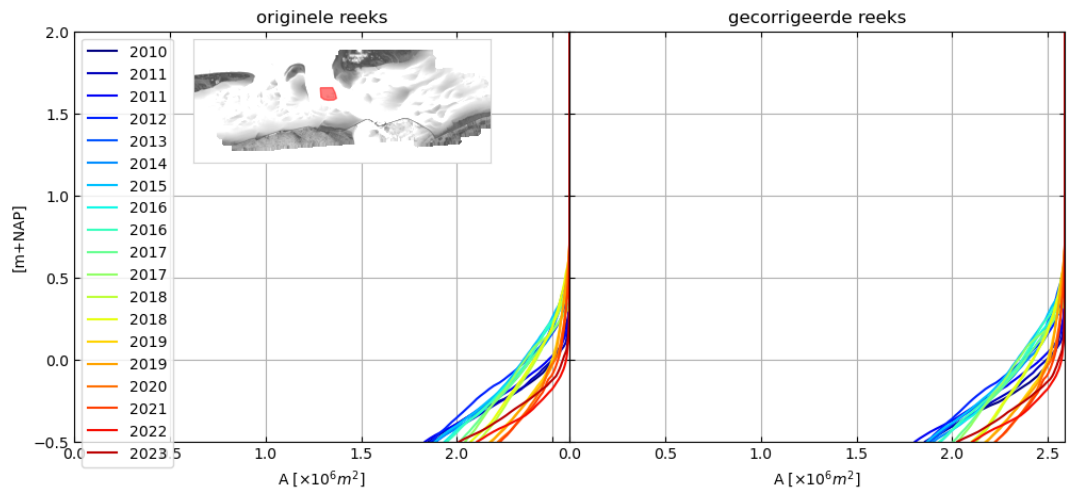
Figuur 4-4 Hypsometrische curven voor de platen tussen de Pinkegat en Zoutkamperlaag kombergingsgebieden. Op de horizontale as is het wateroppervlak horende bij een hoogte op de verticale as geplott. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus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

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

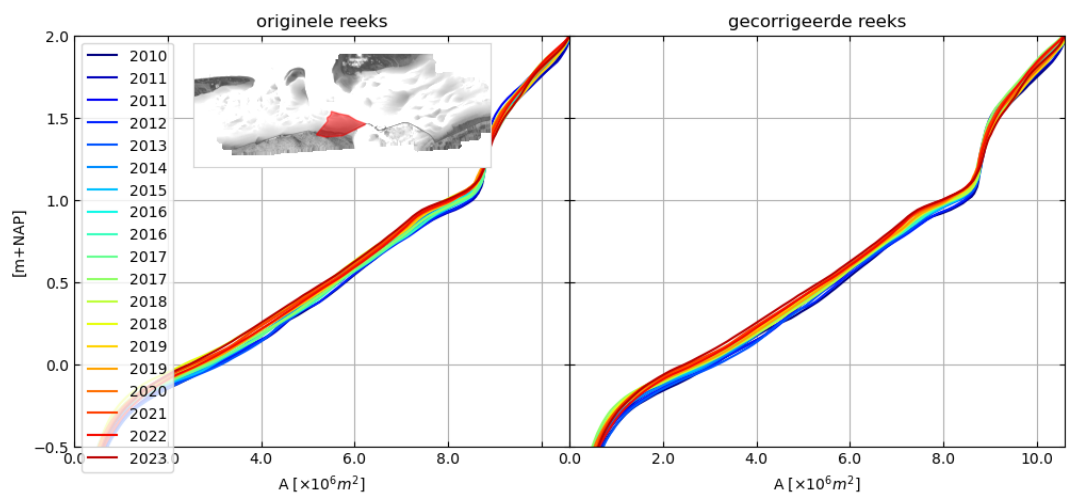
Siege Zuid (N) en Zoutkamperlaag zuidoost-1 (Q) groei in hoogte boven NAP+1m , NAP+0m en NAP-0,25m respectievelijk, en een afname in hoogte daaronder.

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

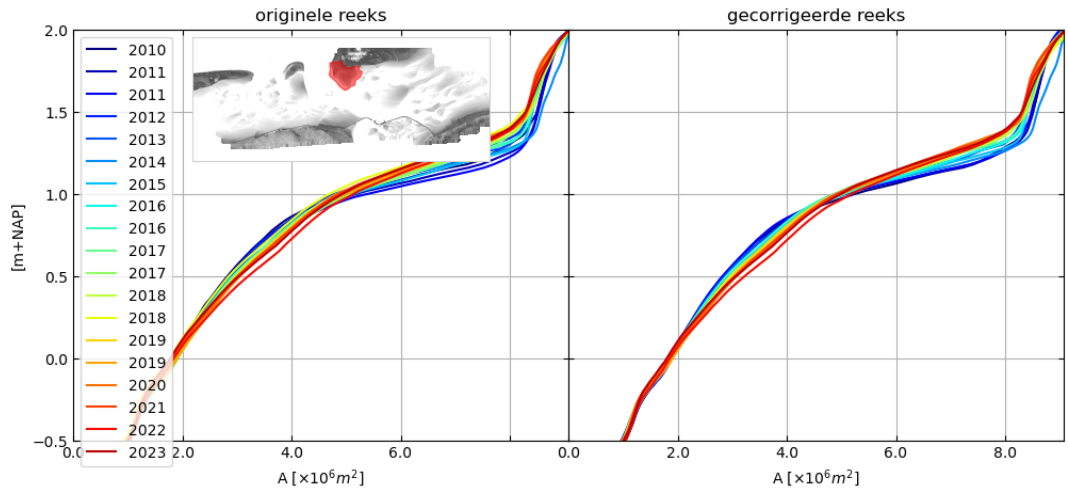
I: Kuipersplaat



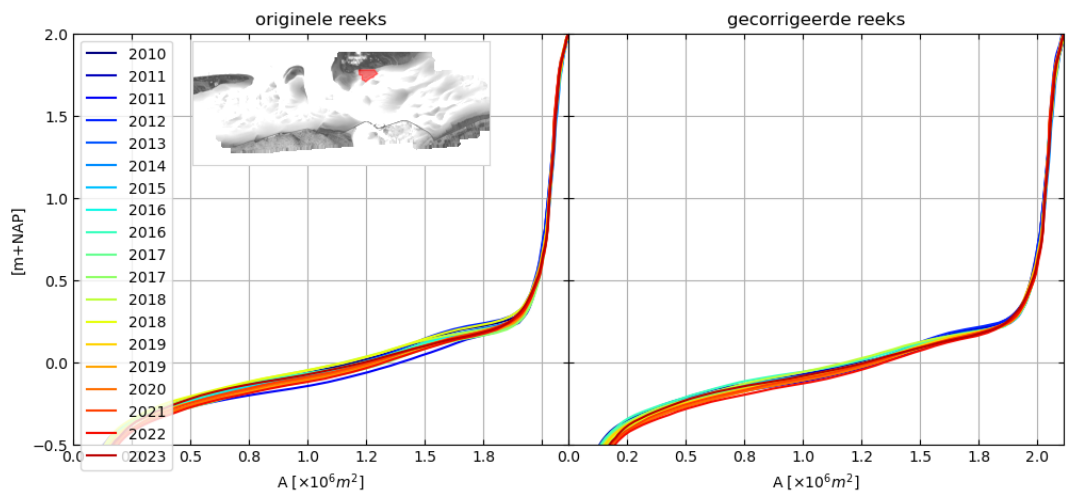
J: Eilanderbult



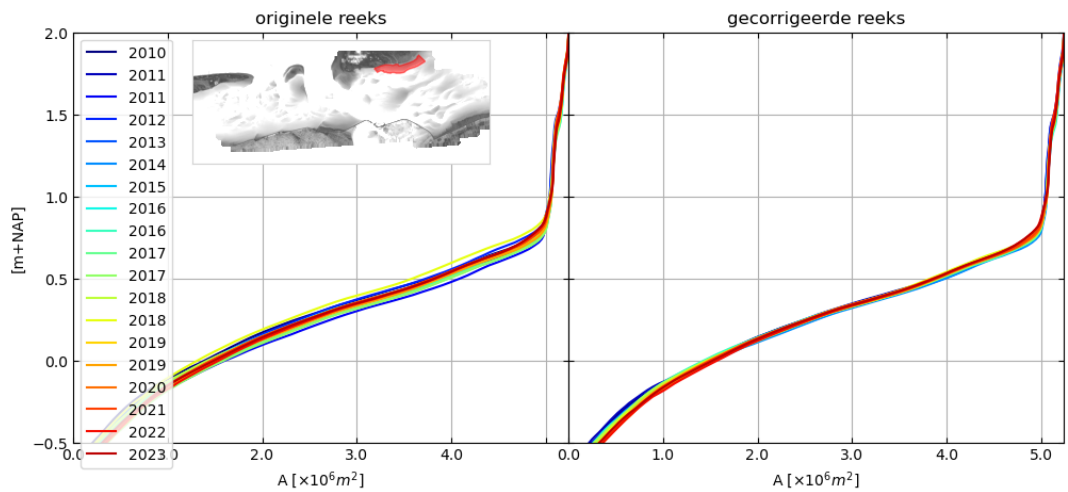
K: Schiermonnikoog zuid-1



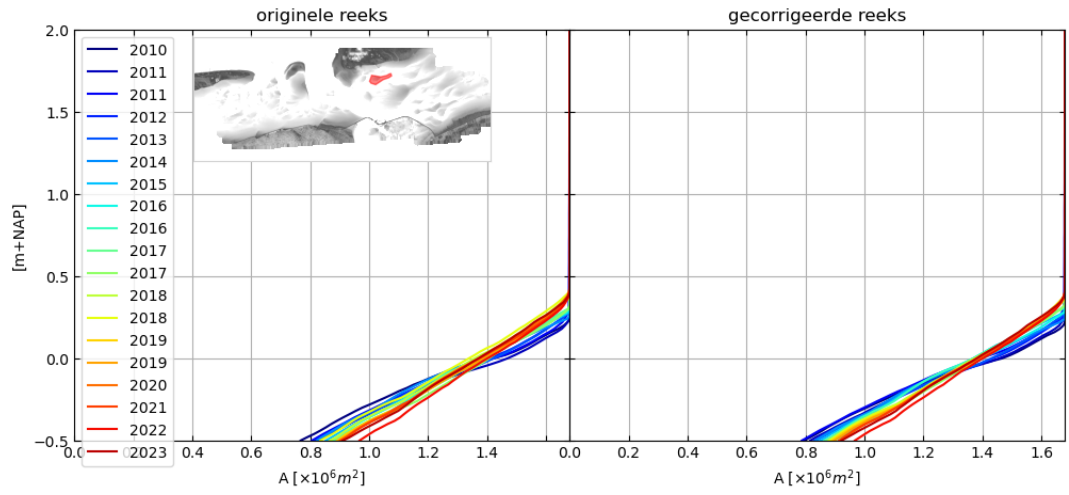
L: Schiermonnikoog zuid-2



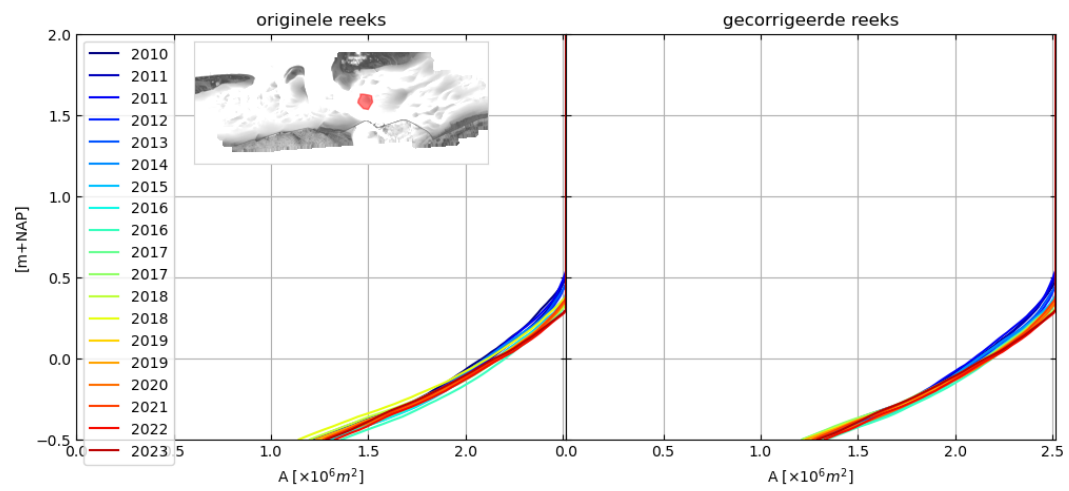
M: Schiermonnikoog zuid-3



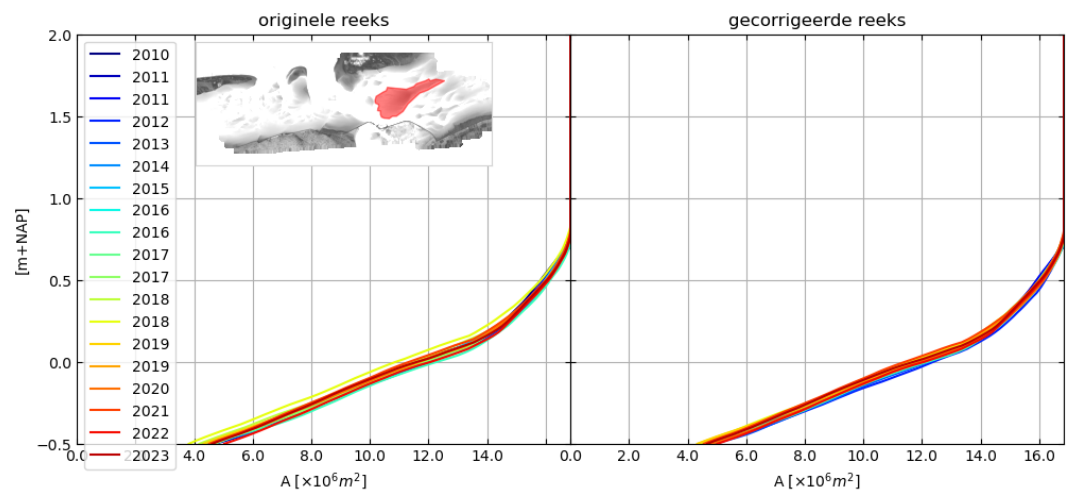
N: Grote Siege zuid



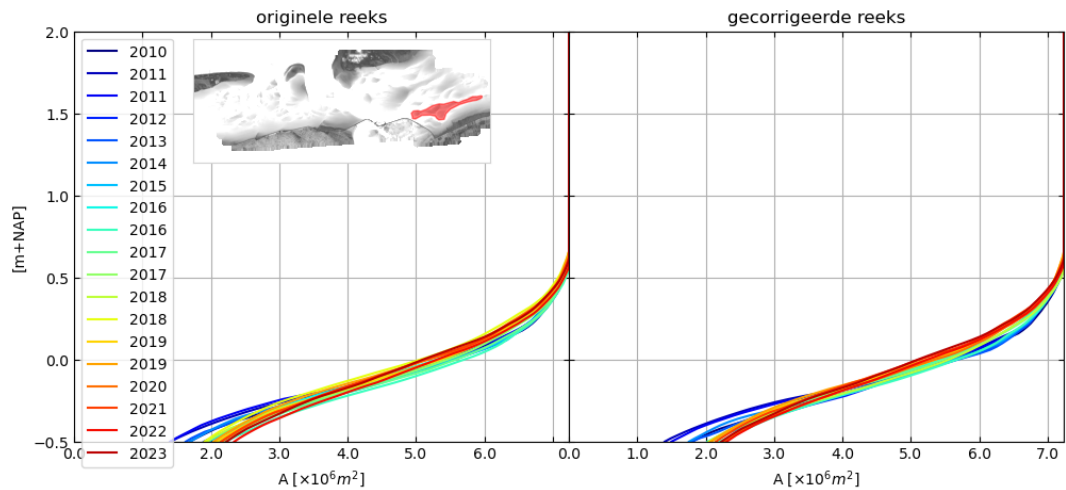
O: Roode Hoofd



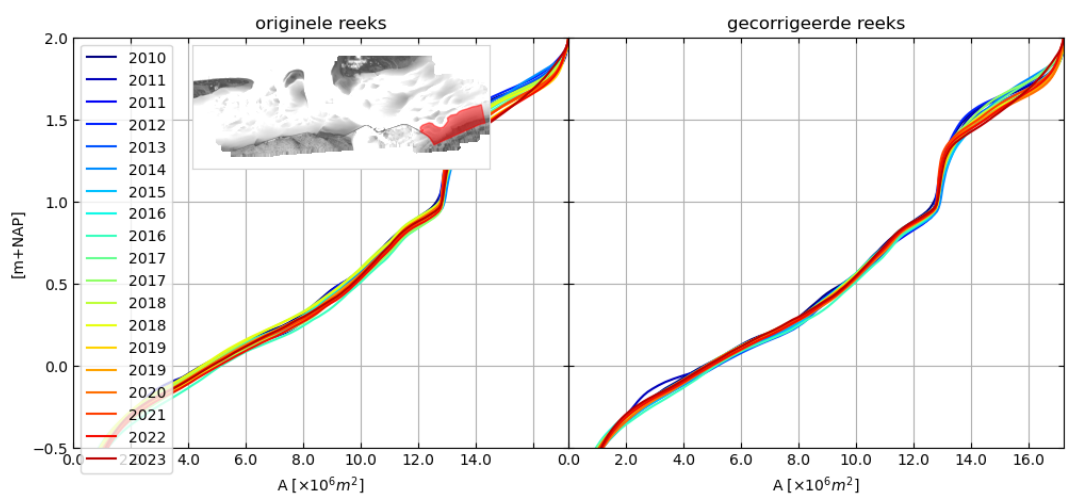
P: Brakzand



Q: Zoutkamperlaag zuidoost-1



R: Zoutkamperlaag zuidoost-2



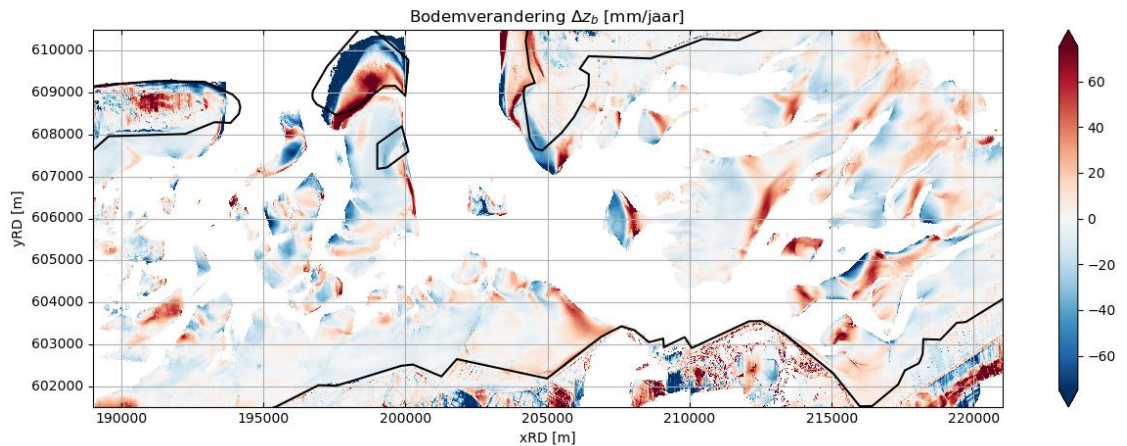
Figuur 4-5 Hypsometrische curven voor de platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij een hoogte op de verticale as. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0,5.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

4.3 Tijds gemiddelde ontwikkeling

Tijds gemiddelde bodemhoogteveranderingen zijn weergegeven in Figuur 4-6. Om hoogteveranderingen per rooster cel te laten zien is de lineaire trend berekend in de bodemhoogtemetingen voor elke rooster cel van 10x10m. De trendcoëfficiënt is uitgedrukt in millimeters bodemhoogteverandering per jaar. Alléén rooster cellen 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, gezien lineaire veranderingen ca. 67% van alle variantie beschrijven (dit komt voort uit eigenfunctie analyse, zie Gawehn, 2023). Andere niet-lineaire veranderingen vinden vooral op kortere termijn plaats.

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 Figuur 1-2 voor benamingen). Er vindt sterke erosie plaats aan de oostzijde van het Binnenplaatgat en het Roode Hoofd migreert sterk oostwaarts.

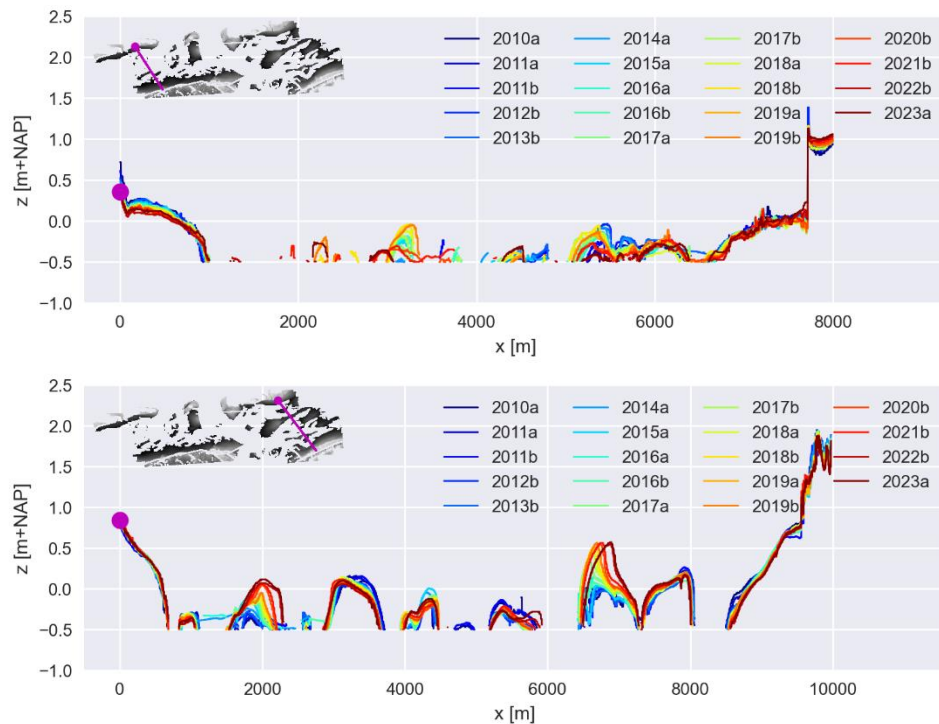
De geul Pinkegat bocht wat uit naar het oosten wat tot erosie van de Engelsmanplaat leidt. De meerderheid van de platen in de Zoutkamperlaag migreren naar het oosten. In Figuur 4-6 is dat terug te zien als blauwe vlakken (een afnemende hoogte) westelijk gelegen van rode vlakken met een toenemende hoogte (zie ook Figuur 4-8). Een lichte afname in plaathoogte valt op bij de platen ten Zuiden van Ameland-oost en het midden van de Engelsmanplaat, een zeer geringe afname vindt plaats op het Wierumerwad.



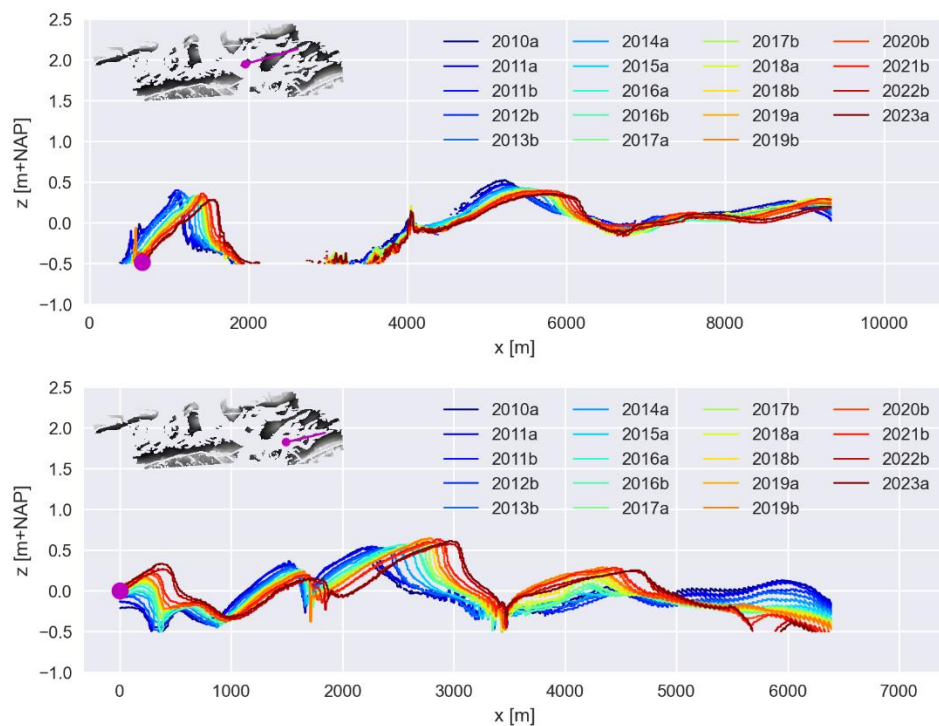
Figuur 4-6 De gemiddelde verandering in bodemhoogte (mm/jaar) zoals berekend per roostercel op basis van de tijdserie 2010-2023 met voorgestelde correctie. Blauwe kleuren geven verlaging weer, rode kleuren sedimentatie. Cellen waar minder dan 8 waarnemingen aanwezig waren in de tijdreeks zijn uitgesloten van de berekening en blijven dus wit (geen data).

4.4 Profielen

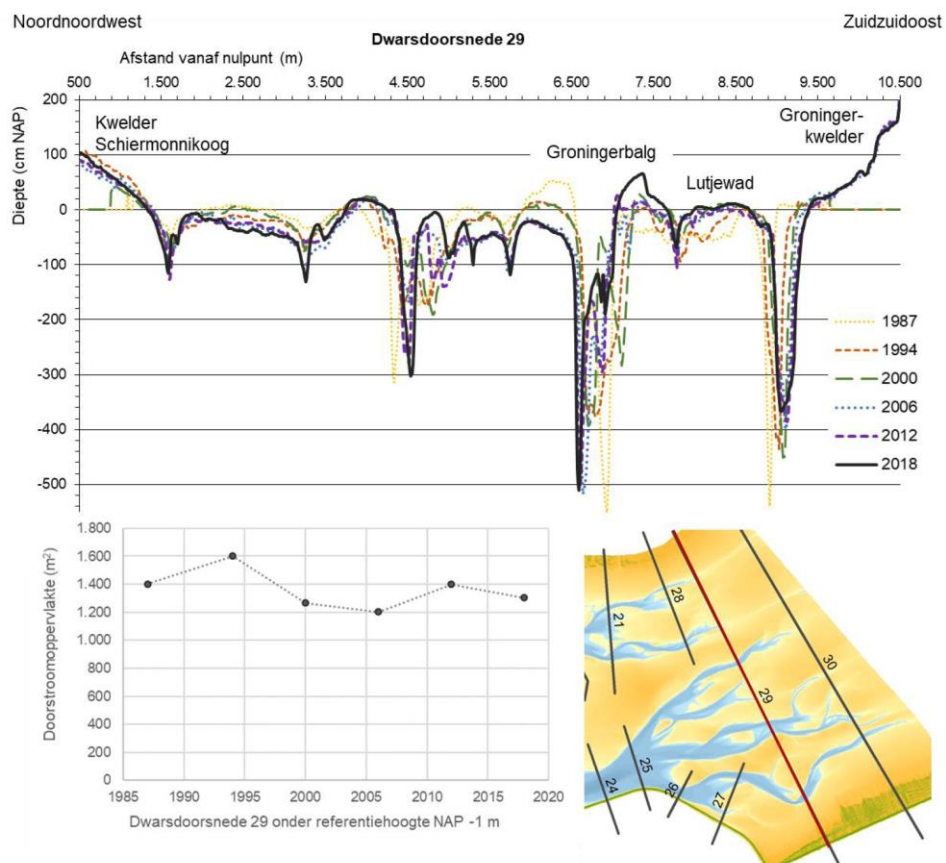
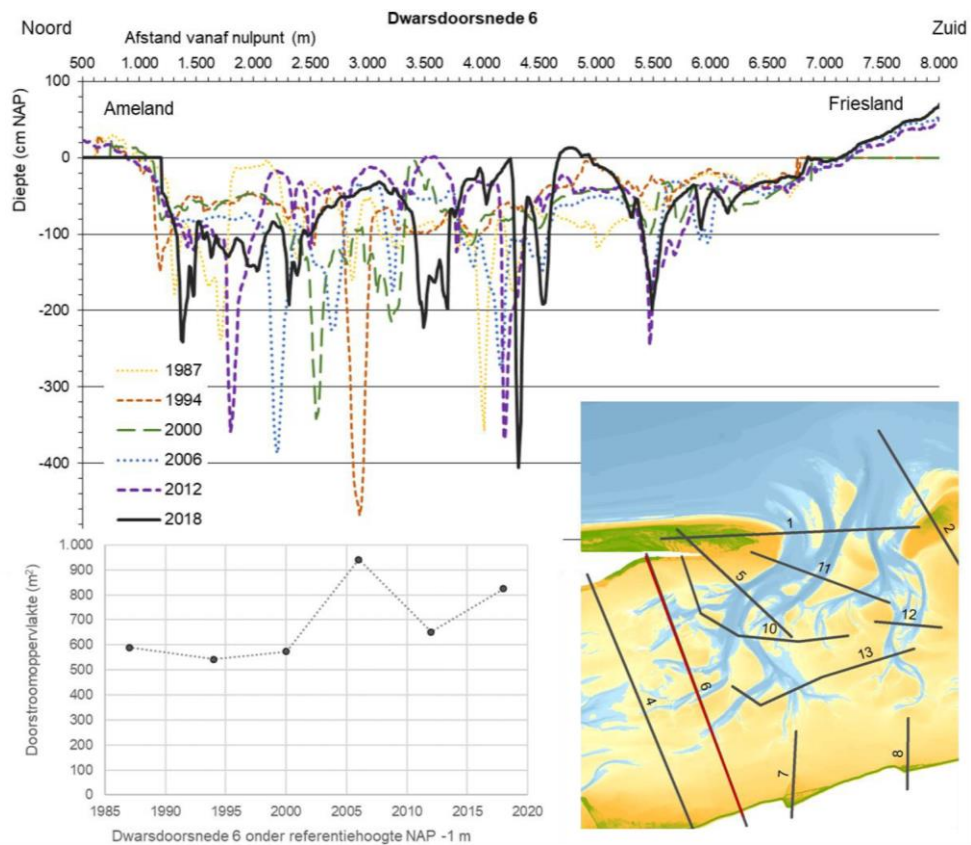
Aan de hand van een aantal profielen verifiëren we conclusies uit de geaggregeerde data. De platen in het westelijk deel van het kombergingsgebied Pinkegat liggen grotendeels lager dan de ondergrens van de LiDAR opnamen (NAP-0,5m, zie Figuur 4-7, bovenste paneel). In het kombergingsgebied Zoutkamperlaag 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 juist diep en heel stabiel gedurende alle opnamen sinds 1987. De profielontwikkeling van twee platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied bevestigt duidelijk de oostwaartse migratie van de platen in dit gebied, zoals ook al geconstateerd werd op basis van de tijdsgemiddelde ontwikkeling (Figuur 4-8). De meting van 2022 toont zelfs versterkte oostwaartse verplaatsing (Figuur 4-8, onderste paneel) en ook in 2023 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 2023a (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 2023a (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-0,5m. Dat wil zeggen dat het plaatareaal in de Zoutkamperlaag op geaggregeerde schaal vrijwel constant blijft, en ook dat de ontwikkeling van deelgebieden niet sterk varieert. Kijkend naar de gehele meetperiode 2010-2023 lijkt het plaatareaal tussen NAP-0,5m en NAP+0,5m in het Pinkegat licht af te nemen, al lijkt het ook te stabiliseren sinds 2016. De afname ligt binnen de meetonzekerheid.

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

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

5 Invloed 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) 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. Deze golfdata worden echter pas sinds 2019 ingewonnen, wat nog te kort bleek om een verband met plaatveranderingen aan te kunnen tonen.

In dit rapport is de analyse van golven uitgebreid. Er zijn machine learning modellen opgezet om golfdata bij Nes van 2019-2023 te voorspellen aan de hand van externe informatie. Deze externe informatie bestaat uit windgegevens, waterstanden en golfgegevens van andere stations. Gezien de externe informatie al beschikbaar is vanaf eind 2014, kon vervolgens een *hindcast* worden gemaakt van golfhoogtes en golfperiodes bij Nes voor de periode 2014-2019 toen deze nog niet werden gemeten. Daardoor kon de periode van golfdata bij Nes worden uitgebreid tot de periode eind 2014-2023. In het eerstvolgende hoofdstuk 5.1 bespreken we de machine learning modellen en aanvulling van de golfgegevens bij Nes.

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

Onderzoeksvragen voor de analyse zijn:

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

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

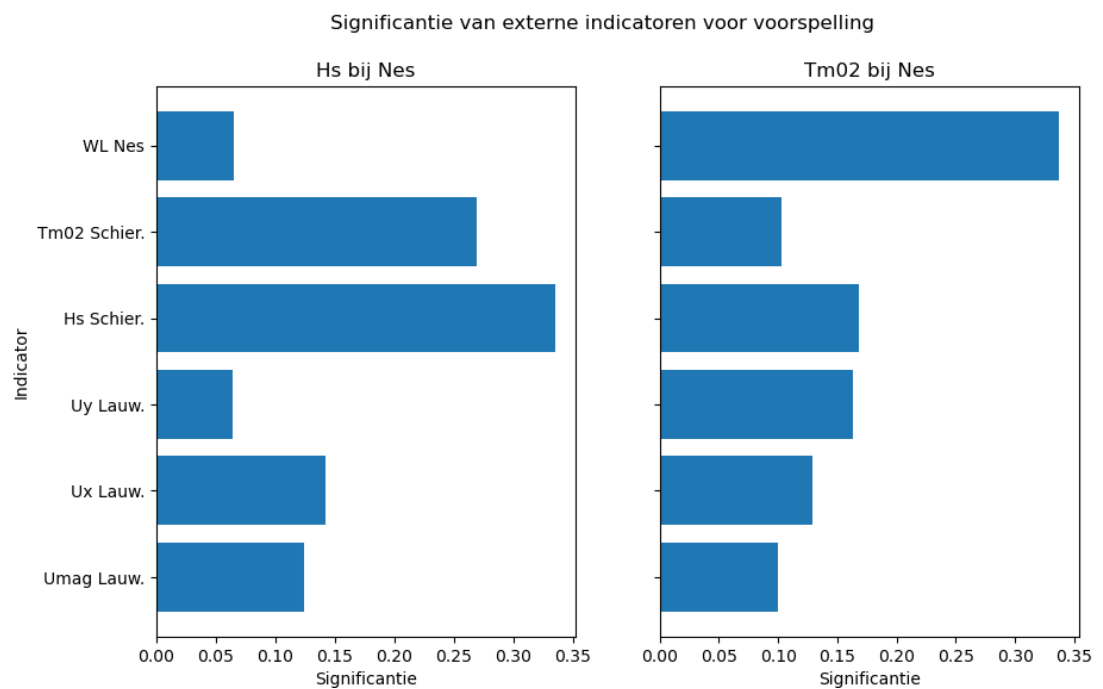
De LiDAR datareeks bestaat nu uit 19 punten waarvoor ook windgegevens beschikbaar zijn. Dat is vrij kort voor een statistische beschouwing. Daardoor is de kans groot dat berekende correlatiecoëfficiënten het resultaat zijn van toevallig samenvallen van condities en waarnemingen. Bij 19 datapunten ligt de significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt op 0,46. Dat betekent dat voor deze dataset er minder dan 5% kans bestaat dat het geconstateerde verband willekeurig is wanneer de correlatiecoëfficiënt boven 0,46 (of onder -0,46) 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 nu 13 punten en gaat gepaard met een significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt van 0,55.

5.1 Aanvulling van golfmetingen bij Nes

Om de periode van golfmetingen bij Nes te verlengen zijn Random Forest (RF) modellen opgezet. Een RF model bestaat uit een verzameling van beslissingsbomen die een reeks indicatoren gebruiken, ook wel features genoemd, om een bepaalde uitkomst te voorspellen. In dit geval zijn de beoogde uitkomsten de golfhoogte en golfperiode bij Nes; voor elk is een apart RF model opgezet. De indicatoren bestaan uit 1) tijdsreeksen van potentiële wind van het KNMI voor het station Lauwersoog, waarvan de windmagnitude maar ook de noord-zuid en oost-west componenten zijn gebruikt, 2) waterstandsgegevens van Rijkswaterstaat voor station Nes en 3) golfhoogte en golfperiode metingen van Rijkswaterstaat bij de veerhaven Schiermonnikoog. Omdat de gezamenlijke indicator data (1 t/m 3) al beschikbaar zijn vanaf eind 2014, is het doel om met terugwerkende kracht de golfgegevens bij Nes tot en met eind 2014 te voorspellen (d.w.z. een *hindcast* te maken).

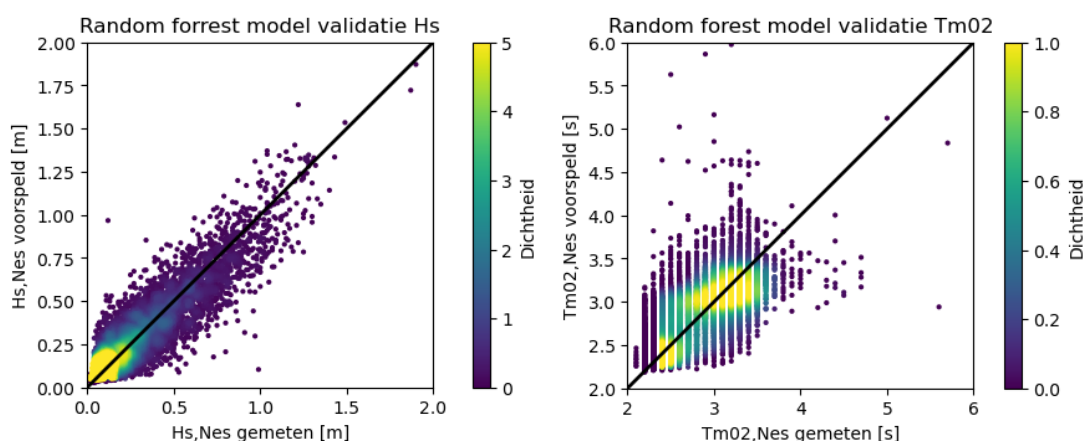
Om de RF modellen te kunnen valideren, zijn de beschikbare golfdata bij Nes voor de periode 2019-2023 opgesplitst in 80% trainingsdata en 20% validatie data. De golven bij Nes zijn over het algemeen zeer laag ($H_{S,50pct} = 6$ cm, $H_{S,95pct} = 55$ cm) en kort periodiek ($T_{m02,50pct} = 2.7$ s, $T_{m02,95pct} = 3.4$ s), echter is het van belang dat de voorspellingen van de RF modellen vooral goed zijn op tijdstippen dat de golven hoog zijn en/of lange golfperiodes hebben, omdat ze dan pas invloed hebben op de wadplaten. Om een evenwichtiger verhouding tussen kleine en grote golven te krijgen, hebben we de trainingsdata zodanig bemonsterd dat ze relatief meer hoge waarden bevatten ($H_{S,50pct} = 9$ cm, $H_{S,95pct} = 79$ cm & $T_{m02,50pct} = 2.9$ s, $T_{m02,95pct} = 3.5$ s). Daardoor werd de trainingsdataset significant kleiner van 80% (~78.000 datapunten) naar 5% (~5.000 datapunten) van de totaal bruikbare golfdata (~97.000 datapunten). De validatie van de getrainde RF modellen gebeurde op de volledige (20%) validatie dataset.



Figuur 5-1 Significantie van externe indicatoren voor voorspelling van de golfhoogte (H_s) en golfperiode (T_{m02}) bij Nes met behulp van Random Forest modellen. De externe indicatoren zijn tijdseries van waterstanden bij Nes, golfhoogtes en golfperiodes bij de veerhaven Schiermonnikoog, noord-zuid en oost-west wind componenten en windmagnitude bij Lauwersoog.

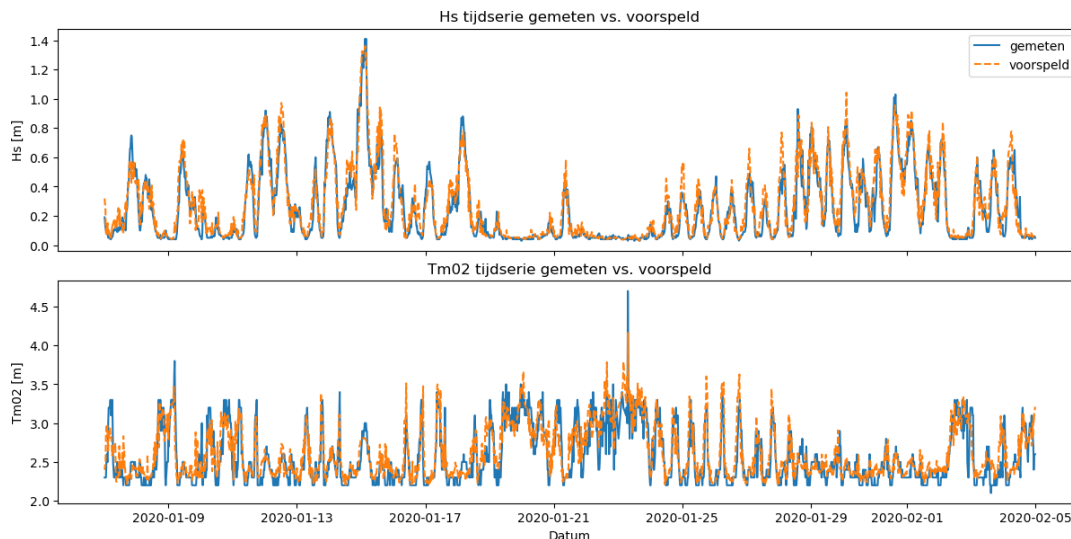
Voor de getrainde RF modellen is onderzocht welke externe indicatoren het meest belangrijk waren om een voorspelling te maken van golfhoogte en golfperiode bij Nes (Figuur 5-1). Voor de voorspelling van golfhoogte bij Nes bleken de golfhoogte en golfperiode data van Schiermonnikoog de meest invloedrijke indicatoren te zijn. Voor de voorspelling van golfperiodes bij Nes blijkt waterstands informatie ter plekke een cruciale informatiebron te zijn. Dit kan worden verklaard uit het feit dat golven sterk worden beïnvloed door de lokale waterdiepte. Waarom golf informatie van Schiermonnikoog hier minder voorspellingskracht heeft is niet helemaal duidelijk. Het zou kunnen dat golfperiodes bij Schiermonnikoog sterker lokaal zijn bepaald door de afgeschermdde locatie bij een havenhoofd en daarom minder voorspellingskracht hebben voor golfperiodes bij Nes. De afgeschermdde locatie is ook de reden dat de golftijdseries bij Schiermonnikoog al in eerste instantie niet zijn gekozen als representatieve bron voor het golfklimaat in het Friesche Zeegat. Het is ook mogelijk dat de RF modellen andere verhoudingen tussen de indicatoren gaan kiezen naar mate er meer golf informatie bij Nes beschikbaar komt om de RF modellen te trainen.

De voorspellingen van de getrainde RF modellen zijn relatief nauwkeurig (Figuur 5-2). Uit de validatie van de RF modellen blijkt dat voor de golfhoogte voorspelling een gemiddelde fout van 7 cm wordt gemaakt en voor de voorspelling van golfperiode een gemiddelde fout van 0.3 seconden wordt gemaakt.

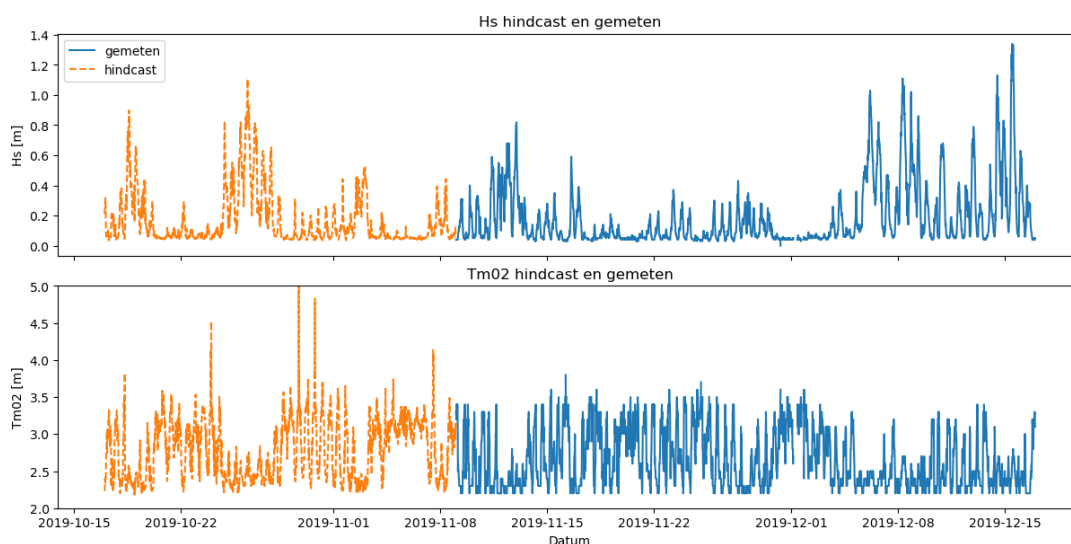


Figuur 5-2 Validatie van golfhoogte (linker paneel) en golfperiode (rechts) uit de RF modellen. De verticale as is de RF voorspelling en de horizontale as de meting. Hoe dichter een voorspelling bij de zwarte 1:1 referentielijn zit hoe beter deze is. De punt dichtheid wordt aangeduid met kleur, waarbij blauw een lage punt dichtheid en geel een hoge punt dichtheid signaleert.

De relatief goede voorspellingen van golf informatie bij Nes worden ook duidelijk uit de inspectie van voorspelde tijdseries ten opzichte van de gemeten tijdseries (Figuur 5-3). De kwaliteit van de Random Forest voorspellingen is daarom voldoende geacht om een *hindcast* te maken van golven bij Nes voor de periode eind 2014 tot 2019. Het begin van deze *hindcast* is gevisualiseerd in Figuur 5-4.



Figuur 5-3 Voorbeeld vergelijking van gemeten (blauw) en voorspelde (oranje) tijdseries voor de golfhoogte (Hs) en golfperiode (Tm02) bij Nes. De voorspellingen worden gedaan op basis van externe indicatoren, bestaande uit windinformatie bij Lauwerroog, waterstandsinformatie bij Nes en golfinformatie van een station bij Schiermonnikoog.



Figuur 5-4 Begin van de hindcasts (oranje) aansluitend op de metingen (blauw) voor de golfhoogte (Hs) en golfperiode (Tm02) bij Nes.

5.2 Invloed condities tijdens inwinning

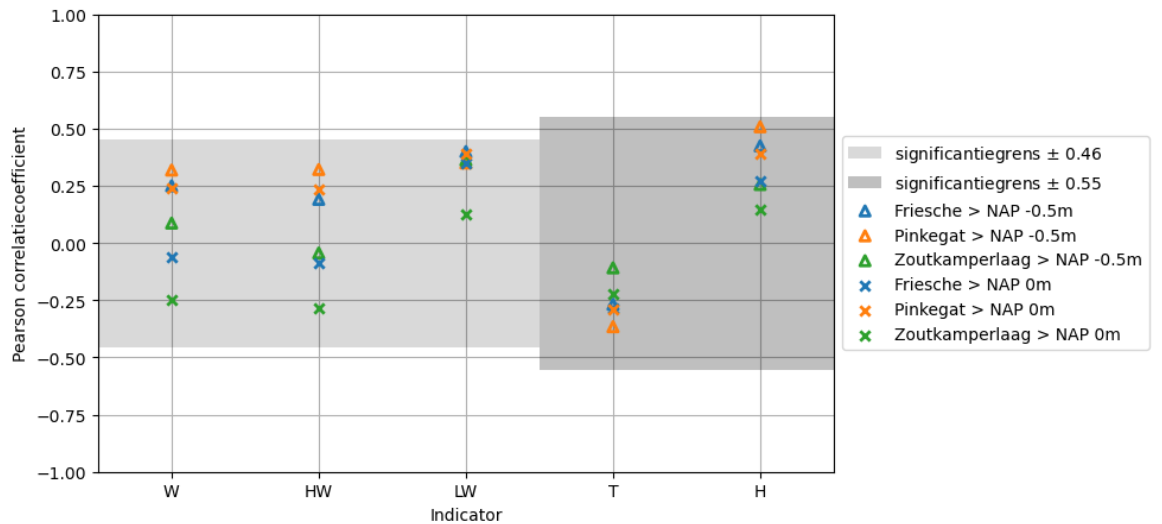
Voor vijf fysische indicatoren is onderzocht of er een correlatie bestaat tussen hun waarde tijdens de inwinning en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. Indicator W voor windsnelheid is berekend uit de tijdreeksen van potentiële wind (gemeten windsnelheid omgerekend naar de windsnelheid bij een standaard 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 *hindcast* en de gemeten waarden bij Nes voor de periode 2014-2023. De berekende tijdsreeksen voor de indicatoren tijdens LiDAR inwinning zijn geplott in Figuur 5-5. (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 2 dagen vooraf [m/s]
LW	Gemiddeld laagwater tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [NAP+m]
HW	Gemiddeld hoogwater tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [NAP+m]
H	Gemiddelde golfhoogte tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [m]
T	Gemiddelde golfperiode tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [s]



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



Figuur 5-6 Pearson correlatiecoëfficiënten voor het verband tussen gemeten arealen en hydrologische en meteorologische indicatoren tijdens het inwinnen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,46 voor windgegevens en waterstanden, en een significantiegrens van 0,55 voor golfgegevens.

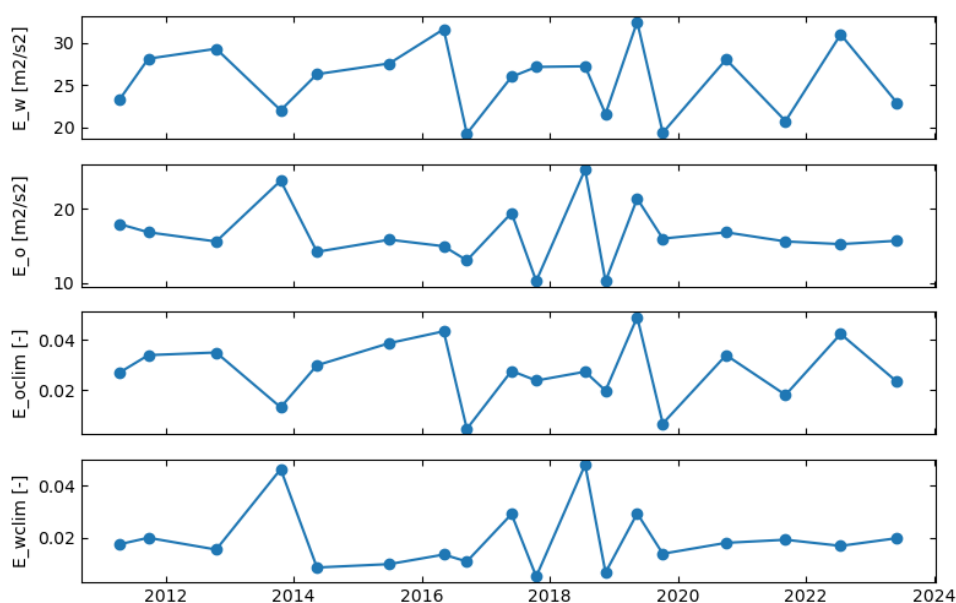
In Figuur 5-6 zijn de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten weergegeven tussen de verschillende indicatoren en zowel het areaal boven NAP-0,5m en het areaal boven NAP+0m. Hierin is geen enkele significante correlatie te zien. In eerdere rapportages (zie Gawehn, 2023) is een correlatie met sterke windsnelheden op de grens van significantie gevonden. Met toevoeging van de 2023 data is deze correlatie nu insignificant geworden.

5.3 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 windtijdreeksen van het KNMI voor het station Lauwersoog. Tijdreeksen voor deze indicatoren laten zien dat er variatie zit in de gemiddelde windenergie en stormachtigheid tussen opeenvolgende LiDAR metingen (Figuur 5-7). Deze variatie kan mogelijk ook aanleiding geven tot periodieke verschillen in plaatareaal. In dit rapport zijn geen correlaties meer opgenomen voor tijdsvensters die korter zijn dan de periode tussen twee LiDAR metingen (cf. Van der Vegt en Van der Lugt, 2022). Voor deze tijdschalen moeten aannames worden gemaakt voor plaatverandering op hogere tijdschaal dan gemeten en dat is niet nodig gezien correlaties op de gemeten schaal al duidelijk aanwezig zijn.

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

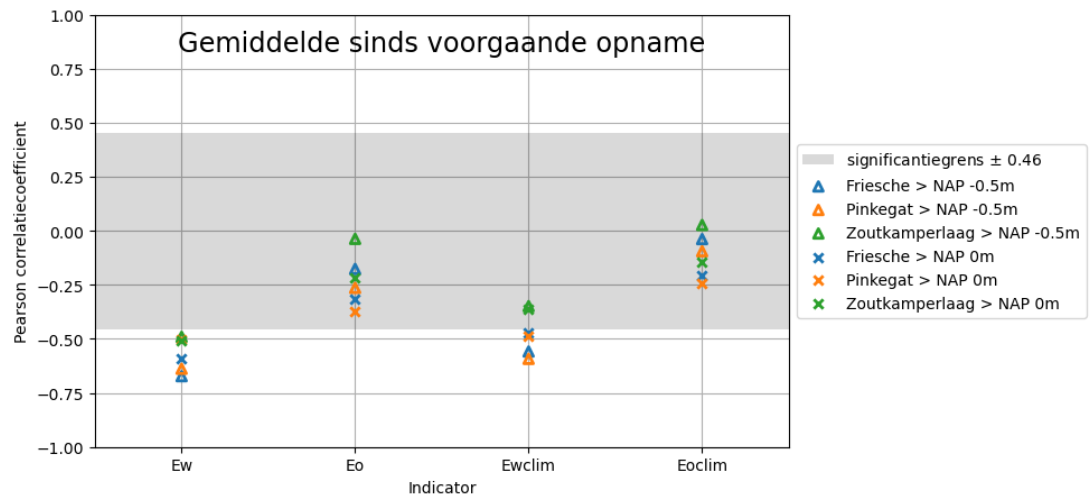
Parameter	Definitie
E_w	Gemiddelde van het kwadraat van de west→oost component van de windsnelheid in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [m^2/s^2]
E_o	Gemiddelde van het kwadraat van de oost→west component van de windsnelheid in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [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 2010-2023 [-] 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 2010-2023 [-] voor oost→west component



Figuur 5-7 Tijdreeksen van windindicatoren tussen twee opeenvolgende metingen.

Voor het gehele kombergingsgebied bestaat er een significante correlatie tussen westelijke wind in de afgelopen periode en de nieuwe LiDAR meting (Figuur 5-8). De correlaties zijn negatief, wat betekent dat het plaatareaal krimpt als de windkracht uit westelijke richting bovengemiddeld sterk is (Figuur 5-8, E_w) of er bovengemiddeld veel krachtige stormen voor zijn gekomen (Figuur 5-8, 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. Daar komt bij, dat de golven bij harde wind ook vaak groter zijn en dus nog effectiever sediment kunnen afslaan. Correlaties voor het Pinkegat zijn sterker negatief dan voor de Zoutkamperlaag. Dat komt omdat de platen in het Pinkegat gemiddeld genomen lager liggen dan in de Zoutkamperlaag (Figuur 4-1, Figuur 4-2). Een verhoogde waterstand en grotere golven leiden hier daarom tot relatief sterkere golfbreking en meer afslag van wadplaten.

Wind uit oostelijke richting wordt juist in verband gebracht met een verlaagde waterstand waardoor er ook geen significante afname van plaatareaal wordt verwacht (Figuur 5-8, E_o en E_{oclim})



Figuur 5-8 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal boven referentiehoogten NAP-0,5m, NAP+0m en windcondities tussen opnamen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,47.

5.4 Invloed golfklimaat tussen opnamen

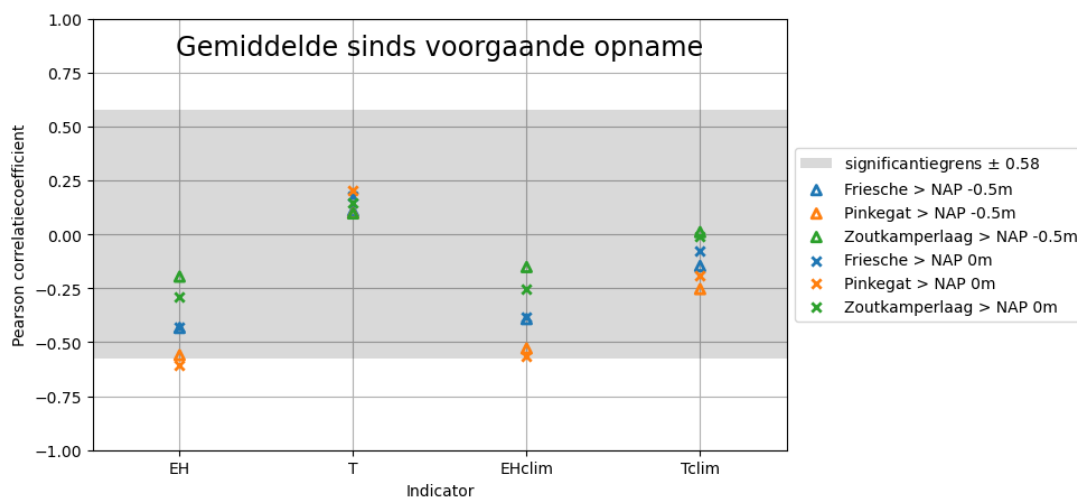
Naast de windindicatoren is ook voor vier golfindicatoren (zie Tabel 5.3 voor de gehanteerde definities) onderzocht of er een correlatie bestaat van hun waarden tussen de opnamen en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. De indicatoren E_H , T , E_{Hclim} en T_{clim} zijn bepaald uit de golfmetingen bij het station Nes aangevuld met Random Forest *hindcasts* (zie paragraaf 5.1). Het meetstation bij Nes zit vrij beschermd onder Ameland waardoor de tijdreeksen voor deze indicatoren vooral lokaal opgewekte windgolven van beperkte grootte laten zien. Uit het kwadraat van de golfhoogte E_H blijkt dat deze kan variëren voor opeenvolgende LiDAR metingen (Figuur 5-9). Deze variatie geeft ook aanleiding tot periodieke verschillen in plaatareaal: voor het Pinkegat zijn negatieve correlaties gevonden met de verandering in plaatareaal op de grens van significantieniveau. Volgens de verwachting eroderen de wadplaten in het Pinkegat als de golven hoog zijn. Naar mate er meer metingen van golfhoogte beschikbaar worden zullen deze correlaties zich verder uitkristalliseren. De verwachting is dat dan ook correlaties tussen het golfklimaat en de platen in de Zoutkamperlaag zichtbaar worden.

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 referentiegolfhoogte voor 95% kwantiel is overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op het golfklimaat eind 2014-2023 [-]
T_{clim}	ratio van de tijd dat de referentiegolfperiode voor 95% kwantiel is overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op golfklimaat eind 2014-2023 [-]



Figuur 5-9 Tijdreeksen van golfindicatoren tussen twee opeenvolgende metingen.



Figuur 5-10 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal boven referentiehoogten NAP-0,5m, NAP+0m en golfcondities tussen opnamen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,58.

5.5 Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities

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

Voor het Pinkegat zijn de golfmetingen door aanvulling met *hindcasts* nu ook lang genoeg om negatieve correlaties vast te stellen met de golfhoogte.

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?”. Hier beantwoorden we de in Hoofdstuk 1 geformuleerde onderzoeksvragen en geven aanbevelingen naar aanleiding van het onderzoek naar verbeteringen in de methodiek.

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

De 2023 opname past wederom goed in de meetreeks. Het gerapporteerde plaatareaal van de Zoutkamperlaag is constanter gebleven door de tijd heen dan het plaatareaal van het Pinkegat. Voor het Pinkegat suggereert de meetreeks een geringe afname van het plaatareaal over de tijd, maar deze afname valt binnen de onzekerheidsmarge. Vanaf de LiDAR opnamen in 2016 is het areaal geheel stabiel.

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

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

Het totale plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat lijkt licht af te nemen, maar deze afname valt binnen de meetonzekerheid. Daarnaast is het plaatareaal sinds 2016 stabiel. Om de oorzaak van de veranderingen inzichtelijker te maken zijn deelgebieden geanalyseerd. Het gedrag in de deelgebieden en platen varieert, plaathogtes nemen zowel toe als af. Op de schaal van het kombergingsgebied vallen deze ontwikkelingen min of meer tegen elkaar weg en de waargenomen veranderingen blijken niet aan de bodemdaling gerelateerd te zijn.

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

Het is belangrijk om bij de interpretatie van hoogteveranderingen niet alleen rekening te houden met bodemdaling maar ook met het dynamische geulgedrag in het Friesche Zeegat. Een migrerende geul erodeert de aangrenzende wadplaat, terwijl aan de tegenoverliggende zijde zand afgezet wordt. Deze nieuw gevormde plaat is lager dan de geërodeerde plaat. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen leidt dus tot veranderingen in plaathoogte die veel

groter zijn dan de effecten van bodemdaling. De morfologische dynamiek, en daardoor plaatareaal en -hoogte, wordt in belangrijke mate gestuurd door een combinatie van hydrodynamische condities, zoals bijvoorbeeld getij, en meteorologische condities.

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

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. Voor het Pinkegat is ook aangetoond dat hoge golven tot een afname van plaatareaal zorgen. 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.

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 LiDAR resultaten en GCP grids ligt in de orde van 1-2 cm. Net als LiDAR resultaten van 2022 passen ook de LiDAR resultaten van 2023 goed bij de Ground Control Point grids.

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

Er zijn significante relaties gevonden tussen veranderingen in plaatareaal en sterke westelijke wind. Door aanvulling van beschikbare golfmetingen met *hindcasts*, zijn ook significante relaties gevonden tussen golfhoogte en afnemend plaatareaal in het Pinkegat. Ook voor de Zoutkamperlaag wordt een dergelijke relatie verwacht. We bevelen aan om deze relatie verder te onderzoeken. Met toekomstige LiDAR metingen zullen ook de golfmeetreeksen langer zijn geworden, waardoor mogelijke correlaties tussen golfcondities en veranderingen in plaatareaal van de Zoutkamperlaag duidelijk zullen worden.

Er wordt voortdurend onderzoek gedaan om het conceptuele model van de morfologische ontwikkelingen in de Friesche Zeegat te verfijnen. Het is dus van belang om bij iedere rapportage de nieuwste ontwikkelingen in deze conceptuele model(len) mee te nemen in de interpretatie.

Referenties

Commissie MER (2023). "Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2022." Projectnummer: 3731. Commissie voor MilieuEffectRapportage, Utrecht, Nederland.

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

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

Gawehn, M. (2023). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2022)". Deltares rapport 11206685-005-ZKS-0002. Delft, Nederland.

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

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

NAM B.V. (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). "Komberegingsrapport Friesche Zeegat - Pinkegat en Zoutkamperlaag". Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0002. Delft, Nederland.

Terratec AS. (2023). "Project report Waddenzee – LiDAR acquisition for 2023". Oslo, Norway

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

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

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

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

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

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

A Overzicht vluchtgegevens

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

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

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

LiDAR referentie	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
				Start	Eind			
2019 (voorjaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	15-05-2019	10:30	13:08	1-23	Bevredigend	Vlieghoogte 1500 m AGL
2019 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	07-10-2019	07:38	10:01	1-23	Bevredigend	Vlieghoogte 1500 m AGL
2020 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	02-10-2020	16:24	18:42	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2021 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	06-09-2021	15:54	18:12	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2022 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	18-07-2022	06:05	08:38	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2023 (voorjaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560 II-S	03-06-2023	14:11	16:47	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL

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

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

B NAM rapportage datareeks correctie

Auteur: Gini Ketelaar (NAM)

Samenvatting

In de 2024 LiDAR analyse van de surveys tot en met 2023 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.

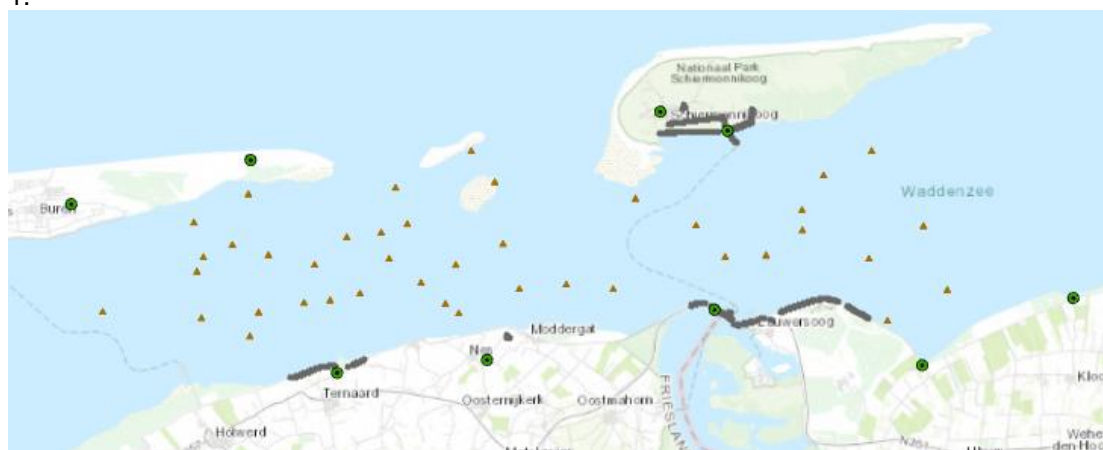
De correcties liggen voor het grootste gedeelte echter binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Met name in de jaren na 2019 zijn de correcties klein, wat ook voor de 2023 survey het geval is.

In het advies van de Auditcommissie (Commissie MER, 2023) wordt de aanbeveling gedaan om de InSAR opname met enige regelmaat te herhalen voor de bepaling van de hoogteligging van de Ground Control Point grids (GCP grids). Dit wordt geadresseerd in paragraaf B.3. Hier wordt getoond dat verwerking van de InSAR opnames met de frequentie van het meetplan Waddenzee (eens per 3 jaar) voldoende is om de hoogteligging van de Ground Control Point grids te bepalen.

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 B-1.



Figuur B-1: In donker grijs de selectie harde topografie punten (inclusief extra ground control point clusters zoals bepaald in 2022). In groen de locaties van de Ground Control Point grids. In bruin de locaties van de sediment grids..

B.1.1 Ground Control Point (GCP) 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 (Terratec, 2023) worden de resultaten van de vergelijking tussen de NAP hoogtes en de LiDAR hoogtes (na toepassing van één verticale offset) van de GCP grids weergegeven, zie Tabel B-1. De gemiddelde hoogteverschillen op de GCP grids zijn voor alle grids kleiner dan 1.5 centimeter. De standaarddeviatie van de hoogteverschillen ligt in de orde van 1-2 centimeter. De LiDAR resultaten van 2023 passen dus goed bij de Ground Control Point grids.

Tabel B-1: Vergelijking hoogtes LiDAR puntenwolk met Ground Control Point grids (uit Field, 2023).

Control Surface	Average dZ (m)	Minimum dZ (m)	Maximum dZ (m)	Average magnitude (m)	RMS	Std. Dev
GCP - 1	+0.008	-0.015	0.029	0.010	0.012	0.009
GCP - 2	-0.005	-0.030	0.008	0.007	0.009	0.008
GCP - 3	-0.001	-0.036	0.025	0.008	0.011	0.011
GCP - 4	+0.004	-0.013	0.027	0.008	0.010	0.009
GCP - 5	+0.001	-0.020	0.027	0.009	0.011	0.012
GCP - 6	-0.005	-0.017	0.013	0.008	0.009	0.008
GCP - 7	-0.003	-0.021	0.022	0.007	0.009	0.009
GCP - 8	+0.009	-0.036	0.044	0.018	0.021	0.019
GCP - 9	+0.014	-0.028	0.045	0.019	0.023	0.018

B.1.2 Harde topografie punten

In deze monitoringscyclus is dezelfde set harde topografie punten gebruik 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 2023 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 Rijksdriehoeksstelsel (in kilometer); en a , b , en c de parameters van het lineaire vlak.

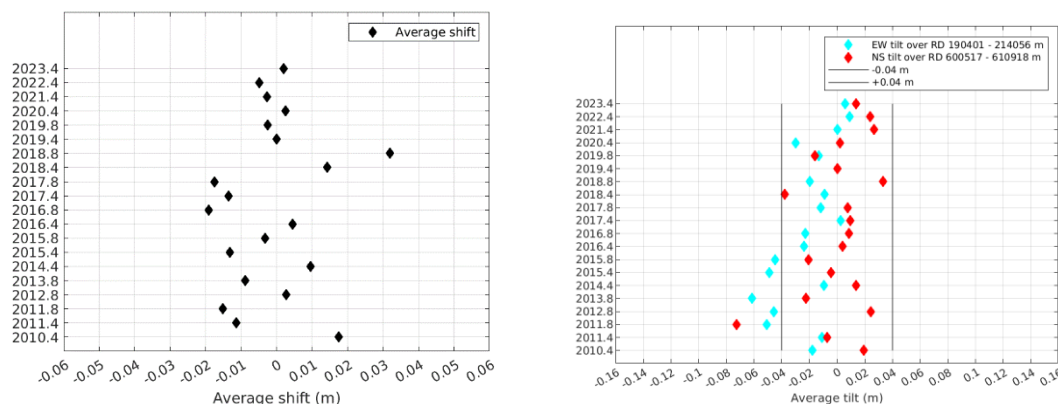
De correctie parameters (zie Tabel B-2) zijn bepaald op basis van de Deltares grids met 1 meter resolutie. Door middel van kleinste kwadraten schatting zijn de correctie parameters uit de hoogteverschillen van de harde topografie punten (inclusief extra ground control point clusters), de sediment grids 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 B-2), welke op centimeter niveau overeenkomen met de berekende shifts en tilts in de vorige monitoringscyclus.

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

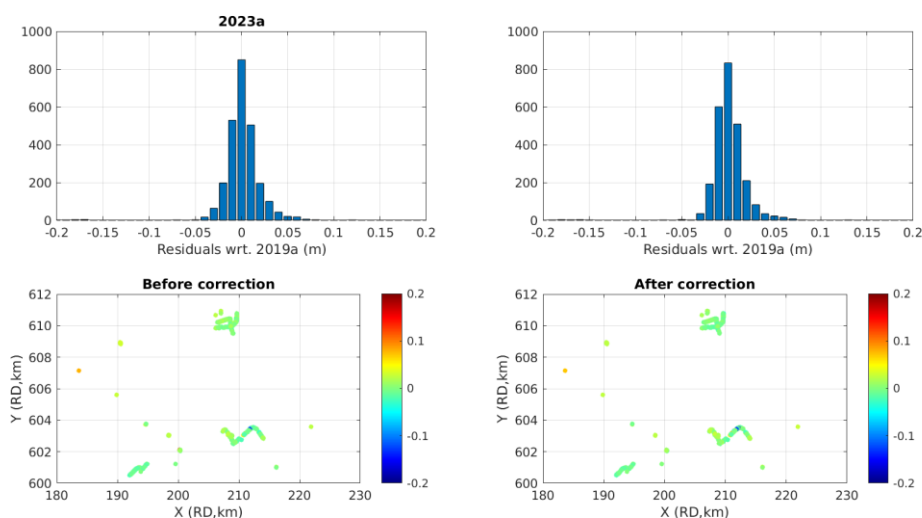
survey	a	b	c
2010a	0.0008	0.0018	-1.2462
2011a	0.0005	-0.0007	0.3154
2011b	0.0022	-0.0070	3.7845
2012b	0.0019	0.0023	-1.7971
2013b	0.0026	-0.0022	0.7914
2014a	0.0004	0.0013	-0.8603
2015a	0.0021	-0.0004	-0.1779
2015b	0.0019	-0.0020	0.8107
2016a	0.0010	0.0004	-0.4167
2016b	0.0010	0.0009	-0.7296
2017a	-0.0001	0.0009	-0.5353
2017b	0.0005	0.0008	-0.5761
2018a	0.0004	-0.0036	2.1332
2018b	0.0008	0.0032	-2.0643
2019a	0.0000	0.0000	0.0000
2019b	0.0006	-0.0015	0.8148
2020a	0.0013	0.0002	-0.3697
2021a	0.0000	0.0026	-1.5485
2022a	-0.0004	0.0023	-1.3195
2023a	-0.0002	0.0013	-0.7432

B.2.2 Evaluatie correctie parameters

De constante verschuivingen ('shifts') en de kantelingen ('tilts') in Oost-West en Noord-Zuid richting behorende bij de berekende correctie parameters ten opzichte van de referentie survey 2019a worden getoond in Figuur B-2. De correcties vallen binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Figuur B-3 toont de residuen voor de 2023 survey voor en na toepassing van de correctieparameters.



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



Figuur B-3: Residuen hoogteverschillen (m) survey 2023a ten opzichte van 2019a, voor (links) en na (rechts) correctie.

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

Verder dient te worden opgemerkt, dat 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 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 twee jaar ongewijzigd gelaten. De harde topografie punten zijn ruim in de meerderheid ten opzichte van de GCP en sediment grid punten, waardoor de percentielen in Tabel B-3 relatief laag uitvallen (de volgende paragraaf toont de residuen op de GCP en sediment grids voor 2022).

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

survey_corr	std(cm)	left_25%(cm)	right_75%(cm)	left_2.5%(cm)	right_97.5%(cm)
2010a	2.4	-1.6	1.4	-4.3	5.3
2011a	2.5	-1.6	1.7	-4.9	4.4
2011b	2.3	-1.4	1.4	-4.6	4.1
2012b	2.6	-1.3	1.6	-5.8	4.2
2013b	1.7	-1.1	1.1	-3.6	3.2
2014a	2.0	-1.4	1.3	-3.5	3.9
2015a	1.6	-0.8	0.7	-3.0	2.7
2015b	1.9	-1.3	1.4	-3.8	3.5
2016a	2.5	-1.0	0.7	-3.8	4.1
2016b	2.3	-1.4	1.5	-4.4	5.0
2017a	1.6	-0.9	0.8	-3.1	4.0
2017b	1.2	-0.8	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	2.3
2019a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2019b	1.2	-0.7	0.7	-2.2	2.4
2020a	1.5	-1.0	0.9	-2.8	3.2
2021a	1.3	-0.8	0.8	-2.3	3.1
2022a	1.9	-1.1	0.8	-3.7	4.1
2023a	2.1	-0.8	0.7	-2.5	4.1

B.3 InSAR deformatie tijdseries Ground Control Point grids

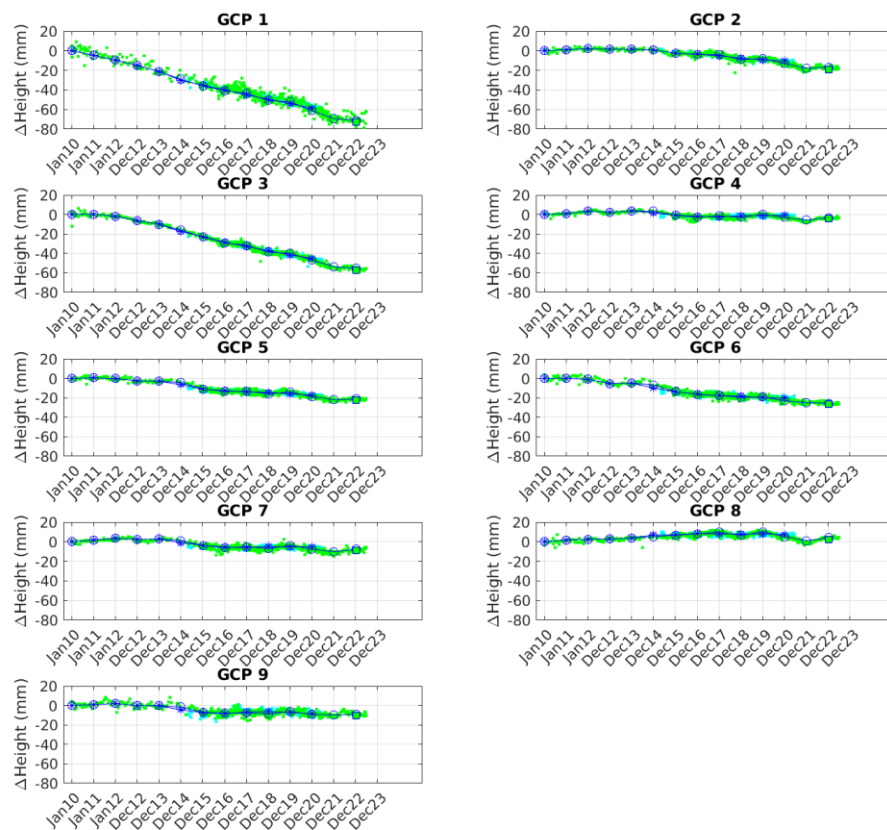
Volgens het actuele Meetplan Waddenzee vindt de verwerking en rapportage van InSAR metingen in het Lauwersmeergebied eens per 3 jaar plaats. Het meest recente Meetregister is die van 2021 (NAM, 2021). InSAR opnames uit de neergaande en opgaande baan van de Sentinel-1 satelliet missie (huidige opname interval 12 dagen) zijn hiervoor geprocessed. In de differentiestaten behorend bij het Meetregister zijn deze gecombineerd met InSAR data uit eerdere satelliet missies en met bestaande waterpassingen.

In de jaren waarin geen InSAR processing plaatsvindt, worden de hoogtes van de Ground Control Point grids bepaald op basis van het verloop van de InSAR deformatie tijdseries uit het meest actuele Meetregister. Dit gebeurde voorheen ook toen de bodemdalingsmetingen in het Lauwersmeergebied nog middels waterpassingen werden gedaan (de frequentie hiervan was eveneens 3 jaar).

In de jaren waarin de hoogtes van de Ground Control Point grids worden bepaald op basis van de deformatie tijdseries, wordt een lineair verloop van de bodembeweging verondersteld. Dat de hoogtes van de Ground Control Point grids met voldoende nauwkeurigheid bepaald

kunnen worden met gebruikmaking van deze aanname, toont Figuur B-4. In plaats van in 2024, zijn de InSAR metingen van het Lauwersmeergebied al in 2023 verwerkt en rapporteerd, als onderdeel van het Meetregister Noord Nederland (NAM, 2023). Op ieder InSAR opname tijdstip is de gemiddelde deformatie berekend van alle scatterers (reflecterende objecten, meetpunten) in een straal van 500 meter van ieder GCP grid. Op basis van het verloop van de 2021 deformatie tijdserie kan de verwachte deformatie in 2023 berekend worden (groene vierkanten). Deze komen binnen de meetnauwkeurigheid overeen met wat daadwerkelijk is gemeten in 2023.

De precisie van InSAR metingen ligt in de orde van 3-5 mm (1-sigma). Gecombineerd met een bij benadering lineair verloop van de bodembeweging, is het interval van het Meetplan Waddenzee voor verwerking van de InSAR metingen (3 jaar) voldoende voor het bepalen van de hoogtes van de Ground Control Point grids. Indien de bodembeweging niet lineair verloopt, dan kan dit tijdig worden gedetecteerd door de continue GNSS stations in het gebied. Bovendien ligt de nauwkeurigheid van de InSAR metingen ruim binnen de nauwkeurigheid van LiDAR (1-sigma 1-2 cm voor de ingepaste GCP grids en de harde topografie).



Figuur B-4: InSAR deformatie tijdseries vanaf 2010 voor de Ground Control Point grids. Cyane punten: InSAR deformatie per opname tijdstip uit de InSAR processing van 2021. Groene punten: InSAR deformatie per opname tijdstip uit de InSAR processing van 2023. Blauwe sterren: gemiddelde deformatie per jaar; InSAR processing 2021. Blauwe cirkels: gemiddelde deformatie per jaar; InSAR processing 2023. Groene vierkanten: deformatie in 2023 bepaald uit het verloop van de deformatie tijdserie van de InSAR processing 2021.

B.4 Referenties

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

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

Gawehn, M. (2023). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2022)". Deltares rapport 11206685-005-ZKS-0002. Delft, Nederland.

Field (2023) Project report 'Waddenzee – LiDAR acquisition for 2023'.

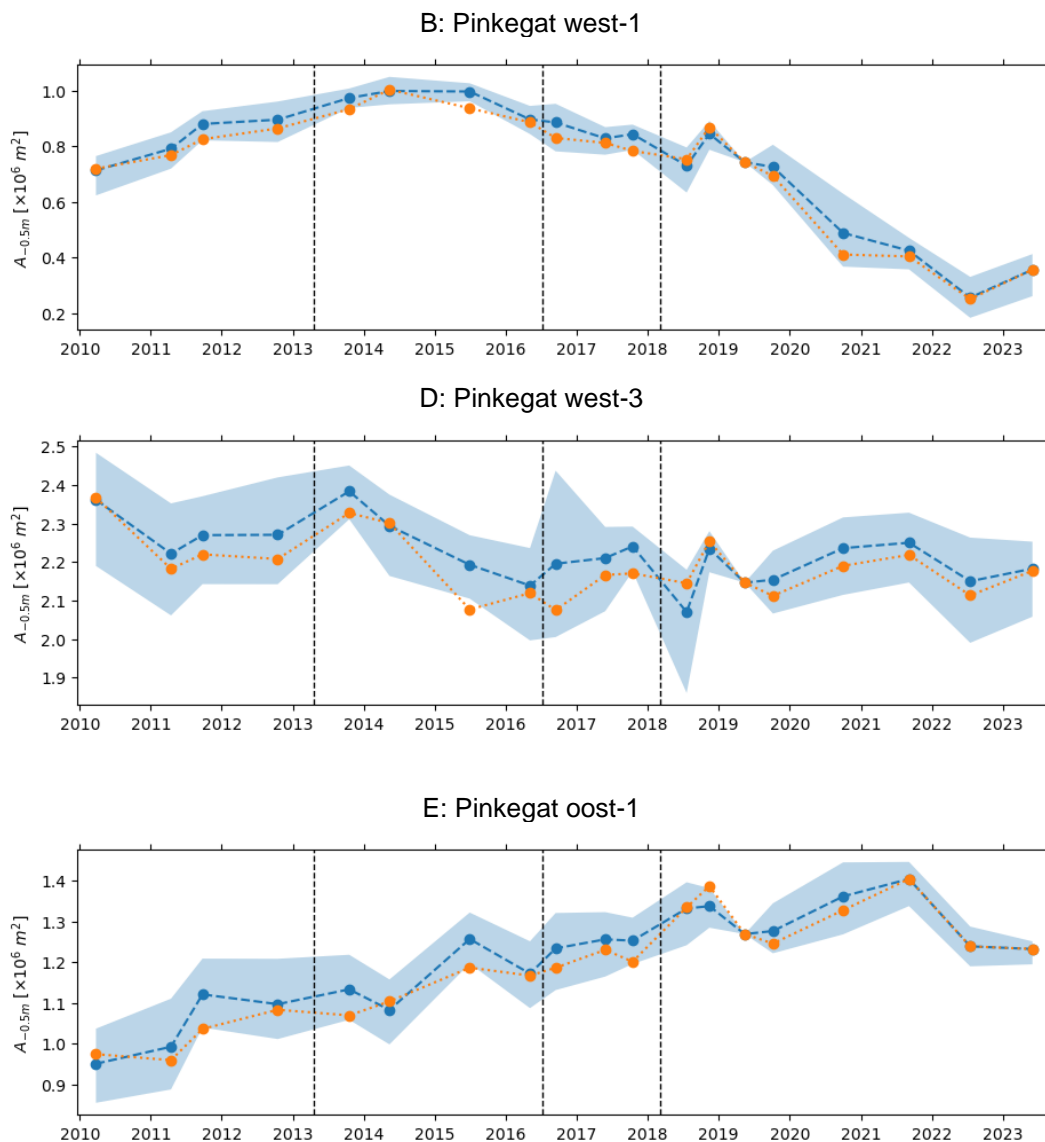
NAM (2023) Meetregister bij de meetplannen Noord-Nederland, Groningen en Waddenzee 2023, Rapportage van satelliet radar interferometrie, Noord-Nederland 2023, 10/2023, EP202303201224.

Commissie MER (2023) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2022. Project nummer 3731; 8 november 2023.

C Deelgebied veranderingen

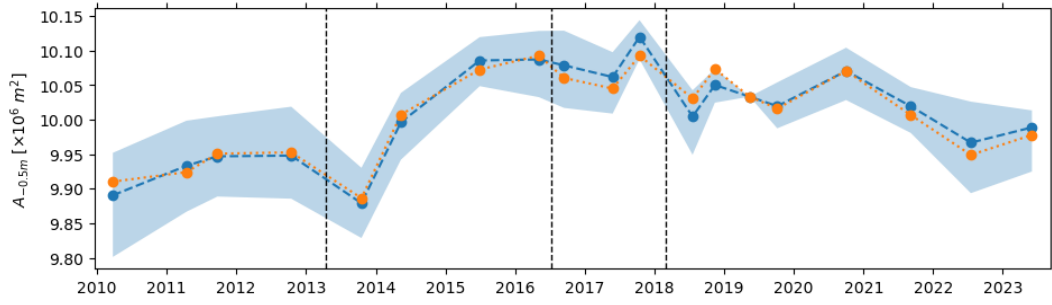
Auteur: Matthijs Gawehn (Deltares)

C.1 Tijdsreeksen deelgebieden

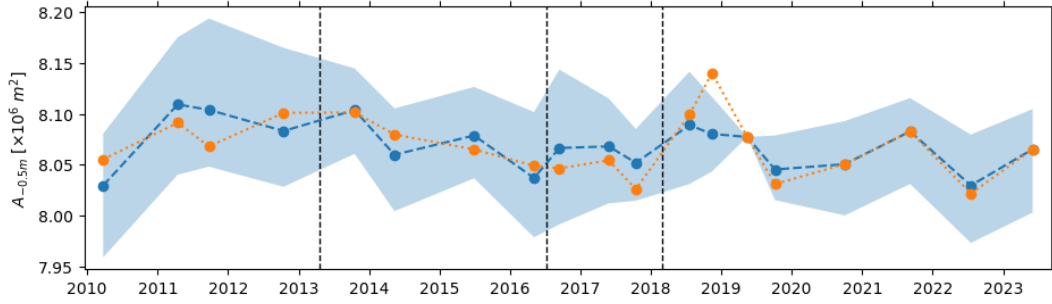


Figuur C-1 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor platen in het Pinkegat (B,D,E in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toont de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de 95% onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale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

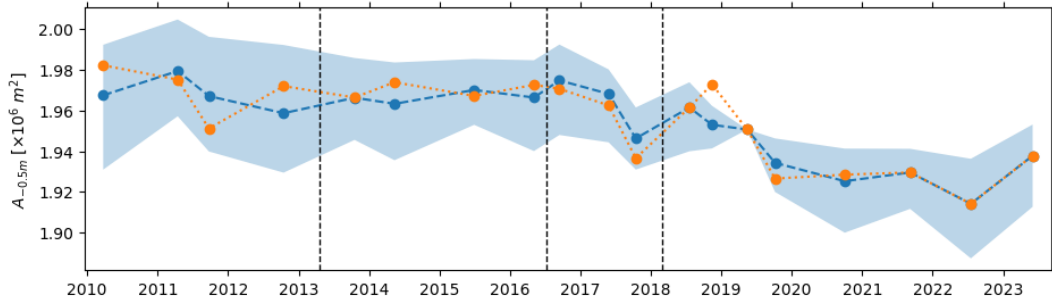
J: Eilanderbult



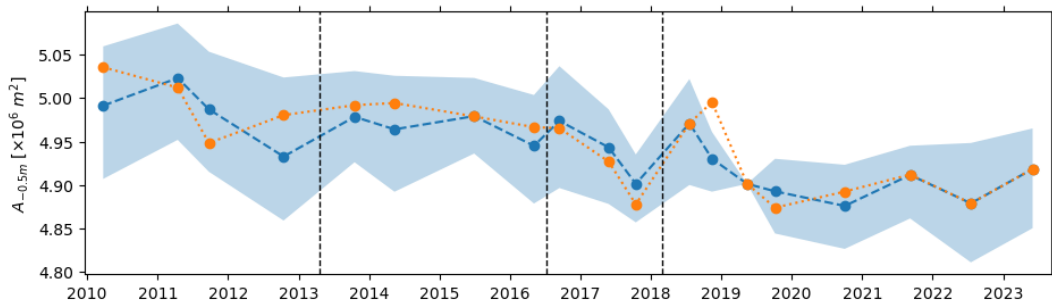
K: Schiermonnikoog zuid-1

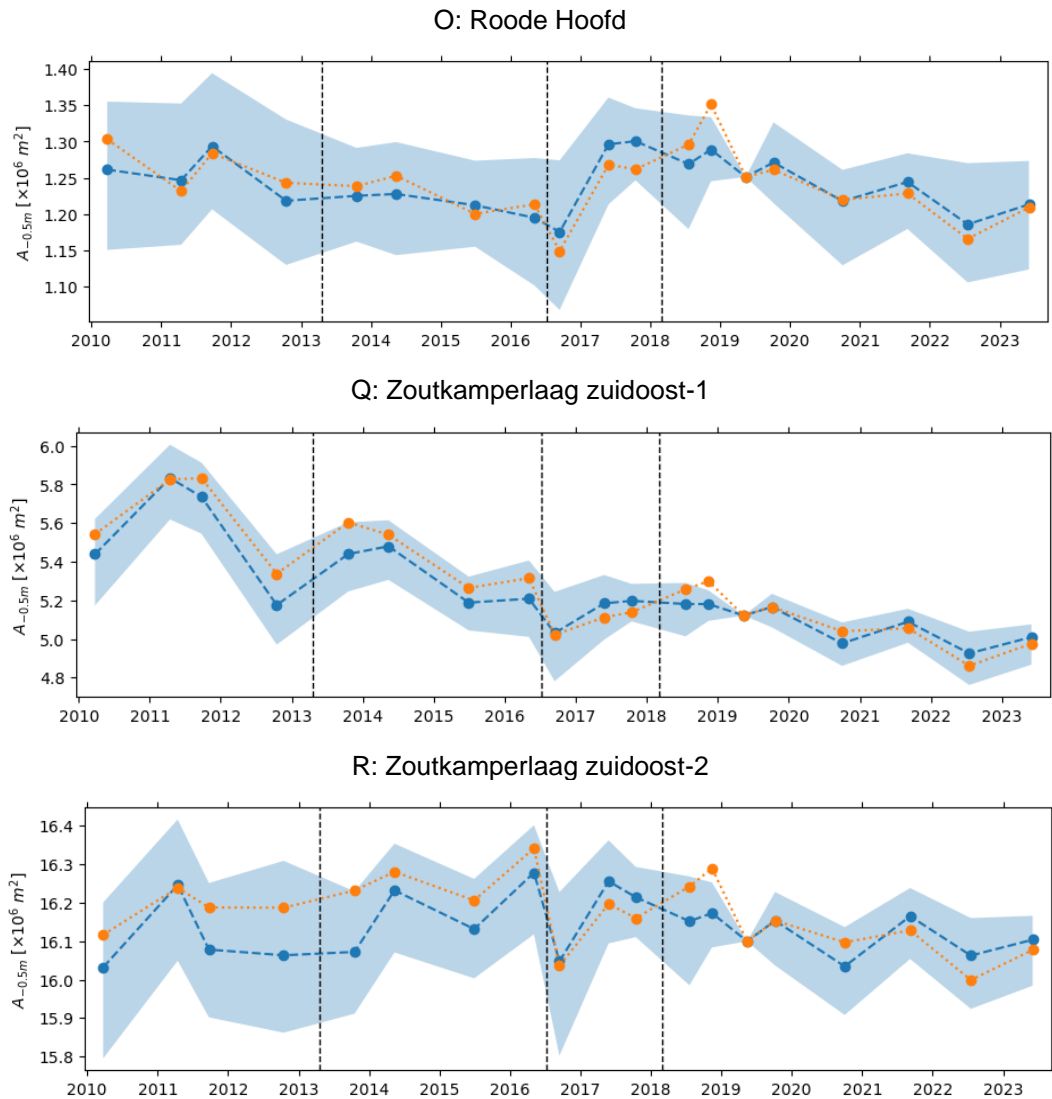


L: Schiermonnikoog zuid-2



M: Schiermonnikoog zuid-3

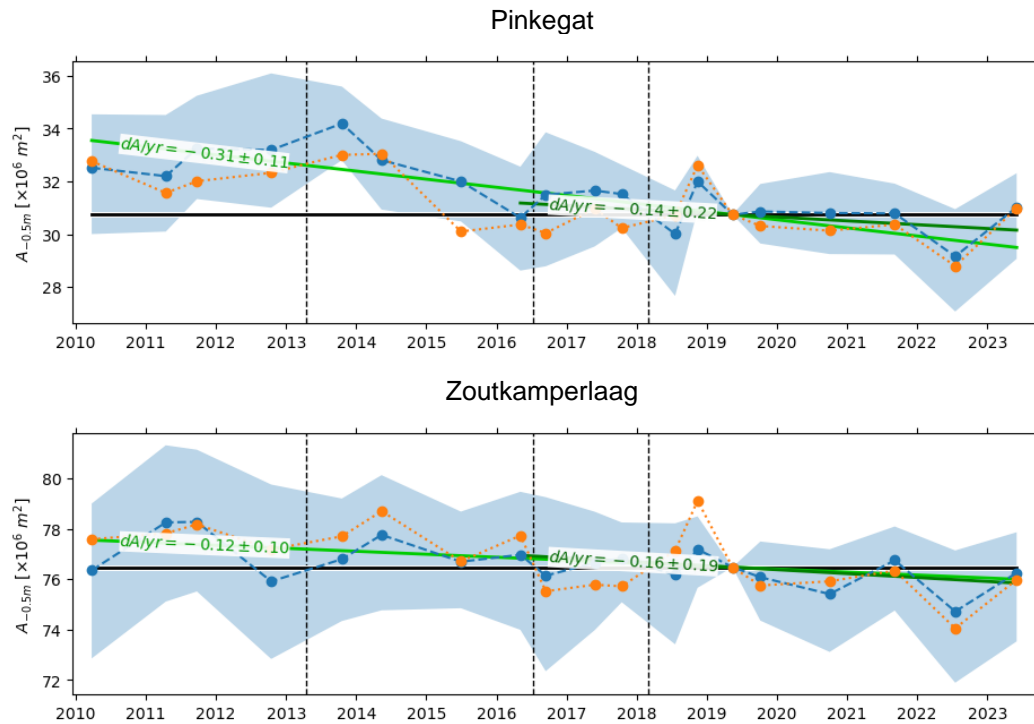




Figuur C-2 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor individuele platen van het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (J,K,L,M,O,Q,R in Figuur 3-3). De oranje reeks (-●-) toon de originele data en de blauwe reeks (-●-) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de 95% onzekerheidsmarge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

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 $w_j = 1/(A_{j,97.5pct} - A_{j,2.5pct})$, 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 C-3 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP -0.5m voor de kombergingsgebieden Pinkegat (boven) en Zoutkamperlaag (onder). De oranje reeks (·-·-) toont de originele data en de blauwe reeks (-·-·-) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de correctie. De 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 -0.31 km^2 per jaar voor de periode tussen 2010 en 2023. 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 2023 kijkt, want gedurende deze 7 jaar is het plaatareaal in het Pinkegat vrij stabiel: de lineaire ontwikkelingen zijn klein (-0.14 km^2 per jaar) en insignificant ten opzichte van de bijbehorende onzekerheid ($\pm 0.22 \text{ km}^2$ per jaar). De meetdienst en het type laserscanner zijn juist in deze periode veranderd (Tabel A.1), waardoor het moeilijk is om morfologische trends te onderscheiden van foutieve trends die veroorzaakt worden door kwaliteitsverschillen in de onderliggende data. De observatie van een stabiel plaatareaal is vergelijkbaar met de Zoutkamperlaag, waar voor de zelfde periode 2016-2023 ook de lineaire ontwikkeling klein is (-0.16 km^2 per jaar) en de bijbehorende onzekerheid relatief groot ($\pm 0.19 \text{ km}^2$ per jaar). In de Zoutkamperlaag zien we voor de gehele periode 2010-2023 maar weinig verandering van plaatareaal volgens de lineaire trend (-0.12 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