

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2024)



Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2024)

Matthijs Gawehn

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2024)

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

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	02-05-2025
Projectnummer	11206685-007
Document ID	11206685-007-ZKS-0001
Pagina's	86
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
1.0	Matthijs Gawehn 	Edwin Elias  Zheng Bing Wang	Laura Vonhögen - Peeters 	

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 Klimaat en Groene Groei (KGG) 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 hoogtekaarten 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 september 2024.

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 2024 is het areaal 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).

In deze rapportage is een aanvullende vraag over de ontwikkeling van droogvaltijden in het Friesche zeegat onderzocht en beantwoord.

“In hoeverre is de ontwikkeling in bodemligging, de gemeten waterstanden dan wel de combinatie van deze twee aspecten van invloed op de droogvalduur in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag.”

De droogvalduur in het Friesche Zeegat wordt bepaald door veranderingen in waterstand en niet door veranderingen in bodemligging. De waargenomen afname in droogvaltijd gedurende de monitoring periode 2010-2024 wordt veroorzaakt door lange termijn (decennia) en middellange termijn (jaren) krachten die de waterstand veranderen. Deze veranderingen zijn niet uniek, maar periodiek en zijn al eerder waargenomen, zoals in de periode 1994-2005. Lange termijn veranderingen worden bepaald door zeespiegelstijging en de astronomische 18.6 jaar cyclus. Een lineaire zeespiegelstijging van 2.8 mm/j gaat gepaard met een afname in droogvaltijd van 0.1 %/j. De 18.6 jaar cyclus in waterstanden heeft een range van 6.2 cm. Samen met de modulatie van het getij veroorzaakt dit een range in droogvaltijd van 1.5%. Middellange termijn veranderingen worden bepaald door de meteorologische oost-west windcomponent. Over perioden van 4-6 jaar zorgen stochastische patronen tot waterstandsverschillen van 11 cm die gepaard gaan met droogvaltijdverschillen van 3.0%. De combinatie van lange en middellange termijn veranderingen leidt tot relatief constante en zelfs licht toenemende droogvaltijden tussen 2010-2018, waarna er een extreme afname in de droogvaltijd plaats vindt van bijna 5% (lineair + astronomisch: 1.9%, meteorologisch: 3.0%) voor de periode 2018-2024.

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 en sterke westelijke wind. Om relaties met de golfhoogte en ook golfperiode mogelijk te maken zijn bestaande golfmetingen bij Nes van de jaren 2019-2024 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 meetreeks 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.

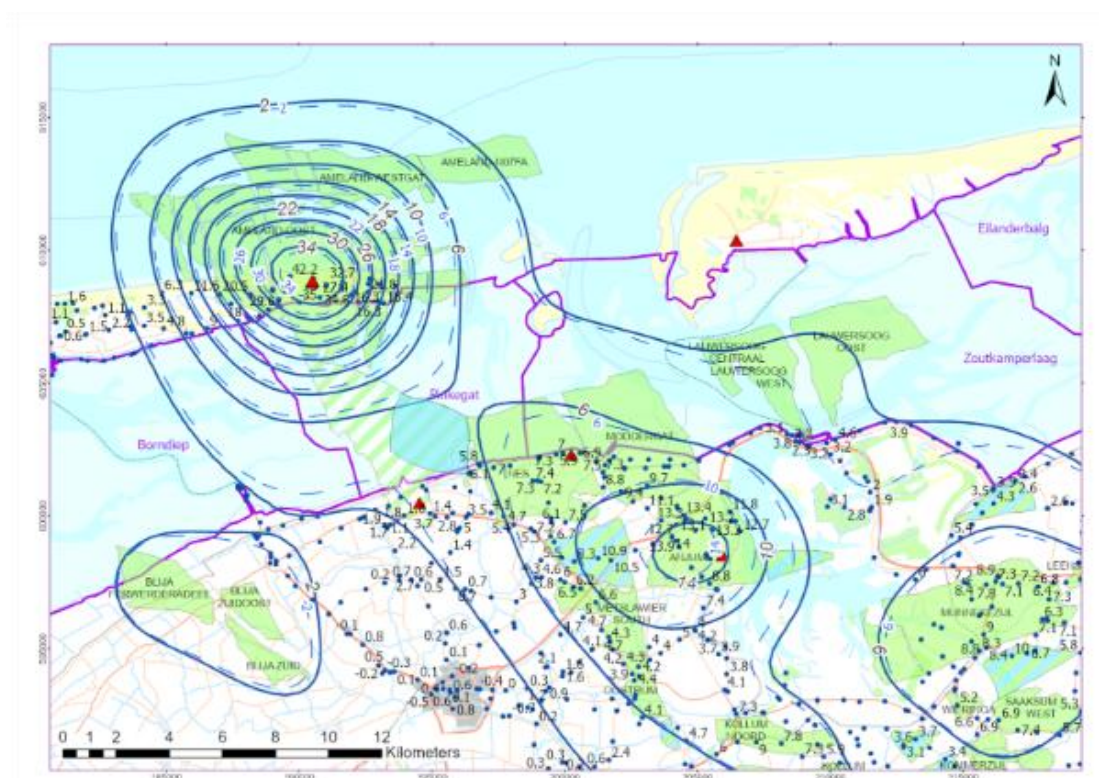
Inhoud

	Samenvatting	4
1	Status waargenomen ontwikkelingen Friesche Zeegat	8
1.1	Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat	9
1.1.1	Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2023	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 2024	12
2.2	Opwerkingsprotocol	13
2.2.1	LiDAR opwerking	13
2.2.2	Correctie systematische afwijking	13
2.2.3	Data overzicht	17
3	Analyse areaalontwikkeling	18
3.1	Weergave van onzekerheid	18
3.2	Kombergingsgebieden	18
3.3	Individuele platen	20
3.3.1	Pinkegat kombergingsgebied (A – F)	20
3.3.2	Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G-H)	21
3.3.3	Zoutkamperlaag(I-R)	22
3.4	Langetermijntrends	23
3.5	Conclusies areaalontwikkeling	27
4	Analyse ontwikkeling plaathoogte	28
4.1	Hypsometrie kombergingsgebieden	28
4.2	Hypsometrie individuele platen	29
4.3	Tijdsgemiddelde ontwikkeling	36
4.4	Profielen	37
4.5	Conclusies plaathoogte ontwikkeling	40
5	Invloed hydrodynamische en meteorologische condities	41
5.1	Aanvulling van golfmetingen bij Nes	42
5.2	Invloed condities tijdens inwinning	42
5.3	Invloed stormachtigheid tussen opnamen	43
5.4	Invloed golfklimaat tussen opnamen	45
5.5	Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities	46
6	Ontwikkeling droogvaltijd	48

6.1	Waterstandsmetingen	48
6.2	Decompositie en interpolatie van waterstandsmetingen	49
6.3	Droogvaltijden LiDAR en Vaklodingen	51
6.4	Waarnemingen van droogvaltijden en waterstand	54
6.5	Theoretische beschouwing van droogvaltijd in relatie tot waterstandsobservaties	55
6.6	Waargenomen droogvaltijd in relatie tot waterstandsobservaties (decennia, lange termijn)	58
6.7	Waargenomen droogvaltijd in relatie tot wind en waterstand (jaren, middellange termijn)	60
6.8	Waargenomen droogvaltijd in relatie tot wind en waterstand (seizoenen, korte termijn)	62
6.9	Conclusies ontwikkeling droogvalduur	64
7	Conclusies en aanbevelingen	66
7.1	Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?	66
7.2	In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?	66
7.3	In welke mate is de dynamiek van het plaatgedrag in het Friesche Zeegat te correleren aan andere factoren die niet met bodemdaling samenhangen?	67
7.4	In hoeverre is de ontwikkeling in bodemligging, de gemeten waterstanden dan wel de combinatie van deze twee aspecten van invloed op de droogvaltijd in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag?	67
7.5	Aanbevelingen	67
	Referenties	69
A	Overzicht vluchtgegevens	71
B	NAM rapportage datareeks correctie	74
	Samenvatting 74	
B.1	Meetpunten voor de berekening van correctie parameters	74
B.1.1	Ground Control Point grids	74
B.1.2	Harde topografie punten	75
B.1.3	Sediment grids	75
B.2	Correctie parameters	76
B.2.1	Berekening correctie parameters	76
B.2.2	Evalutie correctie parameters	77
B.3	Referenties	78
C	Deelgebied veranderingen	79
C.1	Tijdseries deelgebieden	79
C.2	Lineaire trends in tijdseries Pinkegat en Zoutkamperlaag	81
D	Random Forest Modellen	83
D.1	Validatie	83

1 Status waargenomen ontwikkelingen Friesche Zeegat

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



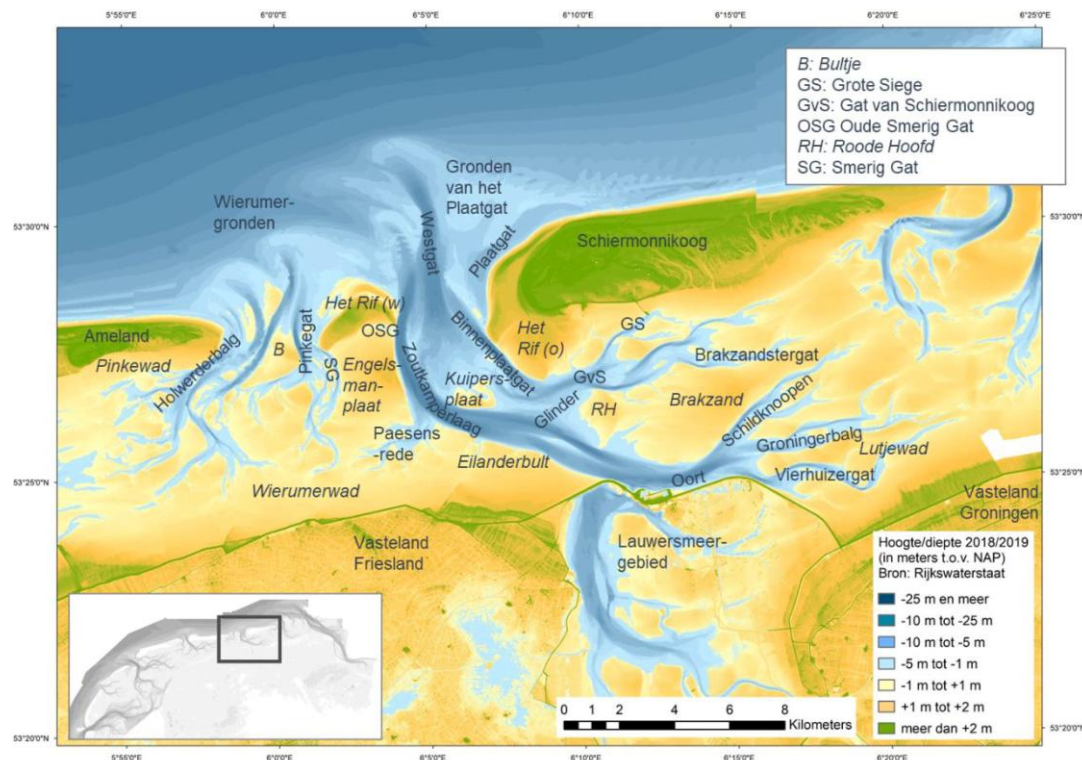
Figuur 1-1 Totale bodemdaling in cm (status modelcontour in blauw: 1-1-2024) sinds de start van de gaswinning in het gebied (1986). De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2023 volgens de M&R-rapportage over 2022. De blauwe punten met label op het vaste land representeren de peilmerken met gemeten hoogteverschillen tussen 1997 en 2023. De blauwe punten met label op Ameland representeren de peilmerken met gemeten daling tussen 1986 en 2023. De rode driehoeken geven de posities van de GNSS stations aan.

Voor de gaswinning geldt het hand-aan-de-kraan principe waarbij monitoring van veranderingen in het gebied een belangrijke rol speelt (NAM, 2007). De effecten van bodemdaling op morfologie en ecologie in het Waddengebied worden voortdurend onderzocht. Deltares voert jaarlijks een morfologische analyse uit. Het voorliggende rapport is onderdeel van de monitoringscyclus 2024. Leidend in deze rapportage is de vraag of de morfologie van de wadplaten gevolgen ondervindt van de diepe bodemdaling door gaswinning. Daarnaast is op verzoek van de Auditcommissie en de NAM ook onderzocht of de droogvaltijden in het kombergingsgebied zijn veranderd en welke oorzaken dat heeft.

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, 2024) is één nieuwe opname uit september 2024 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 2023

Gawehn (2024) constateerde dat over de meetperiode 2010-2023 zowel in het kombergingsgebied Pinkegat als in de Zoutkamperlaag de veranderingen in plaatareaal (Pinkegat: -2km², Zoutkamperlaag: 0 km²) binnen de foutmarge van de metingen (Pinkegat: 4 km², Zoutkamperlaag: 6 km²) bleven. Daarmee kan er vanuit de bodemveranderingen uit LiDAR data niet geconcludeerd worden dat er effecten van bodemdaling zichtbaar zijn.

Op de schaal van deelgebieden binnen de kombergingsgebieden zijn morfologische veranderingen groter dan de foutmarge van de metingen waargenomen. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen en het daarbij behorende sedimenttransport leiden tot veranderingen in plaathoogte die het effect van bodemdaling op lokale schaal versluieren. Een eenduidig bodemdalingssignaal in de morfologie kwam niet naar voren uit de LiDAR dataset. Dit kwam overeen met het feit dat geodetische modelberekeningen ook een verwaarloosbare invloed 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 effecten van meetfouten gereduceerd, wat er toe heeft

geleid dat de geconstateerde areaalveranderingen coherent zijn in de tijd en daardoor beter te interpreteren zijn.

1.1.2 Status kennis morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat

Het Friesche Zeegat bestaat uit twee kombergingsgebieden. De getijdegeul Pinkegat voedt het westelijke, relatief kleine kombergingsgebied, dat bestaat uit ondiepe en dynamische geulen. De geul Zoutkamperlaag voedt een groter kombergingsgebied, met een dieper en stabiel geulsysteem. Geulmigratie in het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag wordt gedeeltelijk tegengehouden door geologische erosie-resistente lagen (Holocene klei- en veenlagen). Bij de ondiepere geulen van de Pinkegat spelen zulke lagen geen duidelijke rol. Het zeegat Pinkegat bestaat afwisselend uit één of meerdere (tot vier) geulen. De veranderingen in deze configuratie hebben invloed op de ontwikkeling van de oostpunt van Ameland. Deze veranderingen zijn niet duidelijk cyclisch, maar tonen wel een enigszins herhalend gedrag (Elias, 2019; Oost et al., 2020; Elias en Oost, 2021).

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 “Aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen” van 30 oktober 2024 (Commissie MER, 2024).

De Auditcommissie onderschrijft de conclusie van de NAM dat er geen aanwijzingen zijn voor een verband tussen wadplaatareaal en -hoogte enerzijds en de diepe bodemdaling anderzijds. Dit geldt ook voor de conclusie dat natuurlijke processen in belangrijke mate het plaatgedrag bepalen. Door de geulplaatdynamiek, in combinatie met wisselende meteorologische en hydrodynamische condities.

In de rapportage over draagkracht voor vogels van het monitoringsjaar 2023 (Sovon, 2024) wordt aangegeven, dat in het Pinkegat de droogvalduur in het gebied over de periode 2008-2023 is afgenomen met 7%. Vanwege het belang van de droogvalduur voor het foerageren van vogels adviseert de Auditcommissie om het aspect droogvalduur nader te onderzoeken. De centrale vraag is daarbij “in hoeverre de ontwikkeling in bodemligging, de gemeten waterstanden dan wel de combinatie van deze twee aspecten van invloed is op de droogvalduur in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. “

De Auditcommissie adviseert een nadere analyse te maken en daarbij:

- De procedure rond de interpolatie van gemeten waterstanden nader tegen het licht te houden.
- Zoveel mogelijk gebruik te maken van synoptische data voor de bodemligging van wadplaten. Zowel LiDAR data als ook (recente) Vaklodingen.

- Specifieke aandacht te besteden aan het mogelijke effect van de 18.6-jarige astronomische cyclus in het getij en de invloed van windvelden op lokale waterstanden op zowel de schaal van seizoenen als ook voor de gehele monitoringperiode.
- Op basis van het onderzoek aangeven in hoeverre er mogelijke consequenties zijn voor het monitoringprogramma.

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?

Daarnaast wordt in deze rapportage ook een aanvullende analyse naar de droogvaltijd van de wadplaten gedaan. De centrale onderzoeksvraag is daarbij:

“In hoeverre zijn de ontwikkeling in bodemligging, de gemeten waterstanden dan wel de combinatie van deze twee aspecten van invloed op de droogvalduur in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag?”

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. In Hoofdstuk 6 wordt de ontwikkeling van de droogvaltijden geanalyseerd. Tenslotte worden in Hoofdstuk 7 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

2 Verwerken van LiDAR data

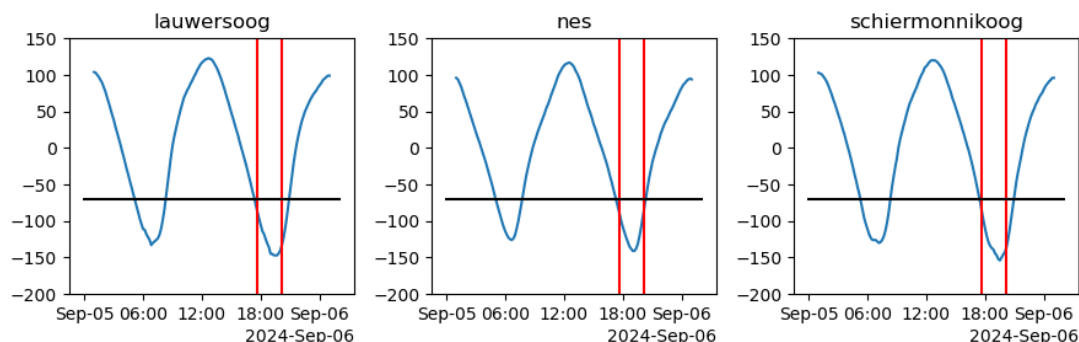
In dit hoofdstuk wordt de kwaliteit van de nieuwste LiDAR opnamen besproken. Daarnaast wordt de methodiek beschreven van opwerking van de LiDAR data tot een geschikte dataset voor het analyseren van plaatareaalveranderingen.

2.1 Beschrijving opnamen 2024

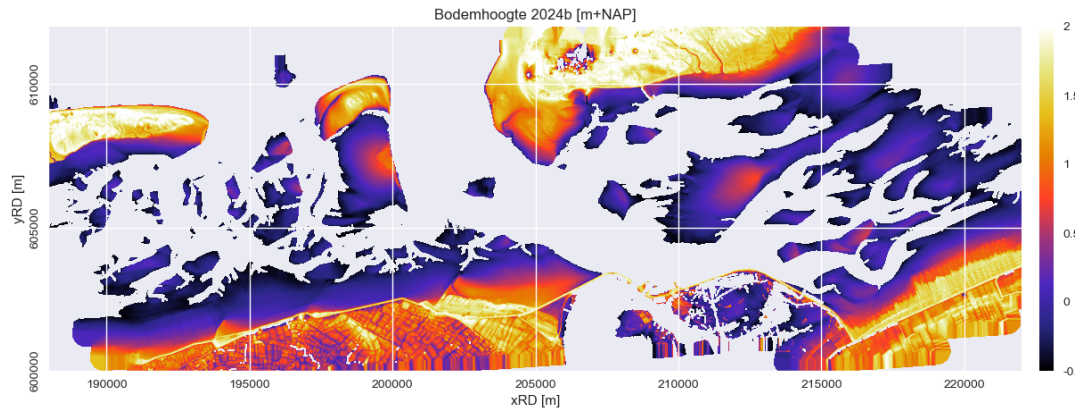
Op 5 september 2024 heeft Terratec wederom LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat gemaakt. Het rapport van Terratec (2024) beschrijft het vliegplan, de vlakdekking, puntendichtheid en de kwaliteitscontrole. Net als in de jaren 2020 tot 2023 is ook in 2024 een vluchthoogte van 1750 m aangehouden. De minimale puntendichtheid geassocieerd met deze hoogte is nog steeds 5.7 punten/m², wat voldoende is voor het opwerken naar rasters van 1x1m en 10x10m.

Het vluchtplan is gebaseerd op het getijvenster van de stations Lauwersoog, Nes en Schiermonnikoog, waarbij de waterstand op al deze stations lager dan NAP -0.7 m moet zijn. Hierdoor ligt er zoveel mogelijk plaatareaal droog tijdens de metingen. De LiDAR opname lag binnen de getijvensters van alle drie stations (Figuur 2-1). Hierbij wordt opgemerkt dat het meetstation Holwerd in de zomer 2024 is verzand en in tegenstelling tot eerdere rapportages niet kon worden gebruikt voor controle. De vlakdekking door de overige drie stations wordt echter voldoende geacht voor controle. In het verleden lag het begin van de LiDAR opname wel eens net vóór het getijvenster bij Holwerd (Gawehn, 2023, 2024), maar dat was voor deze locatie geen probleem omdat de vlieglijnen hier niet in het eerste survey uur werden opgenomen en dat is ook voor de survey van 2024 het geval.

De vlakdekking van de 2024 LiDAR opname bevat het gehele Friesche Zeegat (zie Terratec AS. (2024) en Figuur 2-2) en is vergelijkbaar met eerdere metingen. Een samenvatting van gegevens over meetdienst, instrumentgebruik en inwinduur bij elke opname is getabuleerd in Bijlage A.



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



Figuur 2-2 Hoogtekaart van de ingewonnen data in najaar 2024, na toepassing van correctievlak.

2.2 Opwerkingsprotocol

Voor de interpretatie van de NAM meetreeks is de 2024 opname opgewerkt volgens het standaard protocol (zie Van der Lugt et al., 2019; 2020a). Hierbij is ook het correctievlak meegenomen, zoals uitgewerkt door de NAM (Van der Lugt et al., 2020a; Van der Vegt & Van der Lugt, 2021, 2022).

2.2.1 LiDAR opwerking

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

Dat is kort samengevat:

- Wegfilteren van LAS punten uit (controle) dwarslijnen.
- Wegfilteren van LAS punten boven NAP+2m.
- Wegfilteren van vlieglijnen waarvan uit de rapportage blijkt dat deze buiten het getijvenster zijn gevlogen
- Mediaan van de LAS punten binnen een rooster cel bepalen op standaard 1x1m, 10x10m en 20x20m rooster, waarbij geen minimum aantal punten wordt aangehouden.
- Wegfilteren van rooster cellen 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 (2010-2024) 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.

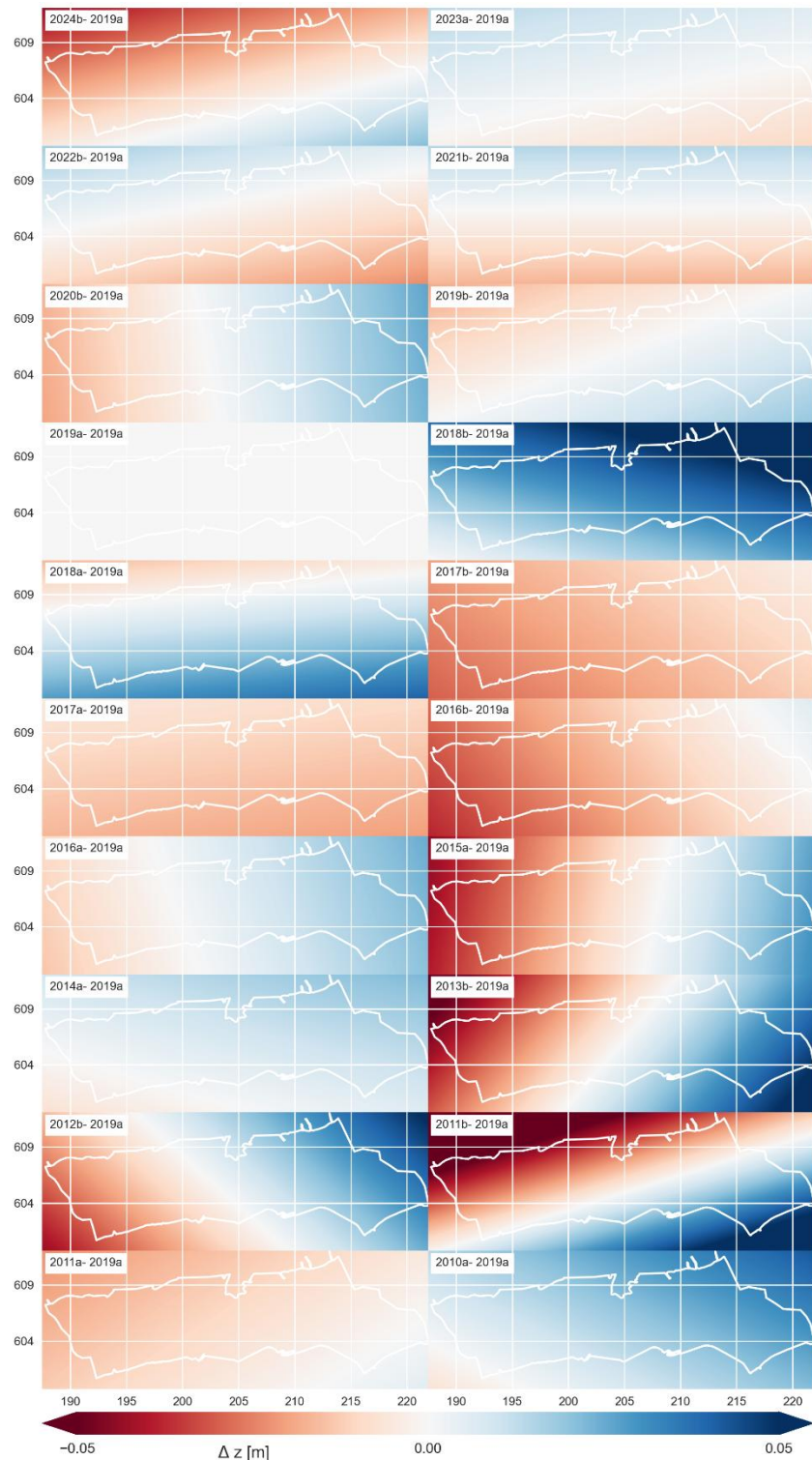
Hier vatten we het uiteindelijke stappenplan waartoe NAM is gekomen samen:

- 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.

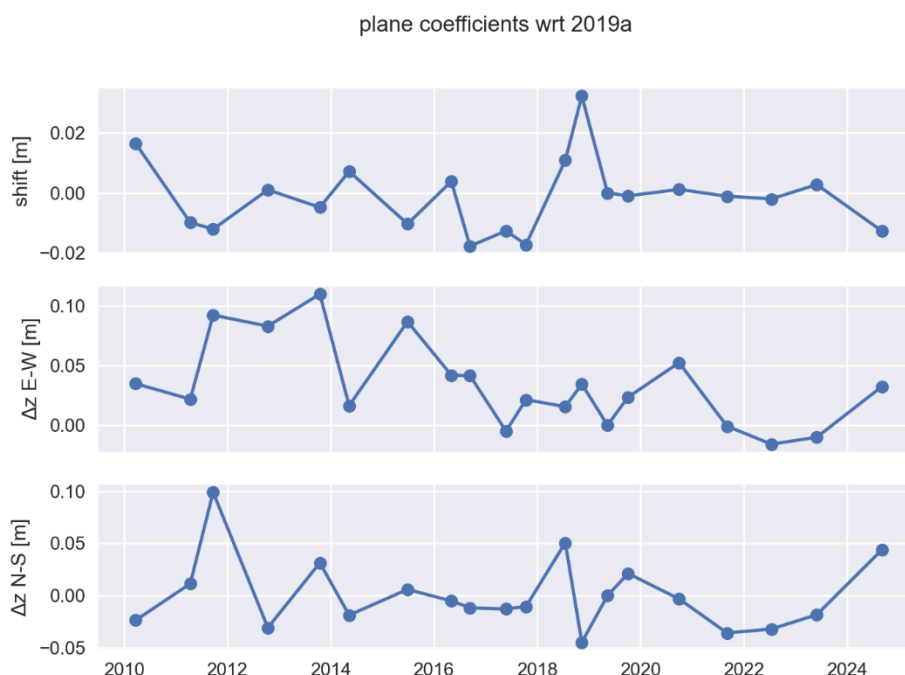
Tabel 2.1 Correctievlak coëfficiënten per survey.

survey	a	b	c
2010a	0.00083	0.00169	-1.17620
2011a	0.00052	-0.00081	0.37546
2011b	0.00220	-0.00707	3.82576
2012b	0.00198	0.00220	-1.73411
2013b	0.00262	-0.00224	0.82078
2014a	0.00039	0.00134	-0.88405
2015a	0.00207	-0.00042	-0.17601
2016a	0.00100	0.00037	-0.42340
2016b	0.00099	0.00084	-0.72769
2017a	-0.00012	0.00092	-0.54579
2017b	0.00051	0.00075	-0.57523
2018a	0.00037	-0.00361	2.12337
2018b	0.00082	0.00320	-2.07344
2019a	0.00000	0.00000	0.00000
2019b	0.00056	-0.00151	0.80041
2020b	0.00125	0.00023	-0.39199
2021b	-0.00002	0.00256	-1.54840
2022b	-0.00038	0.00229	-1.31258
2023a	-0.00024	0.00131	-0.74238
2024b	0.00077	-0.00312	1.72176



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

De effecten van de correctie zijn samengevat in Figuur 2-4. De vastgestelde effecten in dit rapport zijn consistent met eerdere studies (Gawehn, 2023, 2024), 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 2024b zijn de correcties iets groter dan in de meest recente jaren 2019-2023, maar ook niet uitzonderlijk vergeleken met metingen daarvoor, zoals bijvoorbeeld meting 2018b (Figuur 2-3 en Figuur 2-4).



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 hoogtekarten
2. de originele hoogtekarten

Binnen beide gemeten datasets bestaan ook nog roosterzellen waar in sommige jaren geen LAS punten in zijn gevallen en dus geen waarde toegekend hebben gekregen. In recente jaren is het aantal lege roosterzellen 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 2019-2024 verwijzen wij naar de corresponderende jaarlijkse rapporten (Van der Lugt et al., 2020a; Van der Vegt en Van der Lugt, 2021,2022; Gawehn 2023, 2024). De nieuwe dataset van 2024 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

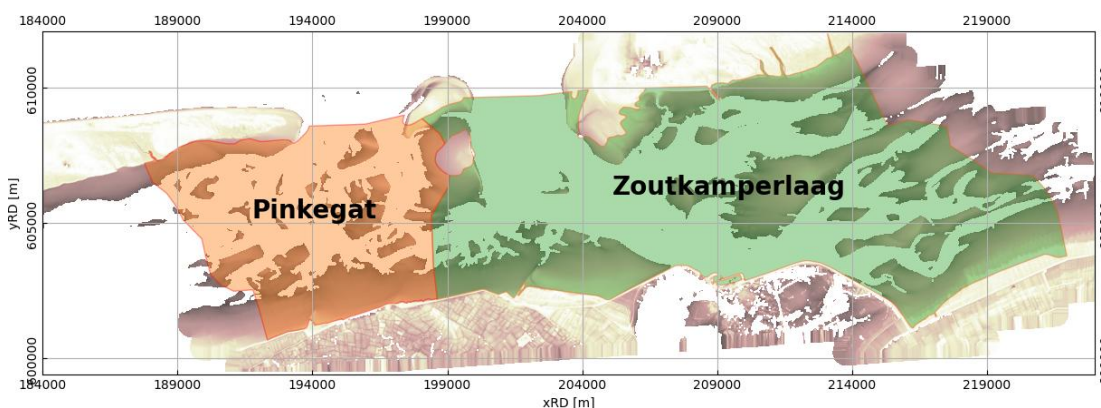
In dit hoofdstuk rapporteren we de ontwikkeling van het plaatareaal voor zowel de kombergingsgebieden als individuele platen op basis van 10x10 m grids van de LiDAR opnamen van 2010 tot en met 2024. Ook plaatsen we deze observaties in de context van de Vaklodingen dataset van Rijkswaterstaat. Alle ontwikkelingen 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 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.

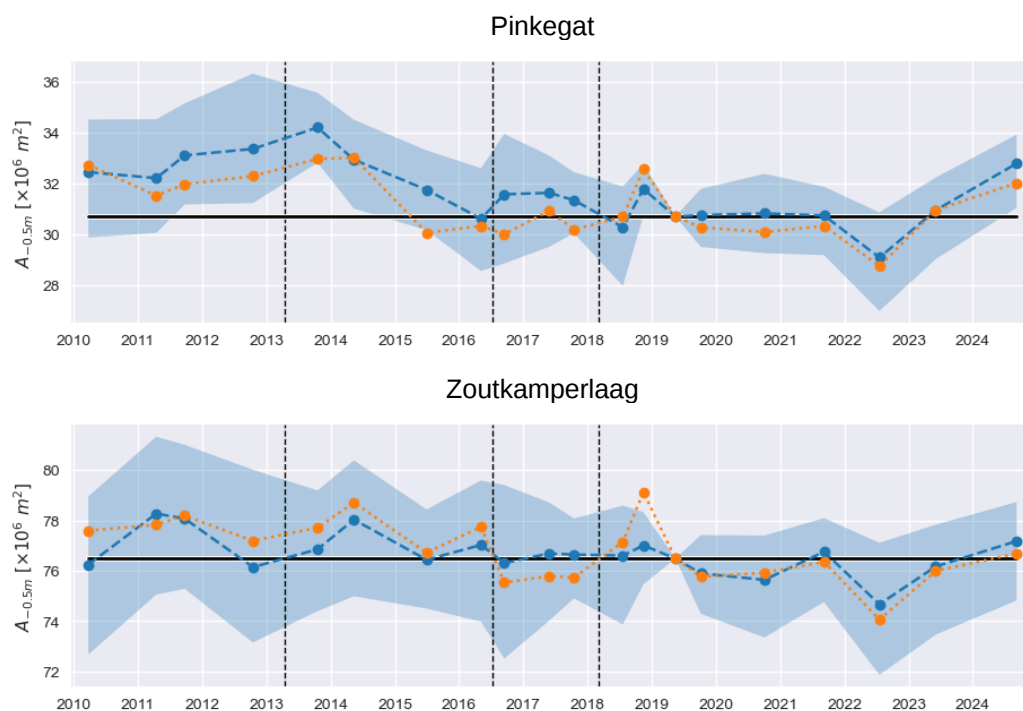


Figuur 3-1 Analysepolygonen voor areaalontwikkeling op kombergingsschaal. Deze polygonen zijn hetzelfde als in voorgaande jaren.

De correctie op de dataset leidt tot een verkleining van onregelmatigheden in plaatareaal van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. De correctie verwijdert niet de fluctuaties in de meetreeksen, 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 2024 is het areaal vrij stabiel (wat ook blijkt uit berekende lineaire trends voor deze periode, zie Appendix C.2) en de LiDAR opname van 2024 suggereert zelfs een lichte groei. Gawehn (2024) merkt op dat verschillen in de meetdienst en het type laserscanner mogelijk ook voor kwaliteitsverschillen kunnen zorgen tussen LiDAR data vóór en ná 2016 en daarmee de bepaling van structurele morfologische trends kunnen bemoeilijken. Een beschouwing op basis van lineaire trends dekt niet de complexiteit van de geobserveerde veranderingen in plaatareaal. Als men het begin 2010 en het eind 2024 van de metingen bij het Pinkegat beschouwd, is het plaatareaal volgens de onzekerheidsmarge vrijwel onveranderd (Figuur

3-2, gecorrigeerde metingen en onzekerheidsbanden rond 2010 en 2024). Deze observatie is vergelijkbaar met de Zoutkamperlaag (Figuur 3-2, zie ook Appendix C.2). Hier wordt voor de gehele periode 2010-2024 maar weinig verandering van plaatareaal geobserveerd. Vergelijkt men de twee specifieke momenten van de begin situatie 2010 met de eind situatie 2024 is nagenoeg niets veranderd aan het totale plaatareaal van de Zoutkamperlaag (zie Figuur 3-2: gecorrigeerde LiDAR metingen van 2010 en 2024 liggen ongeveer op zelfde hoogte).

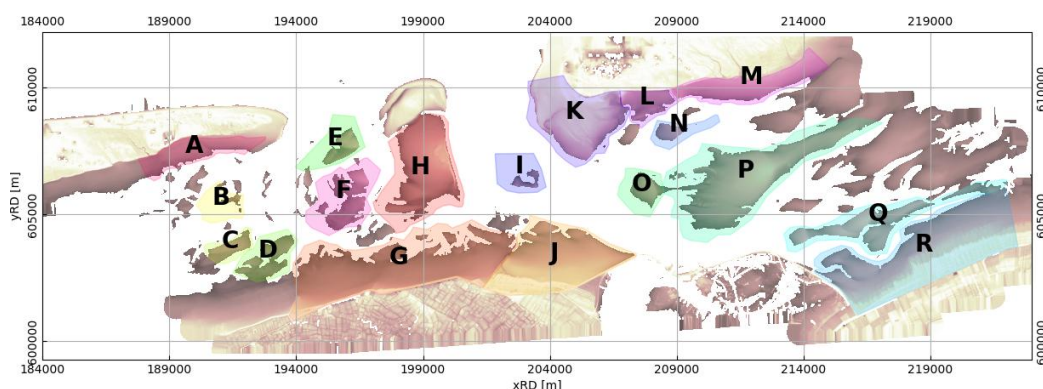
Over het algemeen zijn de plaatontwikkelingen in opeenvolgende jaren vaak een order groter dan de ontwikkelingen op langere termijn: De specifieke LiDAR meting van 2024 laat zien dat de plaatarealen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag binnen één jaar zijn toegenomen met respectievelijk 1 km² en 3 km² en daarmee de dip in 2022 inmiddels overcompenseren (zie Gawehn, 2023). De tijdsreeksen van plaatarealen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag zullen langer moeten worden om structurele veranderingen vast te kunnen stellen. In paragraaf 4.3 gaan wij in meer detail in op plaathoogteontwikkelingen.



Figuur 3-2 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP -0.5m 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 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

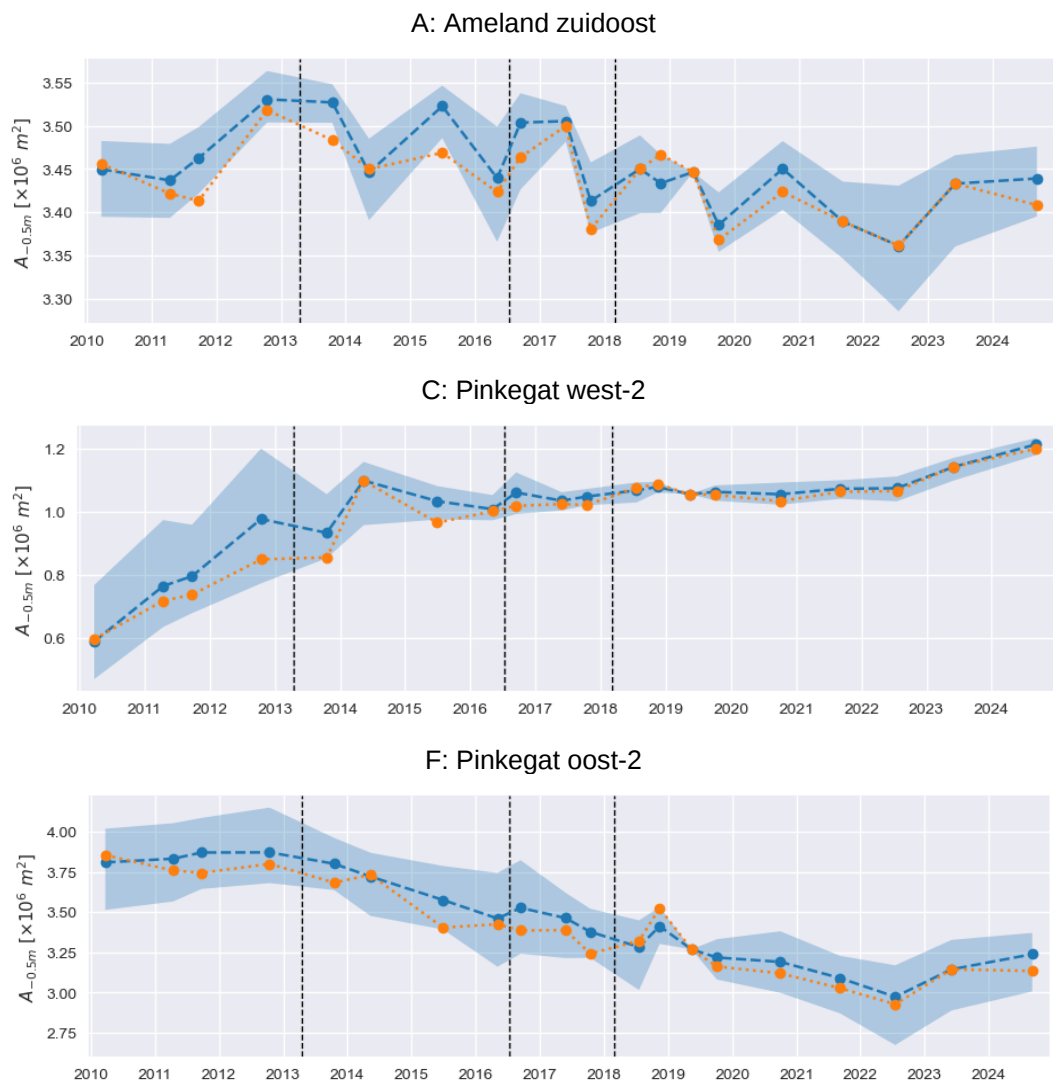
Op geaggregeerd kombergingsniveau is geen structurele ontwikkeling in areaal af te leiden. Dit komt deels door de kwaliteitsverschillen van opeenvolgende LiDAR data, maar ook door de lange tijdschaal waarop structurele veranderingen kunnen worden vastgesteld (zie paragraaf 3.4). Daarnaast vallen op geaggregeerde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



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

3.3.1 Pinkegat kombergingsgebied (A – F)

De areaalontwikkeling van individuele platen in het Pinkegat verschilt en kan stijgen en dalen (Figuur 3-4). Bijvoorbeeld in deelgebied A schommelt het plaatareaal sterk, met grote onzekerheid. Het areaal lijkt tussentijds licht te dalen, maar in 2024 is het plaatniveau nagenoeg weer het zelfde als in 2010. De dalingen van gebied A zijn gelijkwaardig met dalingen in vergelijkbare gebieden ten zuiden van Schiermonnikoog die niet in de bodemdalingskom zitten (cf. L, M in Appendix C.1). In het westen (B, C, D) en oosten (E, F) van het Pinkegat zijn zowel platen te vinden die groeien (C, E) als krimpen (B, F) (zie voorbeelden C,F in Figuur 3-4; voor andere deelgebieden zie Appendix C.1). Deze veranderingen horen bij de dynamiek van het Pinkegatsysteem.

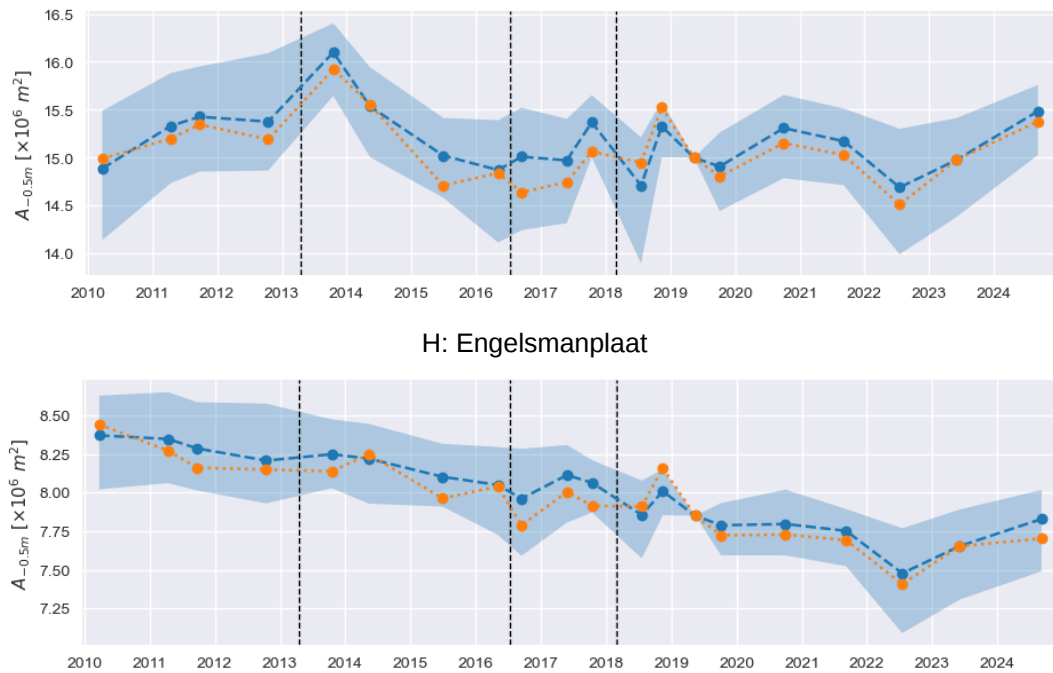


Figuur 3-4 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor enkele platen in het Pinkegat (A,C,F in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toont de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale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

3.3.2 Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G-H)

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

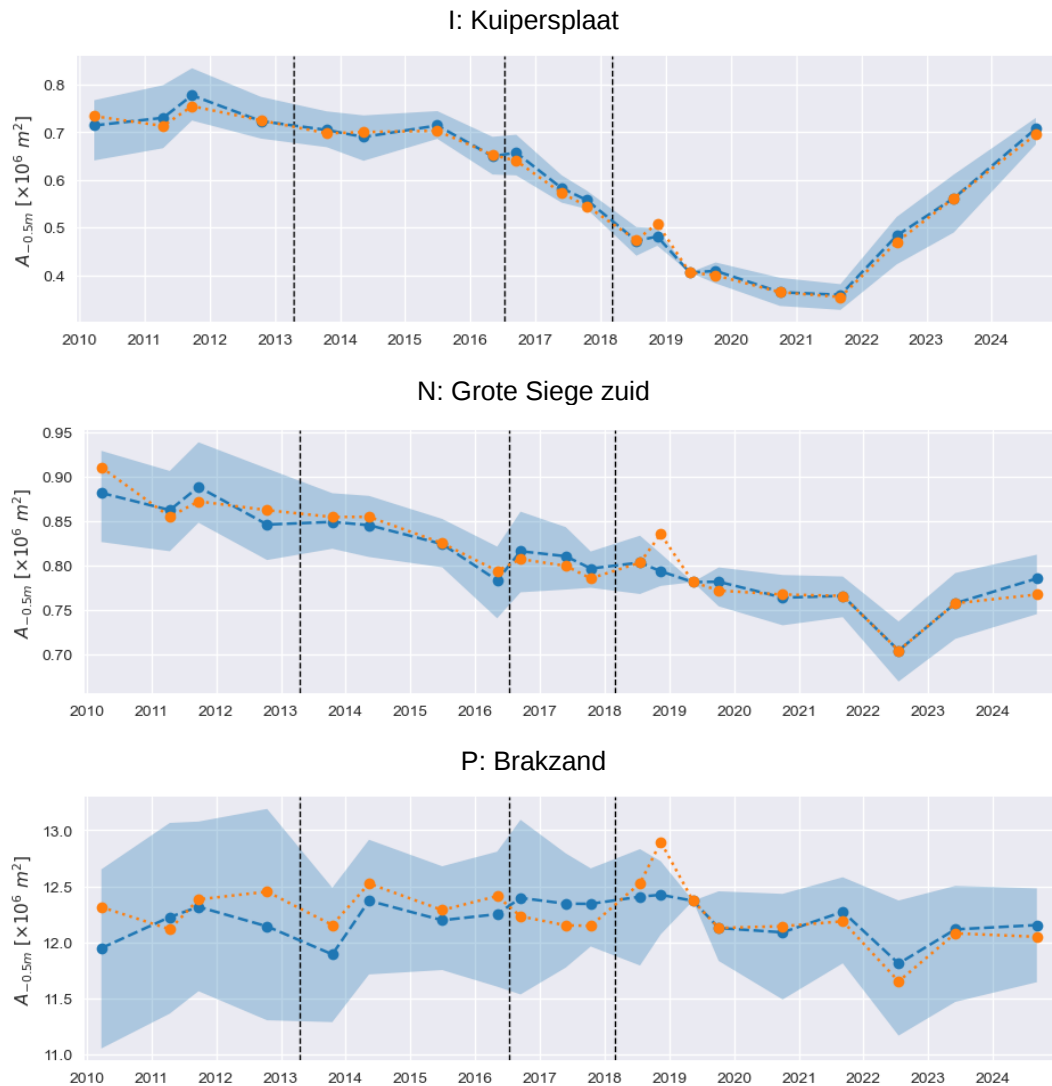
G: Wierumerwad



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.

3.3.3 Zoutkamperlaag(I-R)

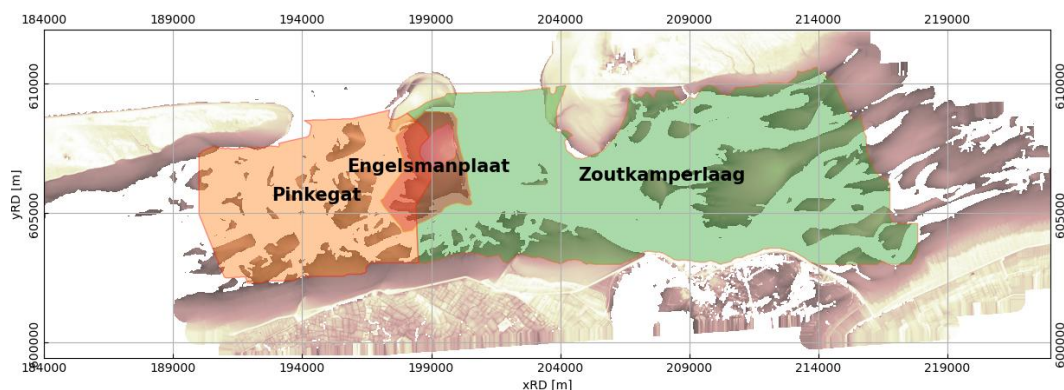
De platen in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag vallen buiten het sterkste bodemdalingsgebied en worden hier ter referentie besproken. Ook in de Zoutkamperlaag zien we hoe natuurlijke dynamiek kan bijdragen aan het krimpen en groeien van platen, voornamelijk in de buurt van de grotere geulen, zie bijvoorbeeld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



Figuur 3-6 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m 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 3-7). Dit voorkomt dat er bathymetrie moet worden geëxtrapoleerd. In de huidige rapportage is een nieuwe Vakloding van 2024 beschikbaar.

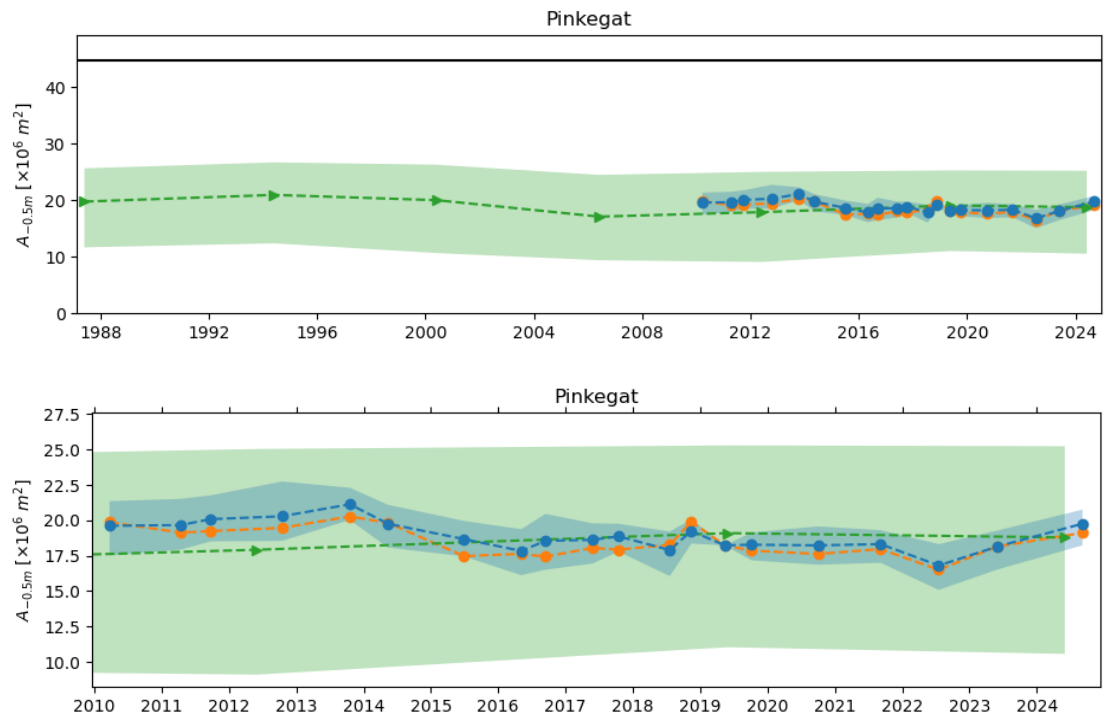


Figuur 3-7 De bijgesneden polygonen voor de analyse van langetermijntrends. Bijsnijding heeft plaatsgevonden op basis van de vlakdekking van de Vaklodingenreeks.

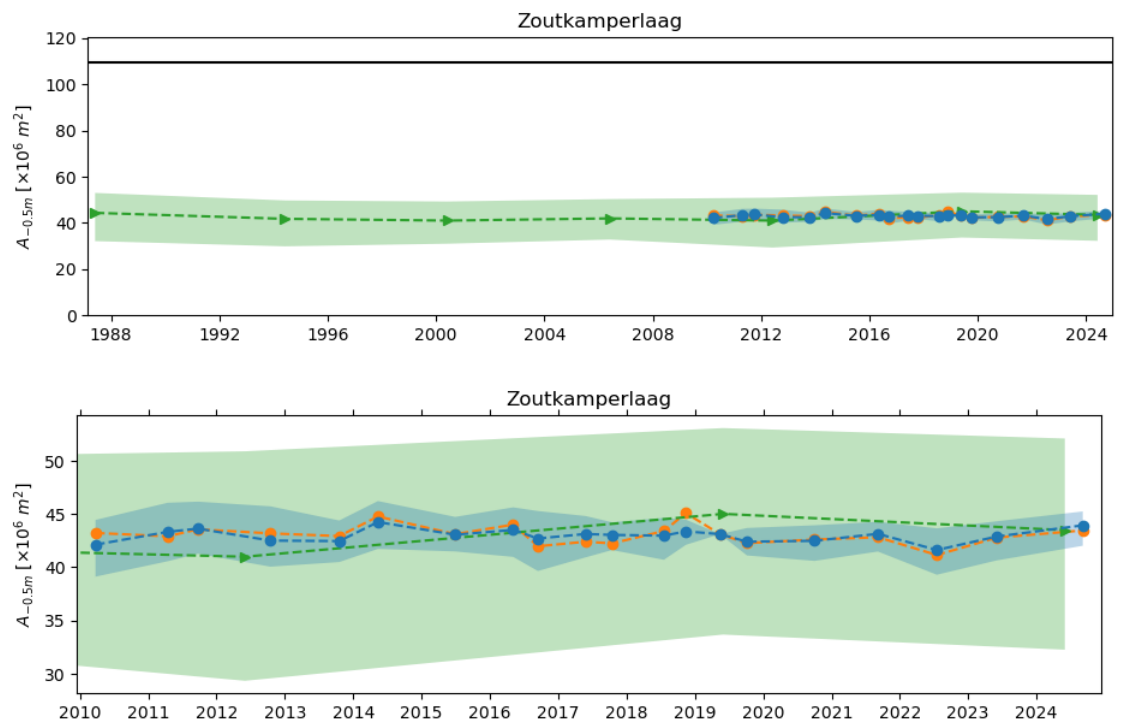
Een vergelijking van areaalontwikkeling op basis van de RWS Vaklodingen voor de periode 1987-2024 en een uitsnede van de NAM LiDAR data gedurende de monitoringsperiode sinds 2010 wordt weergegeven in Figuur 3-8, Figuur 3-9 en Figuur 3-10. Er zijn drie RWS opnamen die binnen de monitoringsperiode vallen: een opname in 2012, 2019 en een opname in 2024. Deze opnamen 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 en 2024 areaal, maar dit verschil is klein (Figuur 3-8, Figuur 3-9).

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.

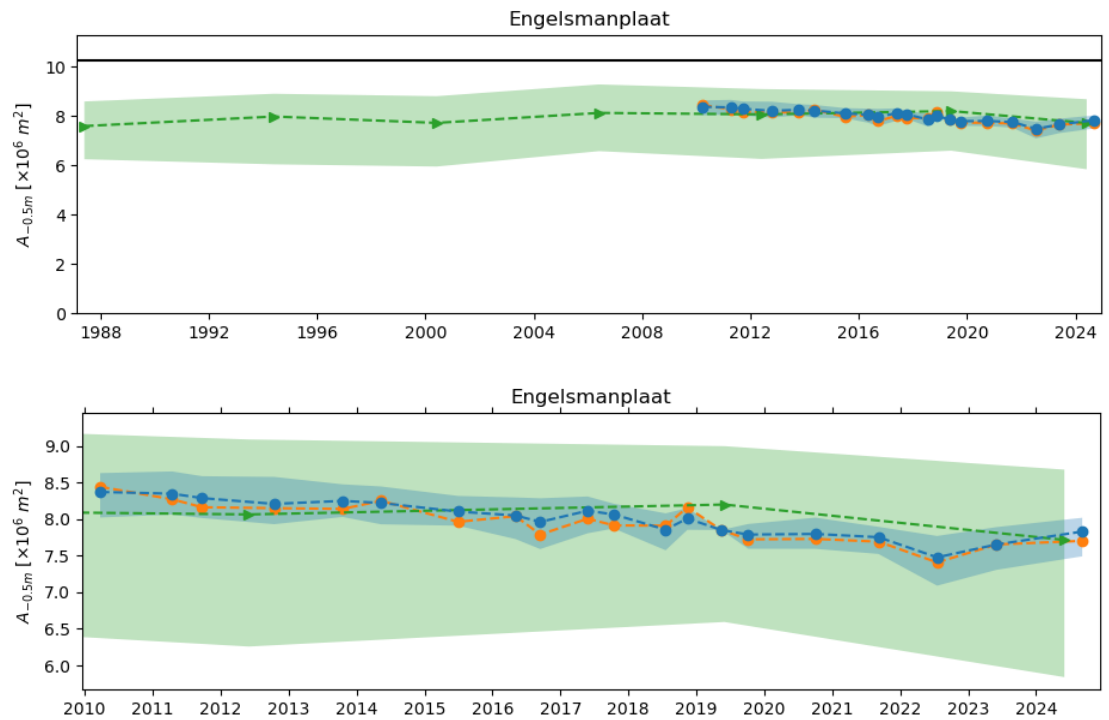
Op basis van de NAM data bleek de variabiliteit in de ontwikkeling van het plaatareaal boven NAP-0.5m in het Pinkegat groter te zijn dan in de Zoutkamperlaag. In de RWS dataset is dit verschil in variabiliteit ook te zien, zij het dan op een langere termijn. De Vaklodingen data voor het Pinkegat maken 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 uit de Vaklodingen liggen binnen de meetnauwkeurigheid, maar zijn mogelijk ook beïnvloed door natuurlijke morfodynamiek. Zo is het geulsysteem van het Pinkegat dynamisch en herhalen zich gedragspatronen (Figuur 3-11) (Elias & Oost, 2019). Zowel de LiDAR data als ook de Vaklodingen geven geen directe aanwijzingen op effecten van diepe bodemdaling op plaatareaal in het Friesche Zeegat.



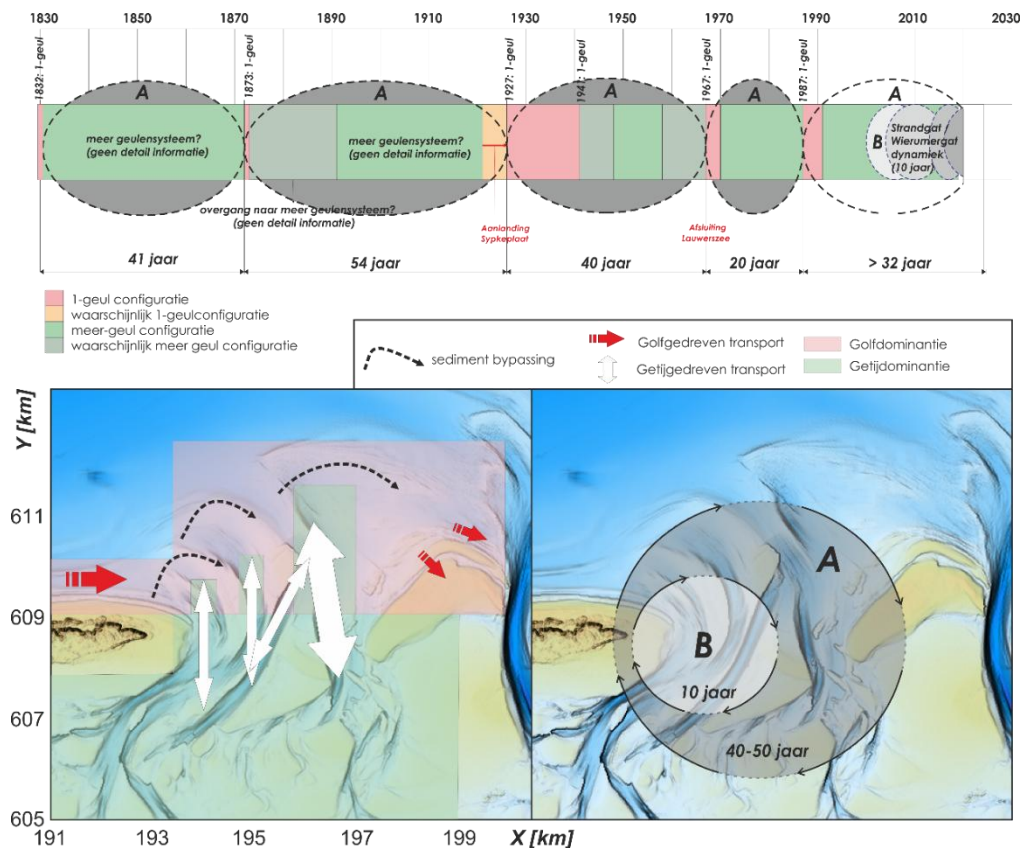
Figuur 3-8 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m voor het Pinkegat kombergingsgebied tussen Vaklodingen (groen $\dashrightarrow$), de originele NAM LiDAR data (oranje, $\dashrightarrow$), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, $\dashrightarrow$). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte 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 3-9 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 3-10 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m voor de Engelsmanplaat. Vaklodings (groen - $\triangle$ - -), de originele NAM LiDAR data (oranje, - $\circ$ - -), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, - $\circ$ - -). 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 Vaklodings. Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).



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

3.5 Conclusies areaalontwikkeling

Het gerapporteerde plaatareaal in de Zoutkamperlaag is constanter dan in het Pinkegat. Voor het Pinkegat laat de LiDAR meetreeks 2010-2024 over het algemeen 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, Appendix C.1), Pinkegat oost-2 (F, Figuur 3-4) en het westelijke deel van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5) waar een verbreding en uitbocht van de geul optreedt. Deze afname is klein ten opzichte van de 95% onzekerheidsmarge in de gecorrigeerde bodemhoogte. De recente LiDAR opnames van 2023 en 2024 laten een toename van plaatareaal zien van zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag. Volgens de LiDAR meting van 2024 is het plaatareaal in het Pinkegat zelfs weer zo groot als in het begin van de meetreeks in 2010. Of dit een tijdelijke fluctuatie is of een structurele trend, zal blijken naar mate de meetreeks langer is geworden. Wanneer de LiDAR metingen tussen 2010-2024 worden geplaatst in de context van lange termijn ontwikkelingen in de Vaklodingen tussen 1987-2024, dan zijn de geobserveerde plaatveranderingen in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag insignificant.

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

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.

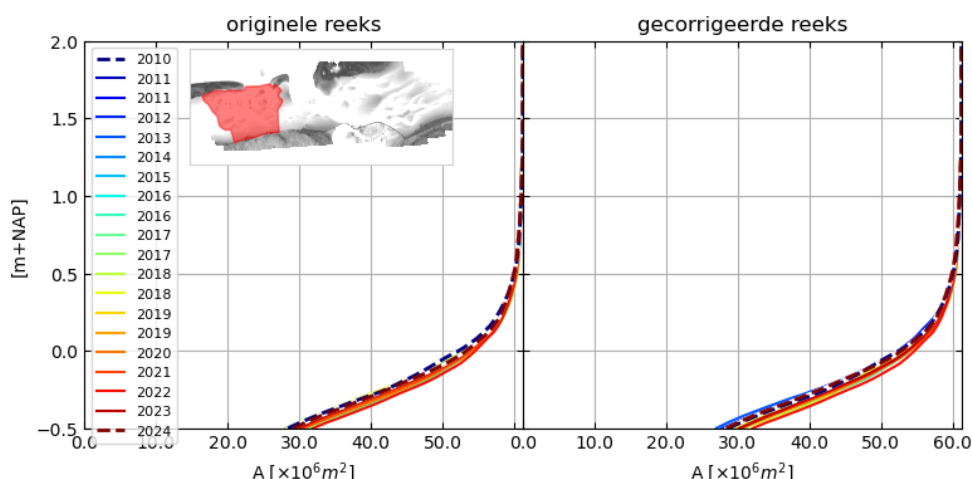
4 Analyse ontwikkeling plaathoogte

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 dwarsdoorsneden gepresenteerd om lokale veranderingen in kaart te brengen. Dezelfde kombergings- en deelgebieden als in Hoofdstuk 3 worden geanalyseerd, zie Figuur 3-1 voor de kombergingsgebieden en Figuur 3-3 voor de deelgebieden.

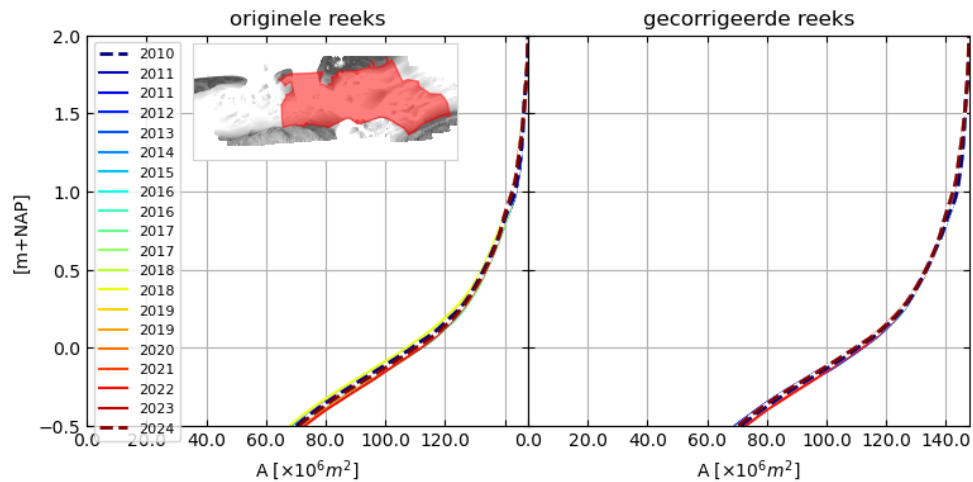
4.1 Hypsometrie kombergingsgebieden

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

Kijkend naar de ontwikkeling door de jaren heen, tonen de hypsometrische curven dat waar blauwe curven boven rode curven liggen, er een afname in hoogte heeft plaatsgevonden. Deze tussentijdse afname is binnen het Pinkegat en Zoutkamperlaag echter gering. De hypsometriën van 2010 en 2024 liggen nagenoeg exact op elkaar voor zowel Pinkegat als ook Zoutkamperlaag (zie gestippelde rode en blauwe lijnen in Figuur 4-1 rechts en Figuur 4-2 rechts).



Figuur 4-1 Hypsometrische curven voor het Pinkegat kombergingsgebied. Op de horizontale as is het wateroppervlak horende bij een hoogte op de verticale as 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) 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 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) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).

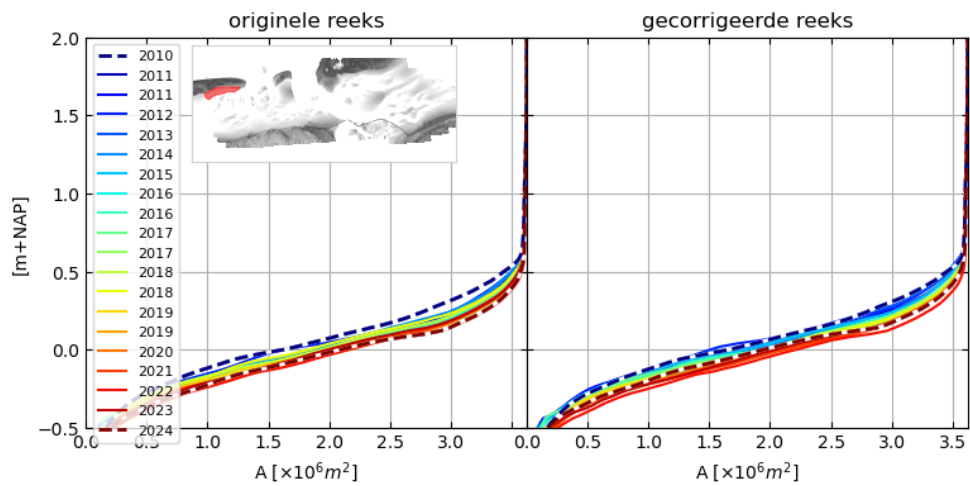
4.2 Hypsometrie individuele platen

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).

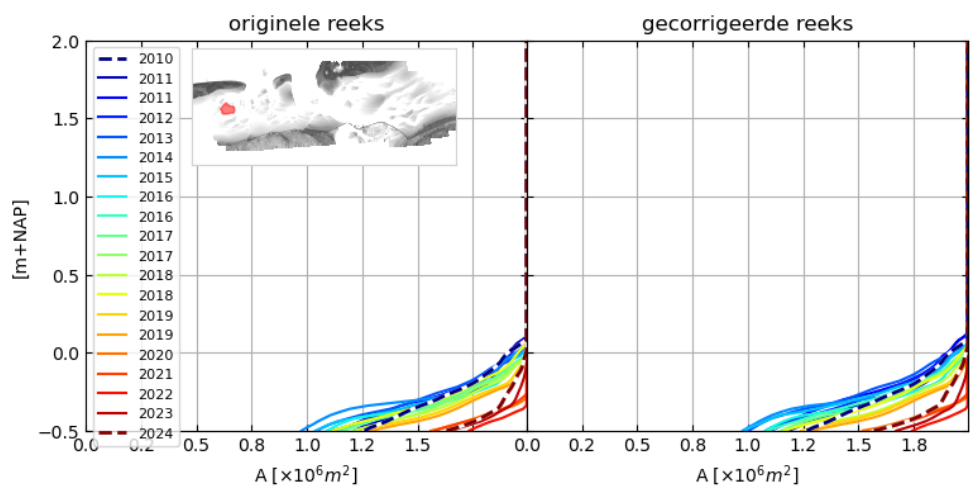
Uit de areaalontwikkeling van platen boven NAP-0,5m leidden we af dat de bodemdaling mogelijk invloed had op de areaalontwikkeling in het gebied ten zuiden van Ameland-oost (A). De hypsometrische curven laten zien dat bij iedere te kiezen referentiehoogte in gebied A het plaatareaal vrij monotoon afneemt.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

De drie meest westelijke platen, pal tegen het wantij gelegen (B, C, D), liggen voornamelijk onder NAP+0m en laten een 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) door een hoogte afname van orde 0.3 m is gehalveerd (contour NAP-0,5m; Figuur 4-3 B), is de centrale plaat (C) in de monitoringsperiode duidelijk gegroeid: een hoogtetoeename van orde 0.3 m 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 vlakkt als het ware af en de tweede plaat toont een versteiling.

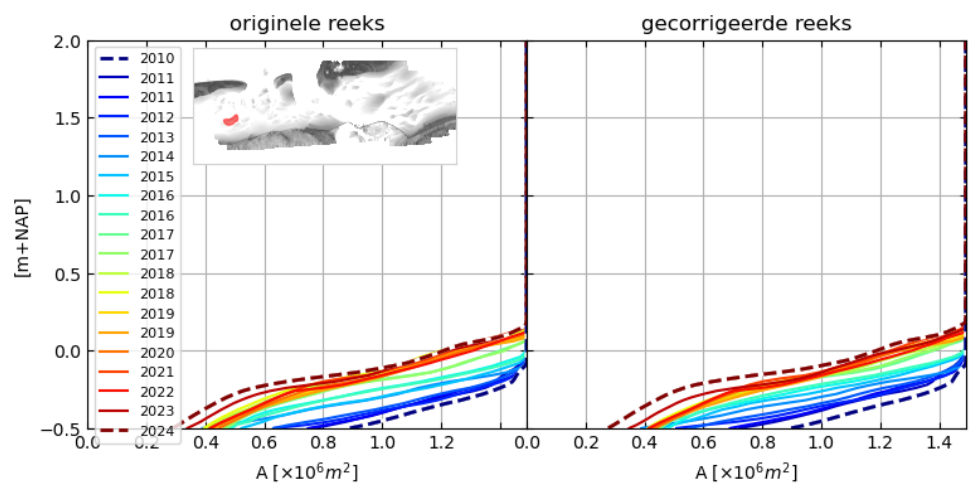
A: Ameland zuidoost



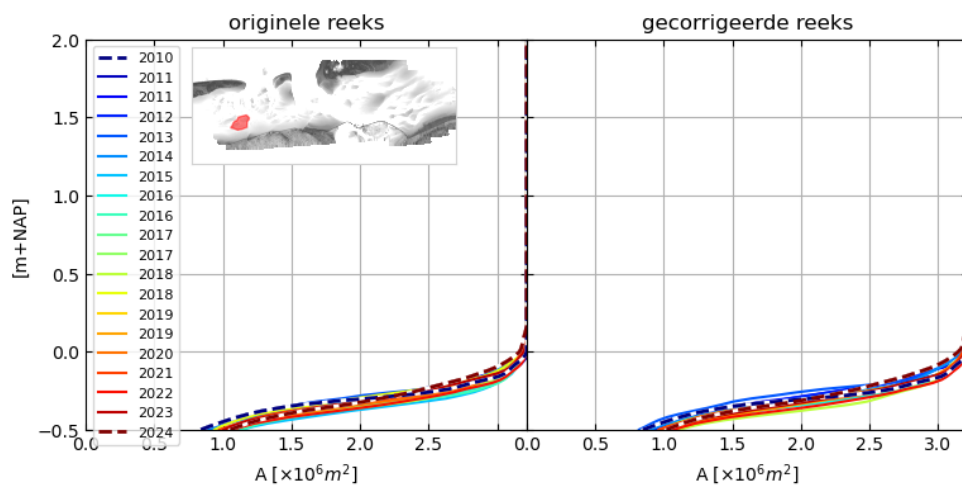
B: Pinkegat west-1



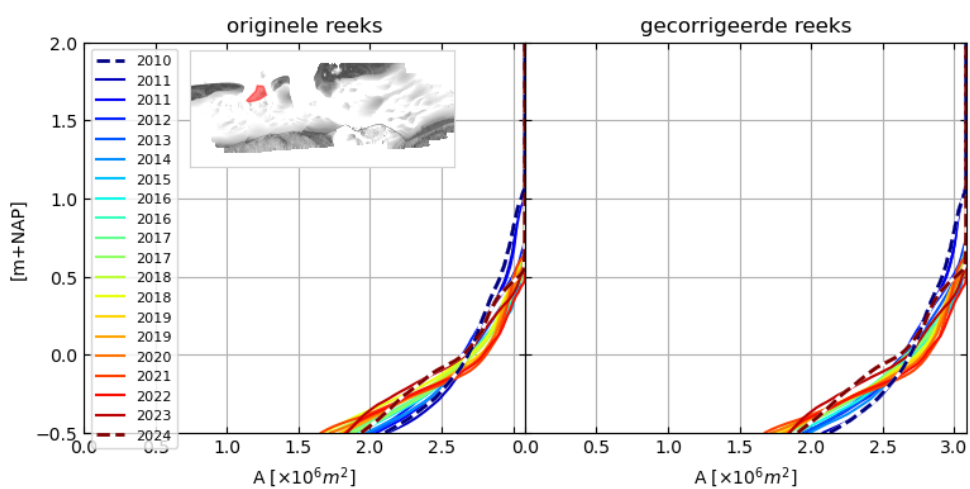
C: Pinkegat west-2



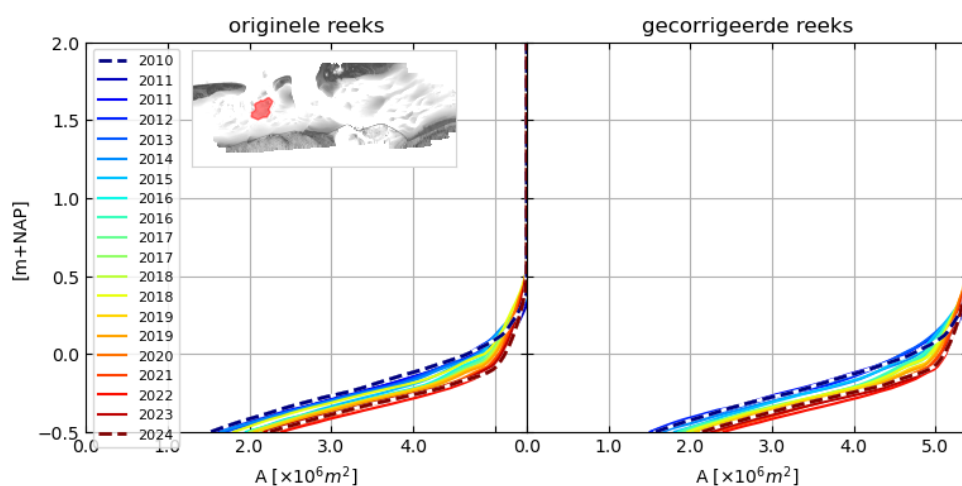
D: Pinkegat west-3



E: Pinkegat oost-1

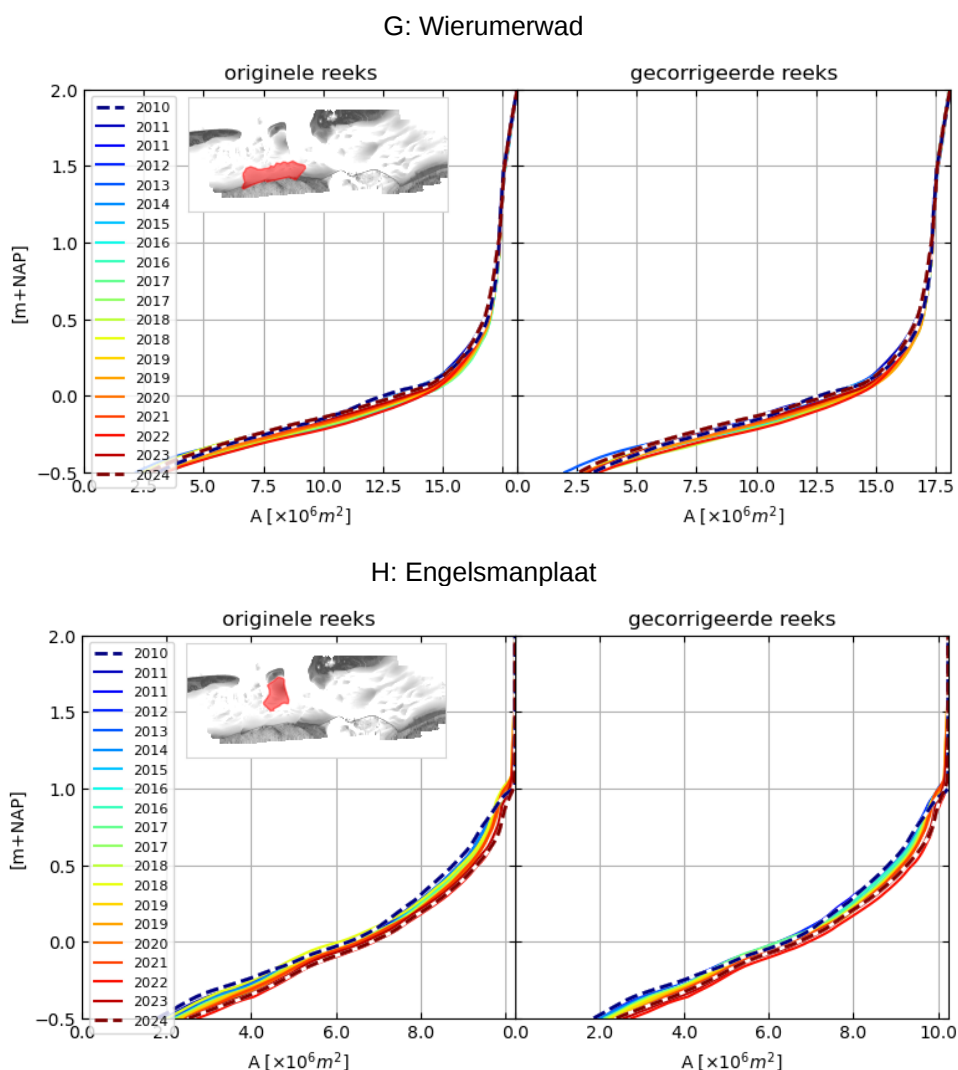


F: Pinkegat oost-2



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.

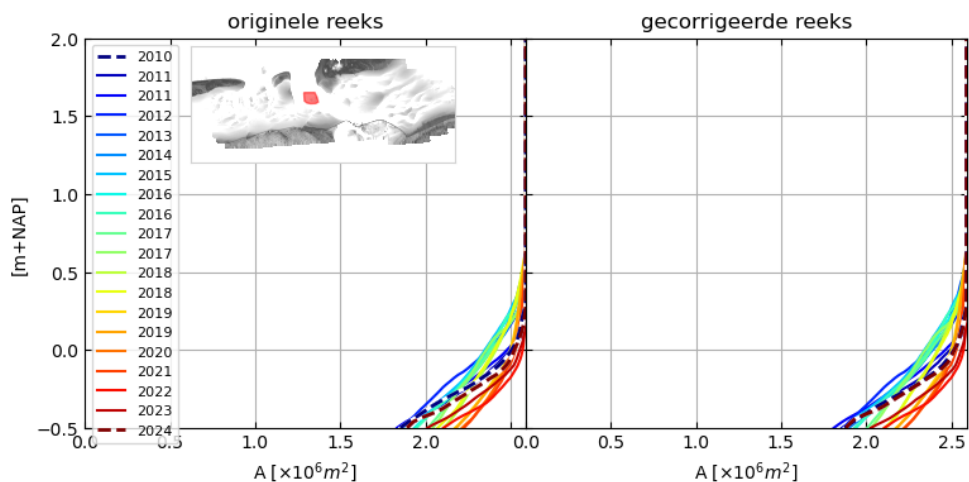


Figuur 4-4 Hypsometrische curves voor de platen tussen de Pinkegat en Zoutkamperlaag kombergingsgebieden. Op de horizontale as is het oppervlak horende bij een hoogte op de verticale as geplotted. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de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

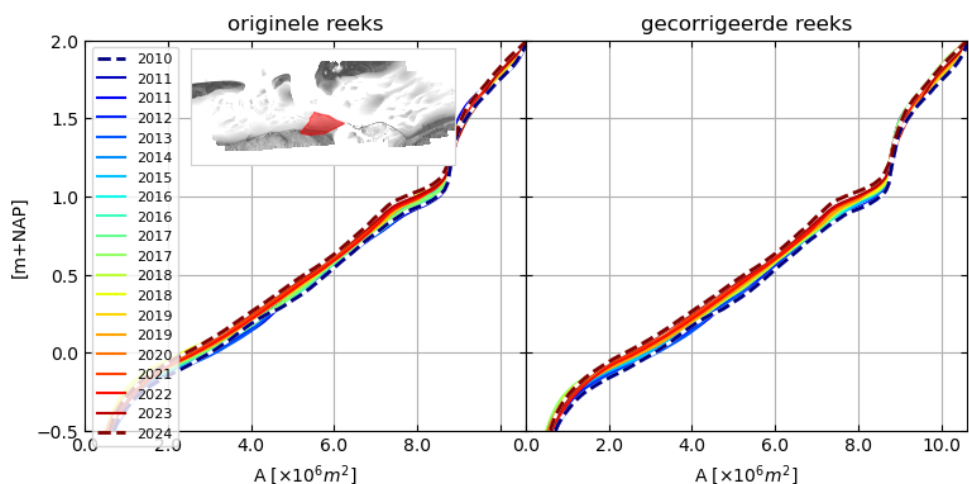
Als laatste beschouwen we hier ook de platen binnen het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (Figuur 4-5). Individuele platen binnen dit gebied vertonen wisselend gedrag. Bijvoorbeeld voor de Kuipersplaat (I) is het signaal van plaatveranderingen veel sterker dan die van het geaggregeerde kombergingsgebied. 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 -0.1m 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+1.2m. In tegenstelling hiermee, vertoont Schiermonnikoog zuid-1 (K) groei in hoogte boven NAP+1m en een afname in hoogte daaronder. Grote Siege Zuid (N) en Zoutkamperlaag zuidoost-1 (Q) zijn stabiel.

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

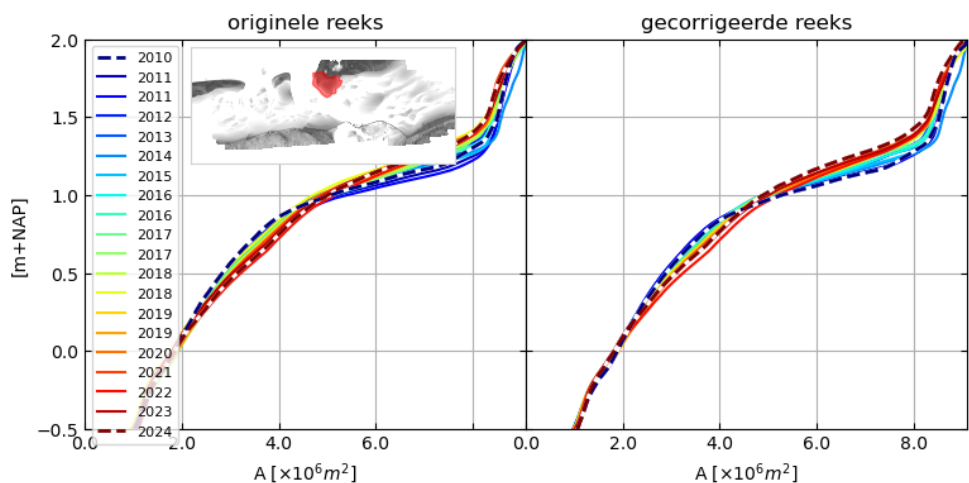
I: Kuipersplaat



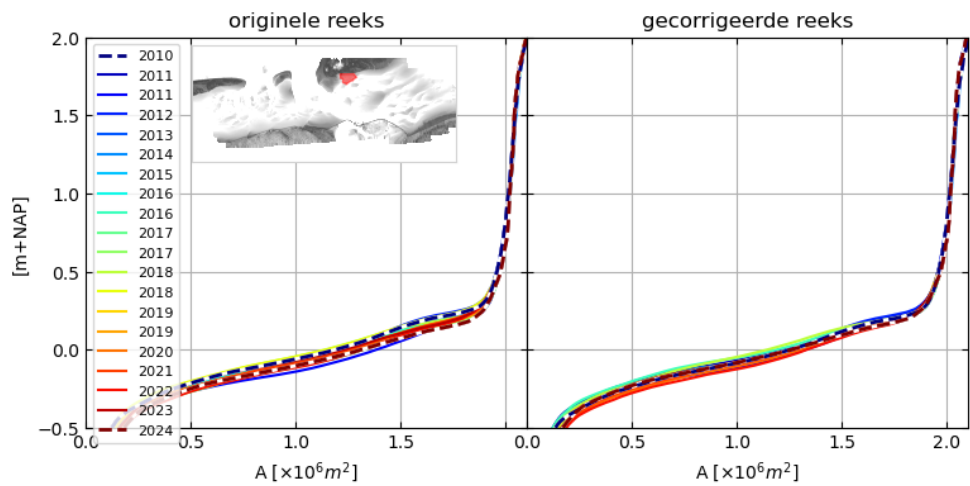
J: Eilanderbult



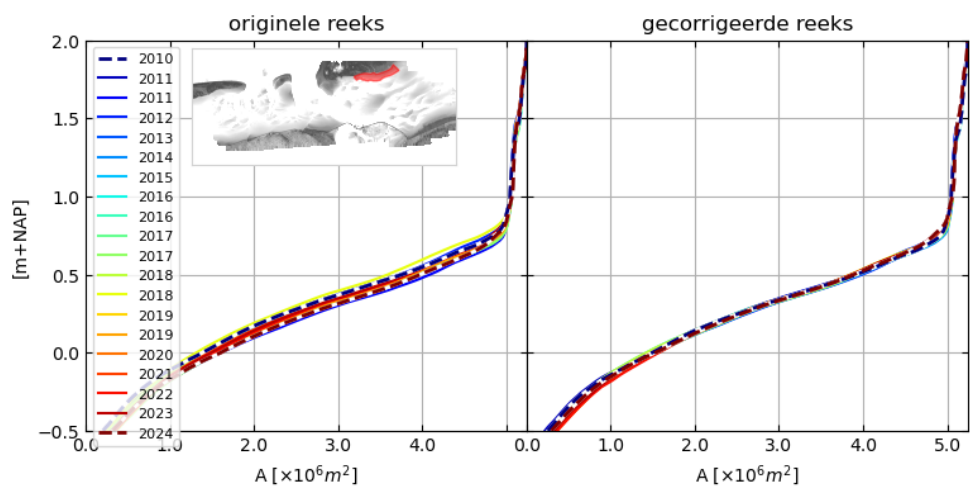
K: Schiermonnikoog zuid-1



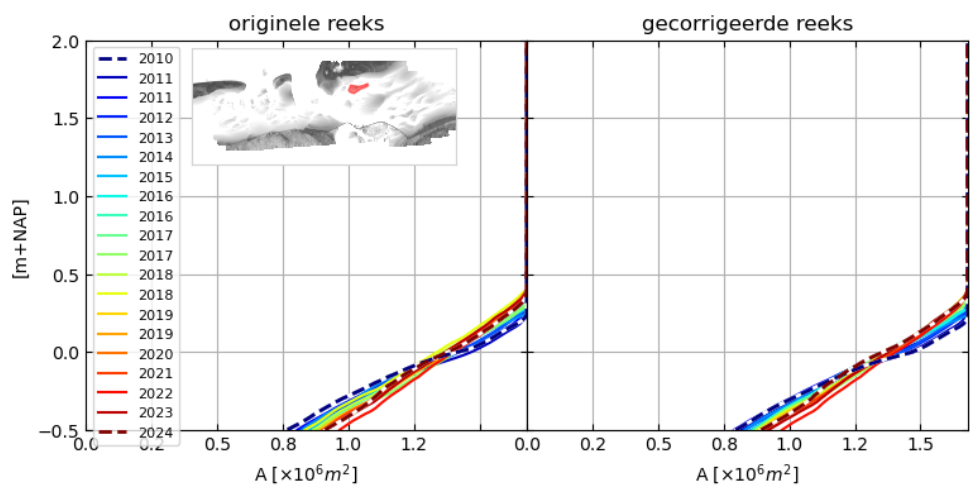
L: Schiermonnikoog zuid-2



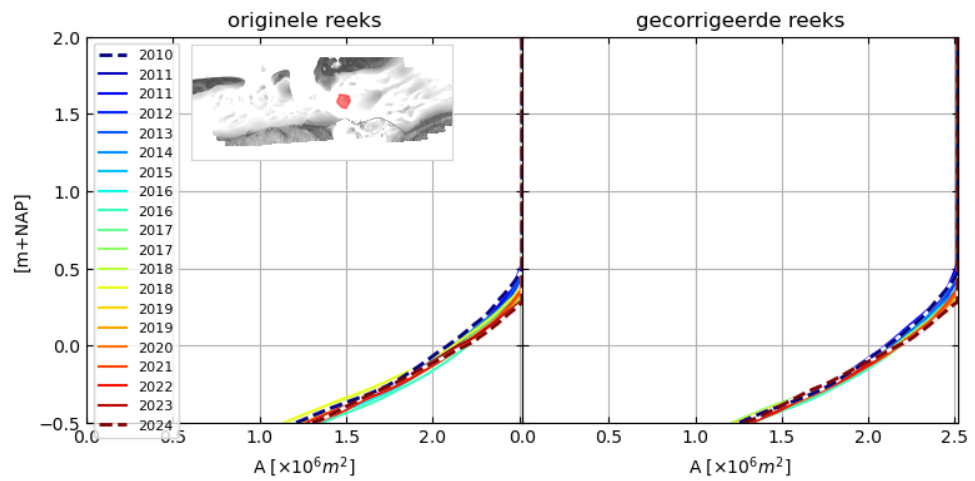
M: Schiermonnikoog zuid-3



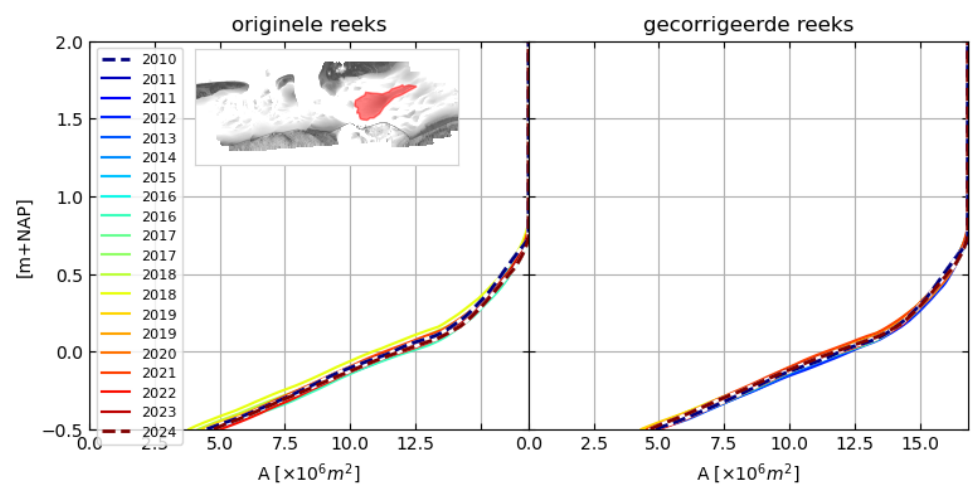
N: Grote Siege zuid



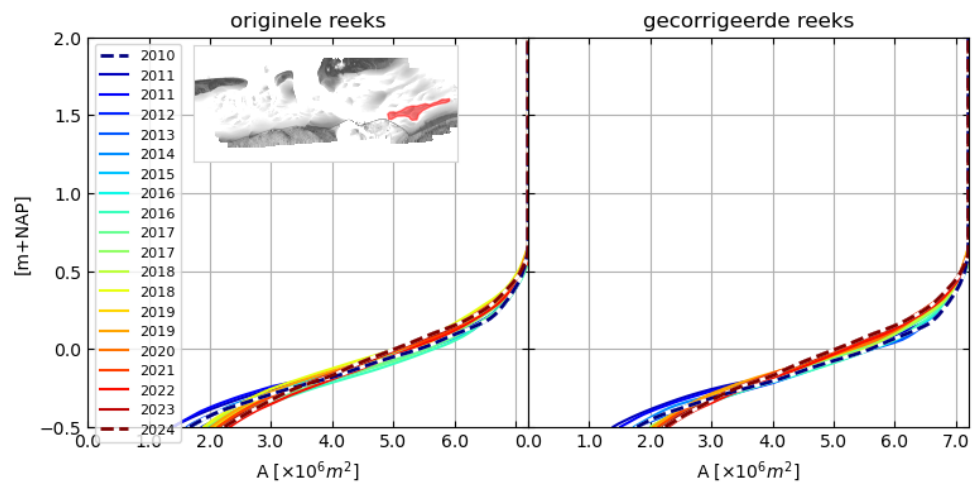
O: Roode Hoofd



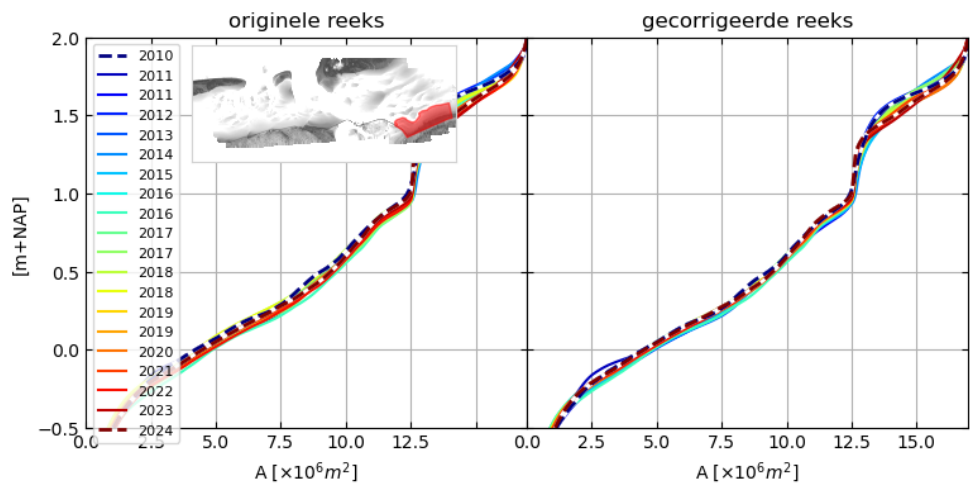
P: Brakzand



Q: Zoutkamperlaag zuidoost-1



R: Zoutkamperlaag zuidoost-2

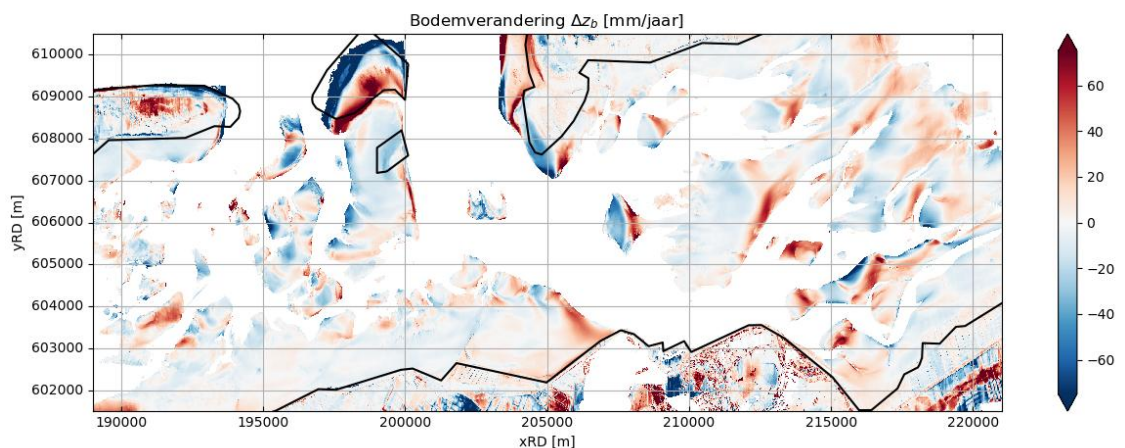


Figuur 4-5 Hypsometrische curven voor de platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij een hoogte op de verticale as. Het areaal aan wadplaten boven NAP-0,5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP-0,5.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

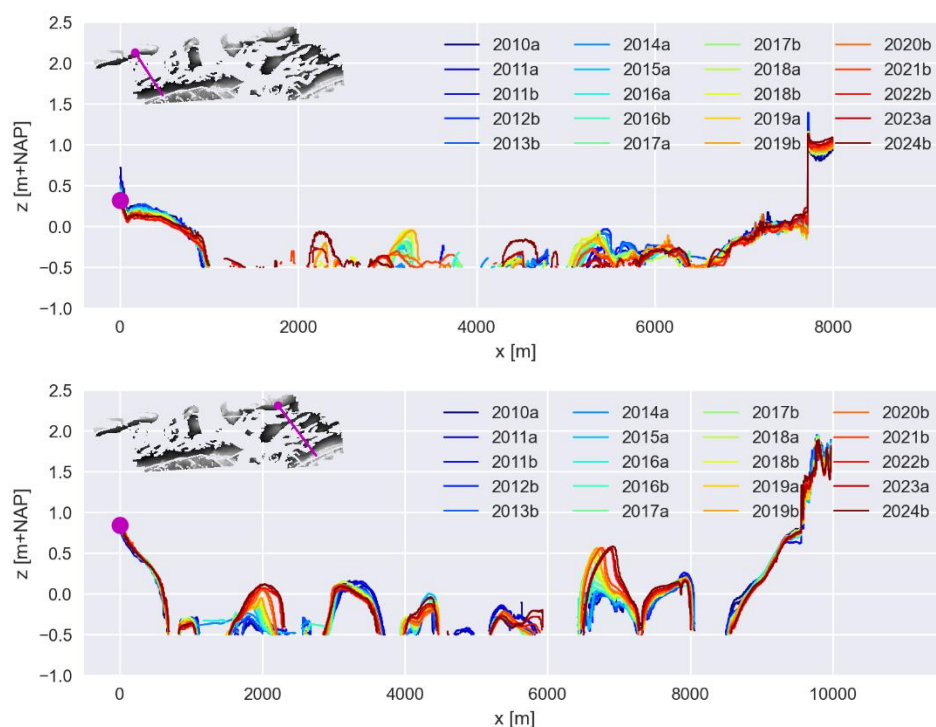
Migratiepatronen domineren het verkregen beeld. De grootste veranderingen zijn de aanlanding van het Rif op de Engelsmanplaat waardoor het Oude Smerig Gat (OSG) verzandt (zie Figuur 1-2 voor benamingen). Er vindt sterke erosie plaats aan de oostzijde van het Binnenplaatgat en het Roode Hoofd migreert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



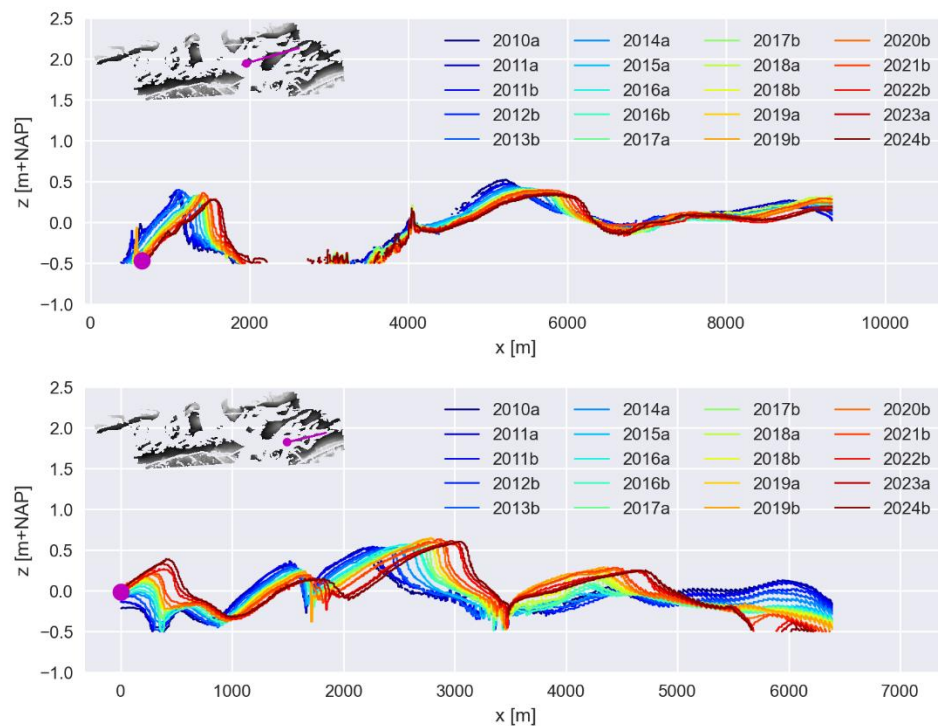
Figuur 4-6 De gemiddelde verandering in bodemhoogte (mm/jaar) zoals berekend per rooster cel op basis van de tijdserie 2010-2024 met voorgestelde correctie. Blauwe kleuren geven verlaging weer, rode kleuren sedimentatie. Cellen waar minder dan 8 waarnemingen aanwezig waren in de tijdreeks zijn uitgesloten van de berekening en blijven dus wit (geen data).

4.4 Profielen

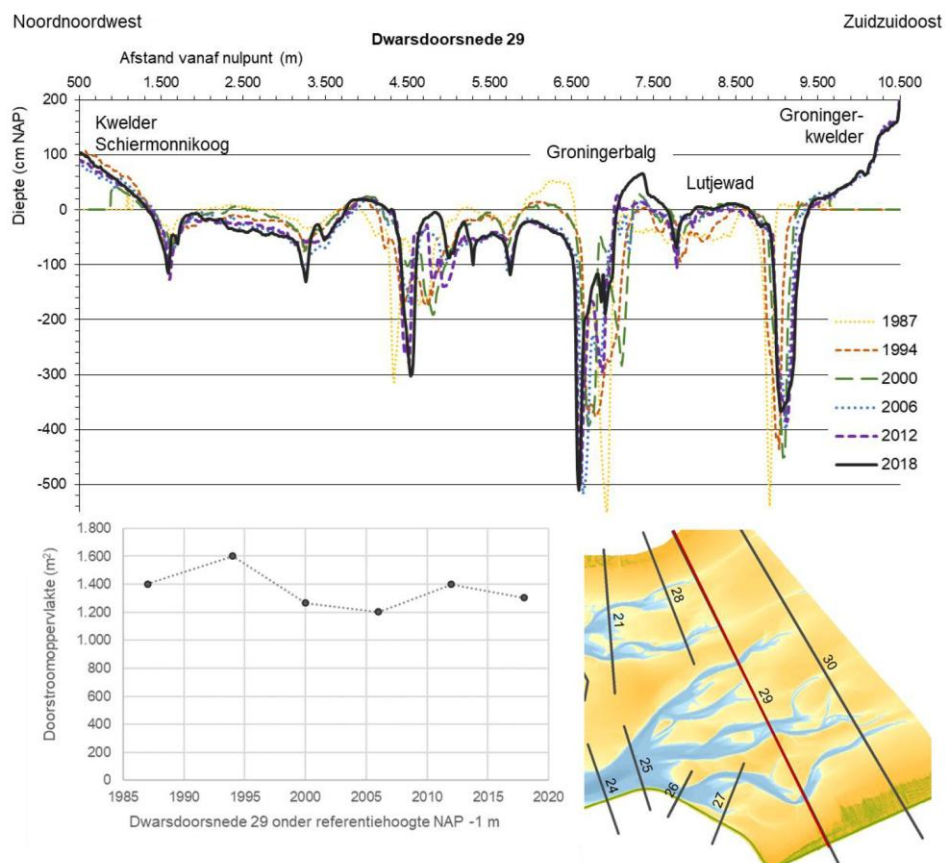
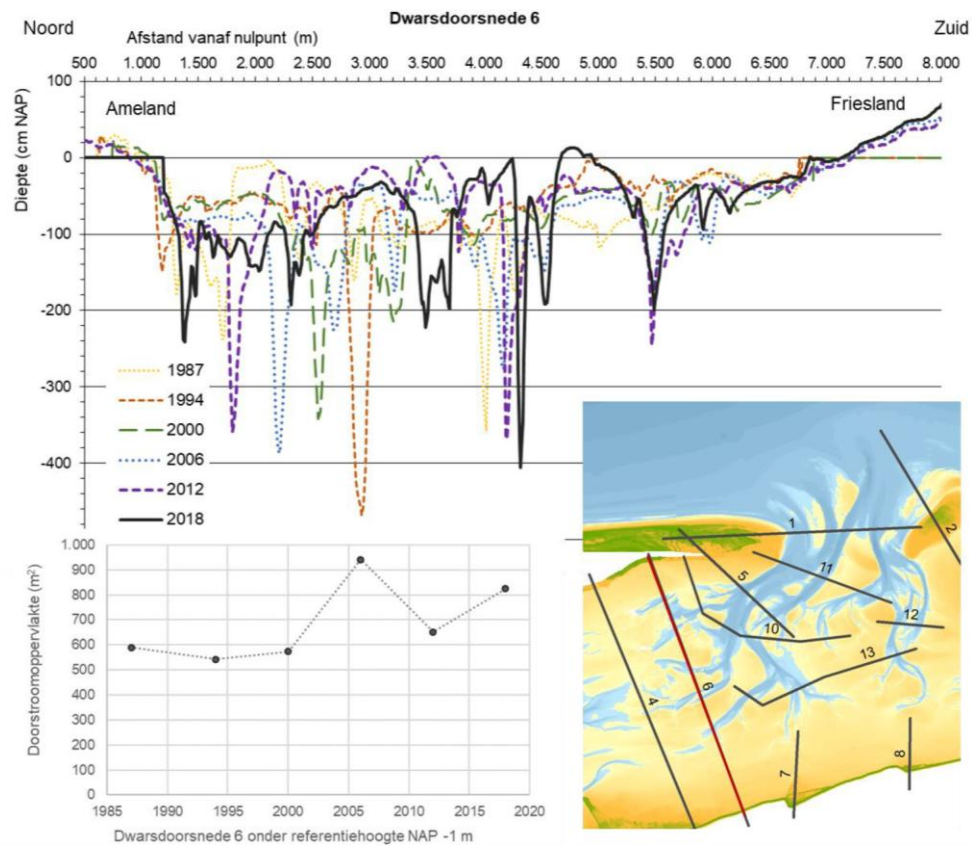
Aan de hand van een aantal profielen verifiëren we conclusies uit de geaggregeerde data. De platen in het westelijk deel van het kombergingsgebied Pinkegat liggen grotendeels lager dan de ondergrens van de LiDAR opnamen (NAP-0,5m, zie Figuur 4-7, bovenste paneel). In het kombergingsgebied Zoutkamperlaag 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 Zoutkamperlaaggebied zijn diep en relatief stabiel gedurende alle opnamen sinds 1987. De profielontwikkeling van twee platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied bevestigt duidelijk de oostwaartse migratie van de platen in dit gebied, zoals ook al geconstateerd werd op basis van de tijdsgemiddelde ontwikkeling (Figuur 4-8). De meting van 2022 toont zelfs versterkte oostwaartse verplaatsing (Figuur 4-8, onderste paneel) en ook daarna gaat de verplaatsing door.



Figuur 4-7 Profielontwikkeling ten oosten van het wantij van Ameland (boven) en ten westen van het wantij van Schiermonnikoog (onder) op basis van de gecorrigeerde LiDAR opnamen. De kleuren gaan van 2010a (blauw) naar 2024b (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 2024b (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 2010-2024 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). Deelgebied A vertoont ook een gelijkwaardige afname als vergelijkbare deelgebieden in de Zoutkamerplaag (L,M) die niet in de bodemdalingskom zitten. Het geeft aan dat de afname in A gerelateerd is aan natuurlijke morfodynamiek. De afname van de plaathoogte zou van noord naar zuid minder moeten worden als die een gevolg zou zijn van diepe bodemdaling. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen leidt tot veranderingen in plaathoogte die groter zijn dan de effecten van bodemdaling. Een eenduidig bodemdalingssignaal komt dus niet naar voren uit de LiDAR dataset.

Bij het vergelijken van de ontwikkeling van de hoogteverdeling van de platen, en hierbij ook dus de hypsometrische veranderingen, tussen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag moet ook rekening worden gehouden met de natuurlijke verschillen in morfologisch gedrag tussen de kombergingsgebieden. Zo is het geulsysteem van het Pinkegat veel dynamischer en herhalen gedragspatronen zich op een veel kortere tijdschaal (Elias & Oost, 2020). Hierdoor is het dus ook mogelijk dat de waargenomen lichte verlaging van de plaathoogtes onderdeel uitmaakt van dit periodieke gedrag. Bij een overgang van een meergeulen naar een 1-geul systeem in het Pinkegat kan de dynamiek tijdelijk veel groter zijn. Op basis van geobserveerde cycli zou zo'n overgang binnen 10 jaar kunnen plaatsvinden. Afhankelijk van de locatie van een plaat kan deze dynamiek een verhoging of verlaging in plaathoogte initiëren.

5 Invloed hydrodynamische en meteorologische condities

Uit Van der Lugt et al. (2020a) is gebleken dat correcties op de LiDAR data van grote invloed zijn op de conclusies uit de analyse van verklarende factoren. In Van der Vegt en Van der Lugt (2021,2022) werd de correctiemethode verder verbeterd, waardoor de verbanden tussen verklarende factoren en areaalverandering zijn aangepast. In Gawehn (2023) is de bepaling en analyse van windrichtingen gedaan op basis van vectoren waardoor duidelijke verbanden naar voren kwamen voor de stormachtigheid tussen opeenvolgende LiDAR metingen en de (gelijktijdige) veranderingen in plaatareaal van zowel het Pinkegat als ook de Zoutkamperlaag. Daarnaast is in Gawehn (2023,2024) 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. Omdat de golfdata pas sinds 2019 worden ingewonnen zijn machine-learning modellen opgezet om aan de hand van externe informatie de golftijdsreeksen terug tot het jaar 2014 te verlengen. Op basis van deze tijdsreeksen is in Gawehn (2024) een negatieve correlatie gevonden tussen veranderingen in plaatareaal van het Pinkegat en golfhoogtes (afname van plaatareaal bij hoge golven en vice versa), al was deze correlatie op de rand van significantie.

In 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 20 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 20 datapunten ligt de significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt op 0,44. Dat betekent dat voor deze dataset er minder dan 5% kans bestaat dat het geconstateerde verband willekeurig is wanneer de correlatiecoëfficiënt boven 0,44 (of onder -0,44) 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 14 punten en gaat gepaard met een significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt van 0,53.

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 gebruikt een reeks indicatoren 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 windmagnitute 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. De gezamenlijke indicator data (1 t/m 3) zijn beschikbaar vanaf eind 2014 om met terugwerkende kracht de golfgegevens bij Nes tot en met eind 2014 te voorspellen (d.w.z. een *hindcast* te maken).

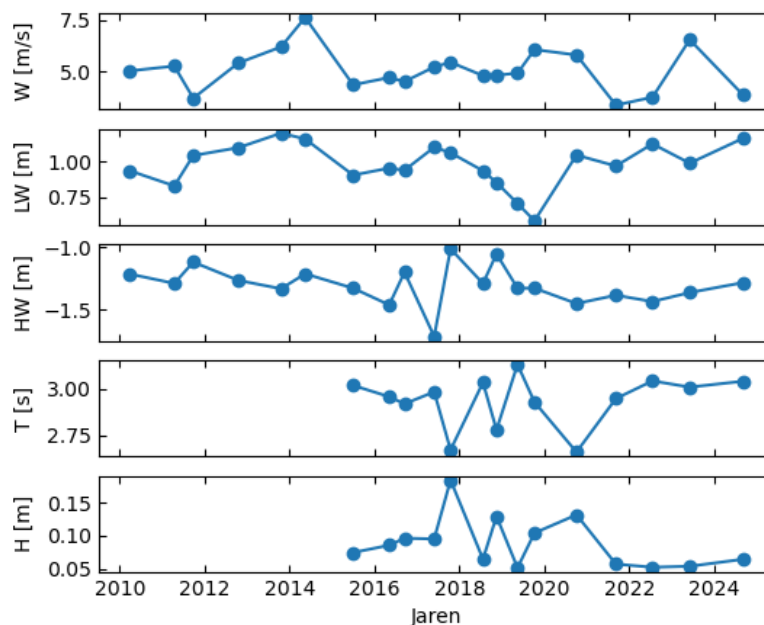
De voorspellingen van de getrainde RF modellen zijn relatief nauwkeurig (zie Appendix D; Figuren D-2, D-3, D-4). Uit de validatie van de RF modellen blijkt dat voor de golfhoogte voorspelling een gemiddelde fout van 7 cm wordt gemaakt en voor de voorspelling van golfperiode een gemiddelde fout van 0.3 seconden wordt gemaakt.

5.2 Invloed condities tijdens inwinning

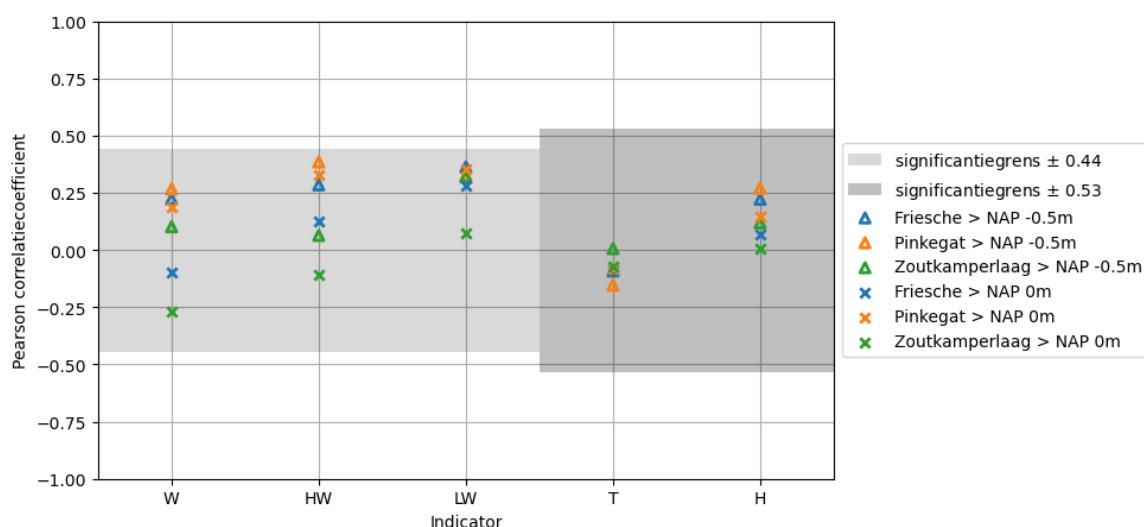
Voor vijf fysische indicatoren is onderzocht of er een correlatie bestaat tussen hun waarde tijdens de inwinning en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. Indicator W voor windsnelheid is berekend uit de tijdreeksen van potentiële wind (gemeten windsnelheid omgerekend naar de windsnelheid bij een standaard 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 2014-2024. De berekende tijdsreeksen voor de indicatoren tijdens LiDAR inwinning zijn geplot in Figuur 5-1. (Van der Lugt et al., 2020a)

Tabel 5.1 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van het gemeten areaal.

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



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



Figuur 5-2 Pearson correlatiecoëfficiënten voor het verband tussen gemeten arealen en hydrologische en meteorologische indicatoren tijdens het inwinnen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,44 voor windgegevens en waterstanden, en een significantiegrens van 0,53 voor golfgegevens.

In Figuur 5-2 zijn de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten weergegeven tussen de verschillende indicatoren en zowel het areaal boven NAP-0,5m en het areaal boven NAP+0m. Hierin is geen enkele significante correlatie te zien.

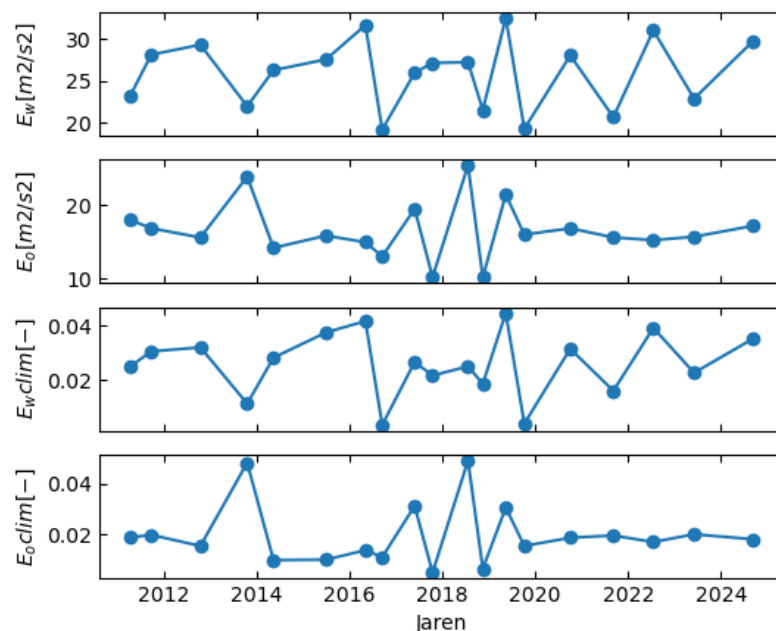
5.3 Invloed stormachtigheid tussen opnamen

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 5-3). Deze variatie kan mogelijk ook aanleiding geven tot periodieke verschillen in plaatareaal.

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

Parameter	Definitie
E_w	Gemiddelde van het kwadraat van de west→oost component van de windsnelheid in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [m^2/s^2]
E_o	Gemiddelde van het kwadraat van de oost→west component van de windsnelheid in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [m^2/s^2]
E_{wclim}	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op windklimaat 2010-2024 [-] 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 2010-2024 [-] voor oost→west component

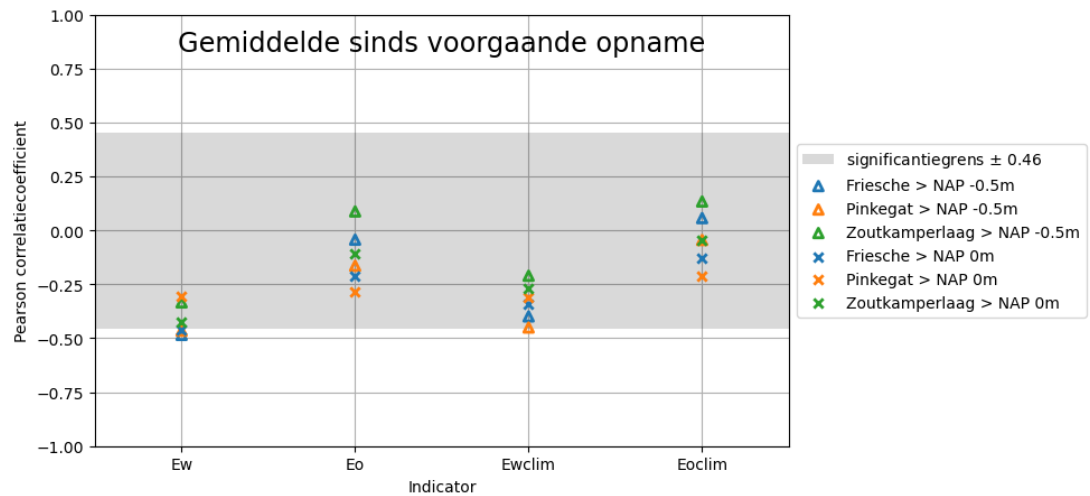


Figuur 5-3 Tijdreeksen van windindicatoren tussen twee opeenvolgende metingen.

Voor het gehele Friesche Zeegat en ook specifiek het Pinkegat bestaat er een significante correlatie tussen westelijke wind in de afgelopen periode en de nieuwe LiDAR meting (Figuur 5-4). De correlaties voor de Zoutkamperlaag liggen net op de rand van significantie of eronder. Met de nieuwe meting van 2024 zijn de correlaties afgezwakt ten opzichte van Gawehn (2024), maar de correlaties zijn nog steeds significant. Correlaties kunnen (tijdelijk) afzakken als een nieuw meting het algemene correlatiepatroon niet over minder sterk volgt. De gevonden correlaties zijn negatief, wat betekent dat het plaatareaal krimpt als de windkracht uit westelijke richting bovengemiddeld sterk is (Figuur 5-4, E_w) of er bovengemiddeld veel krachtige stormen voor zijn gekomen (Figuur 5-4, E_{wclim}). De negatieve correlaties zijn gevonden voor het gehele kombergingsgebied wat ook wordt verwacht: westelijke wind drijft de waterstand op waardoor golven een groter (verdronken) plaatareaal kunnen bereiken en eroderen. Een goed voorbeeld daarvan is het jaar 2022 waarin het stormachtig was vanuit de westelijke windcomponent (Figuur 5-3) en het plaatareaal afnam (Figuur 3-2). Daar komt bij, dat de golven bij harde wind ook vaak groter zijn en dus nog effectiever sediment kunnen afslaan. Correlaties voor het Pinkegat 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 5-4, E_o en E_{oclim})



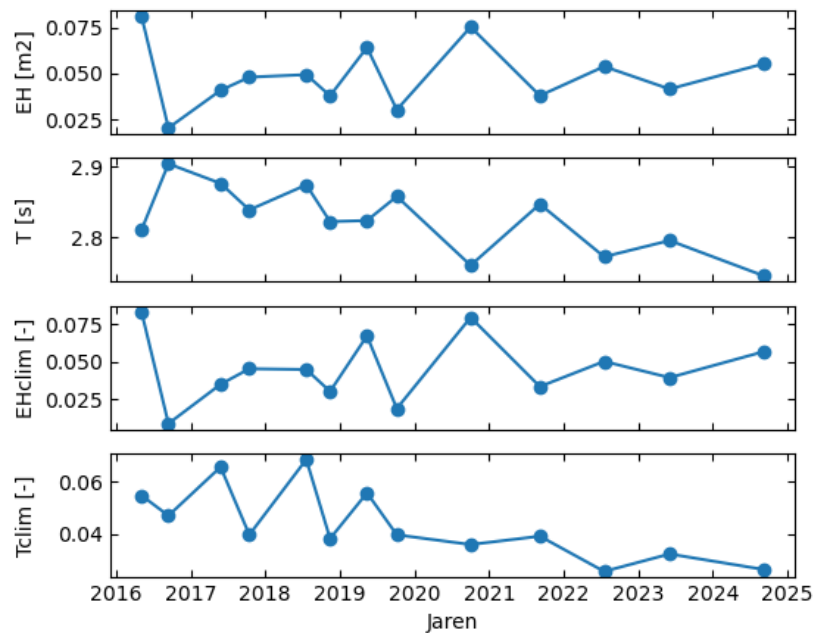
Figuur 5-4 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal boven referentiehoogten NAP-0,5m, NAP+0m en windcondities tussen opnamen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,46.

5.4 Invloed golfklimaat tussen opnamen

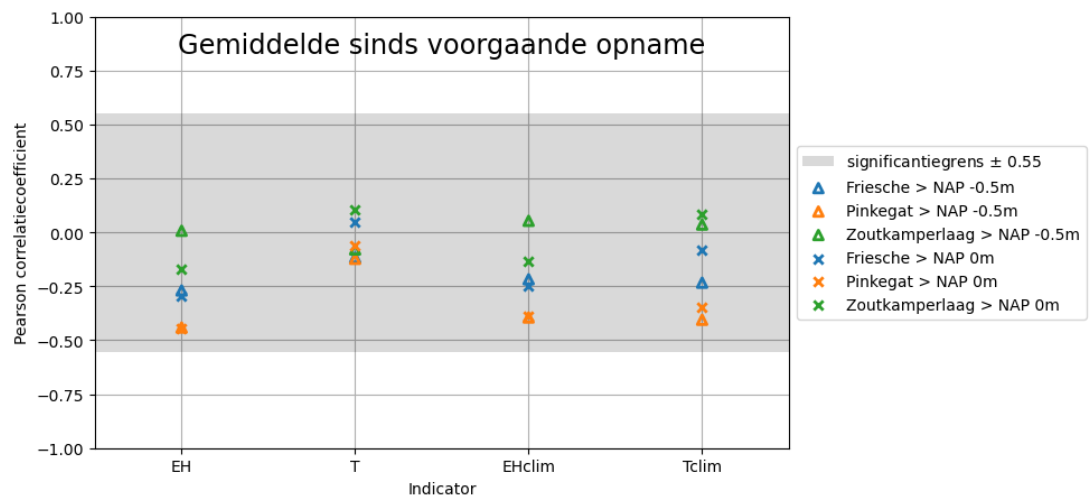
Naast de windindicatoren is ook voor vier golfindicatoren (zie Tabel 5.3 voor de gehanteerde definities) onderzocht of er een correlatie bestaat van hun waarden tussen de opnamen en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. De indicatoren E_H , T , E_{Hclim} en T_{clim} zijn bepaald uit de golfmetingen bij het station Nes aangevuld met Random Forest *hindcasts* (zie paragraaf 5.1). Het meetstation bij Nes zit vrij beschut onder Ameland waardoor de tijdreeksen voor deze indicatoren vooral lokaal opgewekte windgolven van beperkte grootte laten zien. Uit het kwadraat van de golfhoogte E_H blijkt dat deze kan variëren voor opeenvolgende LiDAR metingen (Figuur 5-5). In Gawehn (2024) zijn negatieve correlaties gevonden met het plaatareaal, deze waren op de grens van significantie, maar duiden aan dat de wadplaten van het Pinkegat eroderen als de golven hoog zijn. Met toevoeging van de nieuwe LiDAR meting van 2024 trekt de correlatie weer (tijdelijk) onder de grens van significantie. De verwachting is dat naar mate er meer LiDAR metingen en golfhoogte metingen beschikbaar worden de negatieve correlaties duidelijk uitkristalliseren.

Tabel 5.3 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van areaalveranderingen op basis van golfintensiteit tussen twee metingen.

Parameter	Definitie
E_H	Gemiddelde van het kwadraat van de golfhoogte in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [m^2]
T	Gemiddelde golfperiode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes [s]
E_{Hclim}	ratio van de tijd dat de referentie golfhoogte voor 95% kwantiel is overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op het golfklimaat eind 2014-2024 [-]
T_{clim}	ratio van de tijd dat de referentie golfperiode voor 95% kwantiel is overschreden in de periode tussen twee opeenvolgende LiDAR meetcampagnes, gebaseerd op golfklimaat eind 2014-2024 [-]



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



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

5.5 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. Voorbeeld daarvan is het jaar 2022 waarin het stormachtig was vanuit de westelijke windcomponent en het plaatareaal afnam. Westelijke wind drijft de waterstand op waardoor golven een groter plaatareaal kunnen bereiken en eroderen. De wadplaten van het Pinkegat liggen iets lager, waardoor dit effect relatief sterker is dan bij de Zoutkamperlaag. Golfcondities spelen een belangrijke rol in de erosie van wadplaten.

Door de golfmetingen aan te vullen met *hindcasts* kunnen de grenzen van significantie worden verlaagd. Met de meting van 2024 fluctueren de correlaties (tijdelijk) onder de grens van significantie, maar naar mate er meer metingen beschikbaar komen, worden structurele negatieve correlaties met de golfhoogte verwacht.

6 Ontwikkeling droogvaltijd

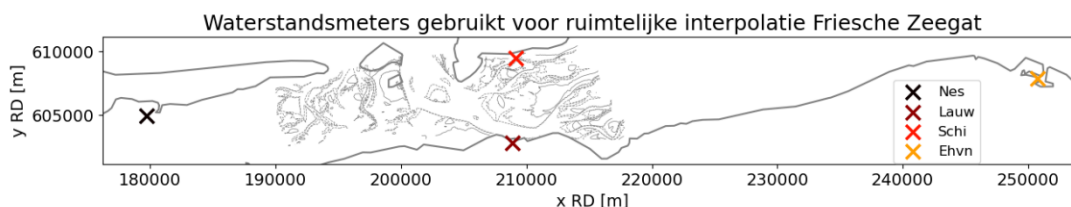
De rapportage over draagkracht voor vogels van het monitoringsjaar 2023 (Sovon, 2024) stelde vast, dat in het Pinkegat de droogvaltijd over de periode 2008-2023 is afgenomen met 7%. Vanwege het belang van de droogvaltijd voor het foerageren van vogels is in de huidige rapportage de ontwikkeling van de droogvaltijd in het Friesche Zeegat nader onderzocht. De centrale vraag is daarbij in hoeverre de ontwikkeling in bodemligging, de gemeten waterstanden dan wel de combinatie van deze twee aspecten van invloed is op de droogvaltijd in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag.

Droogvaltijden zijn berekend op basis van data voor bodemligging in combinatie met waterstandsgegevens. Voor de bodemligging zijn zowel Vaklodingen data als ook de LiDAR data onafhankelijk van elkaar gebruikt. Voor de waterstandsgegevens zijn puntmetingen van vier meetstations Nes, Schiermonnikoog, Lauwersoog en Eemshaven ruimtelijk geïnterpoleerd, waarbij rekening is gehouden met de getijfase.

6.1 Waterstandsmetingen

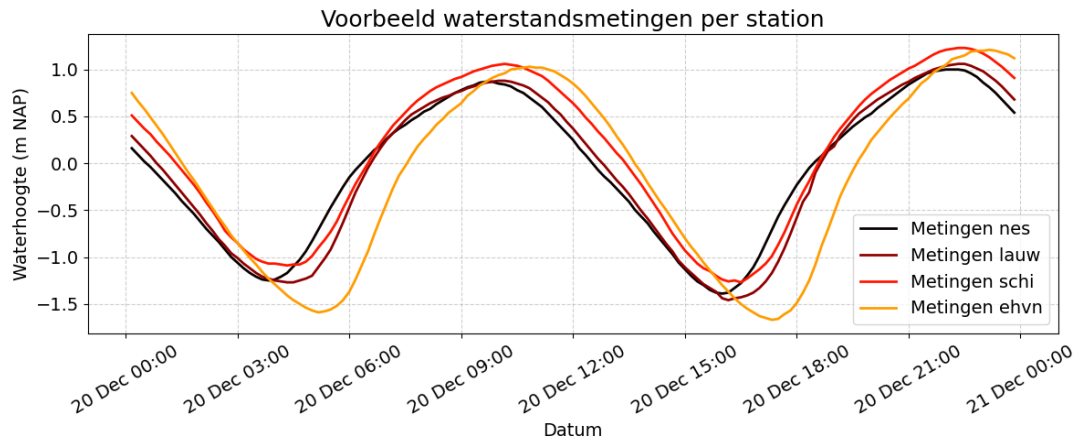
Voor een ruimtelijk beeld van waterstanden zijn vier stations rondom het Friesche Zeegat gekozen bij Nes, Lauwersoog, Schiermonnikoog en Eemshaven (Figuur 6-1). Het station Holwerd is niet meegenomen gezien er lange periodes zijn waarin er geen metingen zijn en het station inmiddels is verzand. De gekozen vier stations zijn actief en bieden gezamenlijk waterstandsmetingen elke 10 min vanaf 1989 tot op heden. In ruwe vorm bevatten de waterstandsdata vóór 01-01-2005 een ander NAP niveau dan daarna. Om een consistent NAP niveau te handhaven zijn de waterstanden van voor 01-01-2005 daarom gecorrigeerd volgens de toenmalige NAP aanpassing (Nes: -1.11 cm, Lauwersoog: -1.25 cm, Schiermonnikoog: -0.97 cm, Eemshaven: -1.00 cm; zie Dillingh, 2013).

De ruwe waterstandsmetingen bevatten gedeeltelijk correcties voor zakking van de stations. Vanaf 2010 zijn de stations in ieder geval niet gecorrigeerd voor lokale bodembeweging. Voor de stations Schiermonnikoog, en Lauwersoog betekent dit dat correcties voor de periode vanaf 2010 in de orde van 1-1.5 cm niet zijn uitgevoerd. Voor het gebruikte station bij Eemshaven is niet duidelijk of er correcties zijn toegepast. Bij een naburig station ontbreekt een correctie van 4cm, maar het is niet duidelijk of dit ook het geval is voor het gebruikte station. De officiële correctieprocedures worden gedaan door de beheerder (Rijkswaterstaat). Ontbrekende correcties zijn niet handmatig doorgevoerd in deze rapportage. Het niet doorvoeren van correcties van de getijdenstations voor lokale bodemdaling, betekent dat de waterstanden lijken te stijgen, terwijl dit in werkelijkheid niet zo is.



Figuur 6-1 De vier meetstations (x) gekozen voor ruimtelijke interpolatie. Kleuren definiëren de stations Nes, Lauwersoog, Schiermonnikoog en Eemshaven volgens legenda.

De getijgolf loopt langs de Noordzeekust van west naar oost. Deze golfbeweging weerspiegelt zich in de metingen van de stations en loopt via Nes naar Lauwersoog, Schiermonnikoog en vervolgens Eemshaven (Figuur 6-2).



Figuur 6-2 Voorbeeld van voortplanting getijgolf langs de vier meetstations Nes, Lauwersoog, Schiermonnikoog en Eemshaven (kleuren volgens legenda).

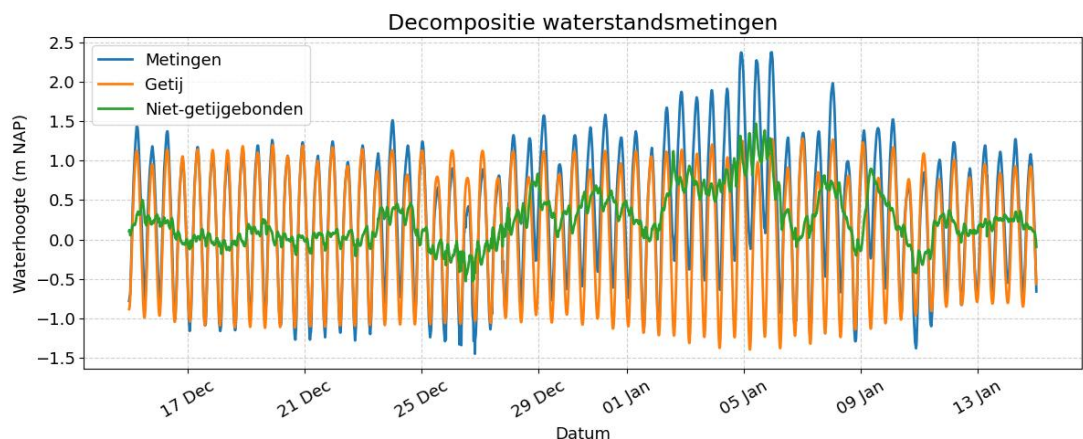
6.2 Decompositie en interpolatie van waterstandsmetingen

Om waterstandsgegevens van de vier individuele stations ruimtelijk te kunnen interpoleren, is eerst per station een decompositie gedaan van de tijdserie van waterstanden (η , Vergelijking 1) in een periodiek deel (het astronomische getij signaal) (ζ , Vergelijking 1) en een residueel, niet-getij gedreven deel (r , Vergelijking 1), beide delen variëren door de tijd, t (zie ook Figuur 6-3).

$$\eta(t) = \zeta(t) + r(t)$$

Vergelijking 1

De waterstanden worden, m.u.v. stormcondities, voornamelijk bepaald door het astronomische getij. Het astronomische signaal kan worden beschreven door de som van de verschillende componenten die een functie zijn van amplitude, frequentie en fase. Doordat het getij propageert en de getijgolf vervormt door de lokale bodem treedt niet op elke locatie gelijktijdig dezelfde waterstand op. De amplitude, frequentie, maar ook fase verschillen per waterstandsstation. Voor een correcte ruimtelijke interpolatie is het belangrijk dat er gecorrigeerd wordt voor de faseverschillen tussen de stations (Figuur 6-2). Een fase correctie hoeft niet gemaakt te worden voor het residuele, niet-getijgebonden signaal, dat meteorologische effecten bevat zoals windopzet en de verandering van het gemiddeld zeeniveau.



Figuur 6-3 Voorbeeld van getijdecompositie op waterstandsmetingen bij Schiermonnikoog. Gemeten signaal (blauw), getij (oranje) en niet-getijgebonden residu (groen).

Het getijde signaal bestaat uit een reeks harmonische componenten die onder andere worden bepaald door de stand van de maan en de zon (bijvoorbeeld de dubbel-daagse

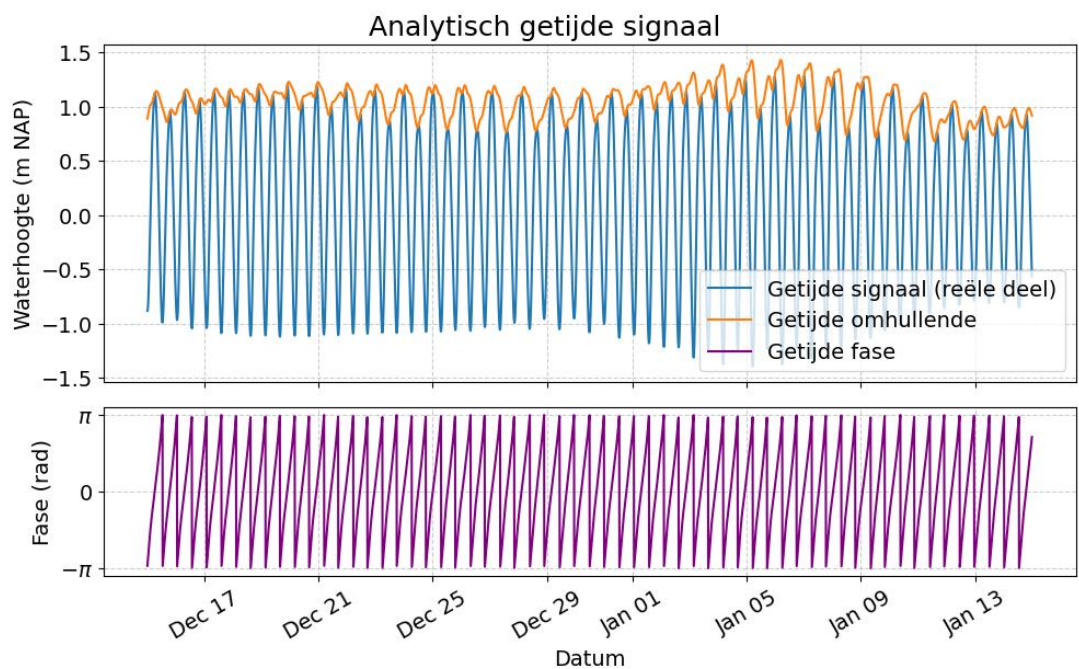
getijcomponenten M2 en S2). De harmonische componenten zijn een functie van de tijd, t , hebben eigen amplituden ($A(t)$, Vergelijking 2) en fasen ($\phi(t)$, Vergelijking 2) en beschrijven daardoor een zogenaamd analytisch signaal ($\zeta_{a(t)}$, Vergelijking 2). Een analytisch signaal bestaat uit complexe waarden met reële- en een imaginaire delen (respectievelijk $\cos(\cdot)$ en $\sin(\cdot)$, Vergelijking 2).

$$\zeta_{a(t)} = A(t) \cdot e^{i\phi(t)} = A(t)[\cos(\phi(t)) + i \sin(\phi(t))] \quad \text{Vergelijking 2}$$

De optelling van alle harmonische componenten tot het totale getijdesignaal is nog steeds analytisch (Vergelijking 2; Figuur 6-4), wat betekent dat alle interpolaties kunnen worden gedaan op basis van het totale analytische getijdesignaal.

De meerwaarde van een analytische tijdserie is dat de amplitudes en de fasen zijn gescheiden en daarmee apart kunnen worden geïnterpoleerd. De amplitude, hier de getijde-omhullende, is een functie van tijd ($A(t)$, Vergelijking 2; oranje, Figuur 6-4) maar geen functie van de fase. Daardoor kan de getijde-omhullende per tijdstip, t , direct in de ruimte worden geïnterpoleerd. De fase kan ruimtelijk worden geïnterpoleerd door de complexe delen ($\cos(\cdot)$ en $\sin(\cdot)$, Vergelijking 2) apart te interpoleren. Uiteindelijk wordt de ruimtelijke interpolatie van het getijdesignaal dus uitgevoerd door drie onafhankelijke interpolaties ($A(\cdot)$, $\cos(\cdot)$, $\sin(\cdot)$) per tijdstip t . De drie geïnterpoleerde waarden ($A_{itp}(\cdot)$, $\cos_{itp}(\cdot)$, $\sin_{itp}(\cdot)$) kunnen vervolgens weer worden gecombineerd tot één unieke waarde voor de geïnterpoleerde getijde stand ($\zeta_{itp}(t)$, Vergelijking 3).

$$\zeta_{itp}(t) = A_{itp}(t) \cos(\phi_{itp}(t)), \quad \text{waarbij } \phi_{itp}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\sin_{itp}(\phi(t))}{\cos_{itp}(\phi(t))} \right) \quad \text{Vergelijking 3}$$



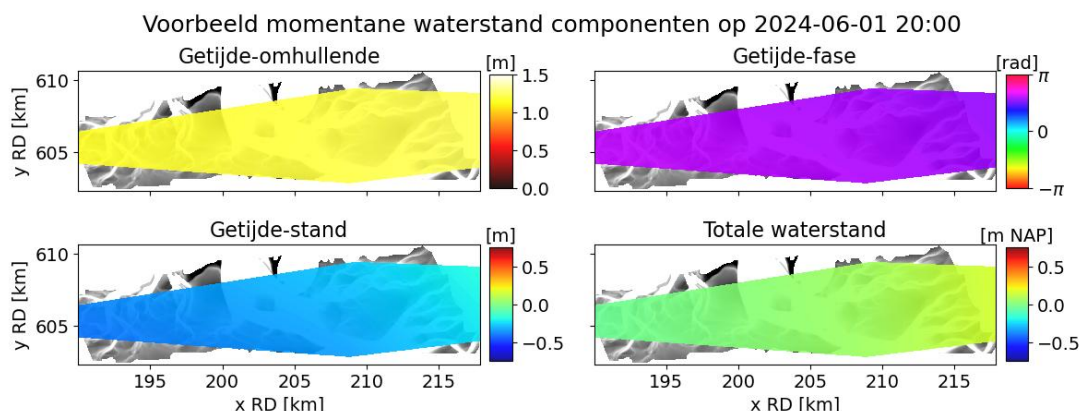
Figuur 6-4 Voorbeeld van het analytische getijdesignaal. Het gemeten getijdesignaal (blauw), de getijdeomhullende (oranje) en de fase (paars).

Naast het getijdesignaal (ζ , Vergelijking 1; Figuur 6-3, oranje) wordt ook het residu (r , Vergelijking 1; Figuur 6-3, groen) in de ruimte geïnterpoleerd. Dit wordt direct gedaan en vervolgens opgeteld op het getijdesignaal om tot de totale geïnterpoleerde waterstand te komen (η , Vergelijking 1; Figuur 6-3, blauw).

In totaal bestaat de interpolatie van het waterstandssignaal dus uit vier onafhankelijke interpolaties, drie voor het getijdesignaal en één voor het residu. Elke interpolatie wordt gedaan door middel van driehoeksinterpolatie.

De resultaten zijn glad en coherent in de ruimte en laten goed de west-oost lopende getijbeweging zien (Figuur 6-5, kleurverloop van west naar oost in getijde-fase, getijde-stand en totale waterstand). Het geïnterpoleerde gebied beslaat het overgrote deel van het Friesche Zeegat, maar niet compleet. Er missen delen van Ameland zuidoost, de Engelmansplaat en het Wierumervad. Om deze delen beter dekkend te krijgen zouden waterstanden moeten worden geëxtrapoleerd. Dit is niet gedaan om mogelijke kunstmatige effecten daarvan op berekende droogvaltijden te voorkomen.

De resultaten voor de ruimtelijke waterstand zijn zoals beoogd coherent en voldoen aan het verwachtingspatroon van een oost-west verplaatsende getijgolf. Daarnaast is het geïnterpoleerde gebied grotendeels gebied dekkend. De geïnterpoleerde waterstanden zijn zodanig gebruikt om droogvaltijden te analyseren.

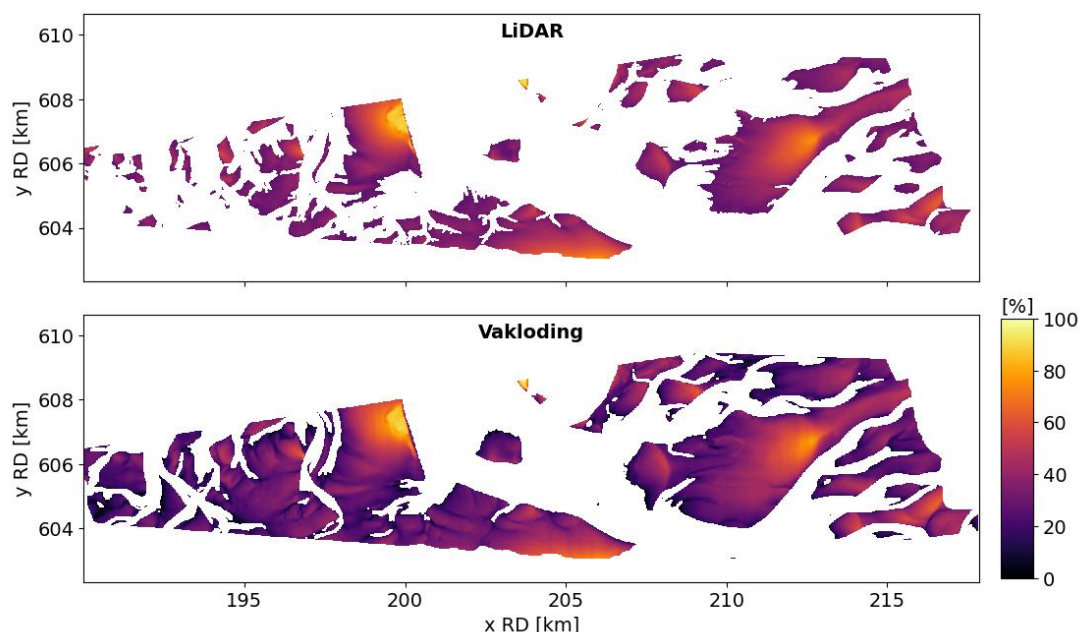


Figuur 6-5 Resultaat van ruimtelijke interpolatie waterstandcomponenten en totale waterstanden op een voorbeeldtijdstip. De getijde-omhullende (links boven; $A_{\text{tip}}(t)$ in Vergelijking 3, links), de getijde-fase (rechts boven; $\phi_{\text{tip}}(t)$ in Vergelijking 3, rechts), de getijde-stand (links onder; $\zeta_{\text{tip}}(t)$ in Vergelijking 3, links) en de totale waterstand (rechts onder; $\eta(t)$ in Vergelijking 1, links).

6.3 Droogvaltijden LiDAR en Vaklodingen

Met behulp van de ruimtelijk geïnterpoleerde tijdseries van waterstanden zijn droogvaltijden berekend voor (gecorrigeerde) bodemdata uit LiDAR en bodemdata uit Vaklodingen. De berekeningen voor LiDAR en Vaklodingen zijn onafhankelijk van elkaar gedaan, om te voorkomen dat de combinatie van de twee verschillende bodem datasets artefacten in tijd en/of ruimte veroorzaakt die doorspelen in de bepaling van de droogvaltijd.

De tijdseries van waterstanden en gemeten bodems hebben verschillende meetfrequenties. De tijdserie van geïnterpoleerde waterstanden is beschikbaar per 10 min, terwijl de LiDAR data beschikbaar zijn als 1-2 metingen per jaar en de Vaklodingen 1 keer per 6 jaar. Bodemmetingen zouden kunnen worden geïnterpoleerd naar de meetfrequentie van de waterstanden, echter lijdt dat tot onvoorspelbare consequenties in de bepaling van de droogvalduur gezien het type interpolatie dan bijvoorbeeld een grote rol speelt. De datasets zijn daarom puur gehouden en droogvaltijden zijn bepaald door waterstanden te koppelen aan de dichtstbijzijnde bodemmeting in de tijd.



Figuur 6-6 Voorbeeld van dagelijkse droogvaltijden per pixel berekent voor LiDAR (boven) en voor Vakloding (onder).

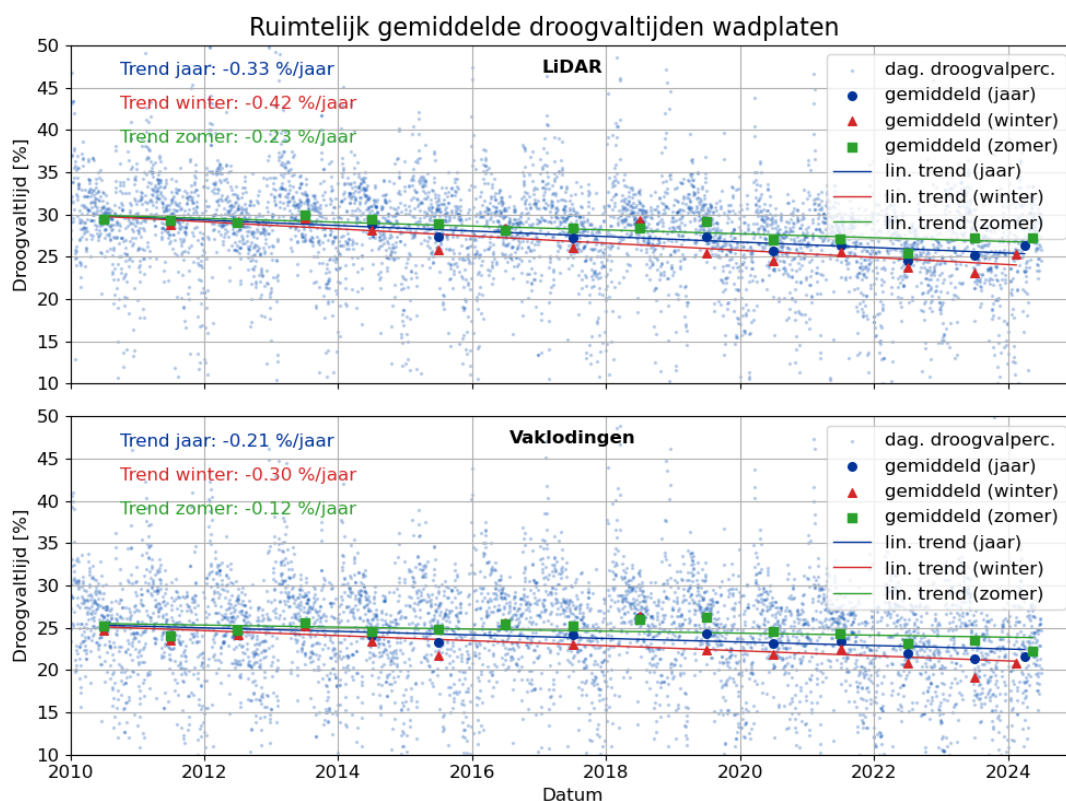
De droogvaltijden zijn bepaald als percentage per dag en per roosterpunt (roosterpunten: LiDAR 10 m x 10 m, Vaklodingen 20 m x 20 m) (Figuur 6-6). Om een representatieve droogvaltijd voor het gehele kombergingsgebied te bepalen zijn de droogvaltijden ruimtelijk gemiddeld. Daarbij zijn alleen pixels van het plaatareaal gemiddeld. Pixels die altijd nat zijn horen bij geulen en zijn daarom buiten beschouwing gelaten. De representatieve (ruimtelijk gemiddelde) droogvaltijden zijn voor de LiDAR data hoger dan voor de Vaklodingen, gezien LiDAR pixels onder -0.5 m NAP zijn afgeknipt. Ten opzichte van de Vaklodingen zijn in de LiDAR data daarom meer pixels “altijd nat” geweest gedurende de meetcyclus en dus niet meegenomen in de berekening van de representatieve droogvaltijd. De Vaklodingen daarentegen bevatten de gehele bodem dus ook dieper liggende pixels die gedurende de meetcyclus natuurlijkerwijs lage droogvalpercentages hadden en daardoor het ruimtelijk gemiddelde verlagen.

Voor zowel de LiDAR data als ook de Vaklodingen data wordt een afname van de droogvaltijd geobserveerd in de periode 2010-2024 (Figuur 6-7). Verondersteld men een lineaire verandering, dan is de jaarlijkse afname van de droogvaltijd voor LiDAR 0.33 %/j (zie ook Figuur 6-7 boven, blauw) en voor de Vaklodingen 0.21 %/j (zie ook Figuur 6-7 onder, blauw). De jaarlijkse variatie in de droogvaltijden is groot, zo zijn de droogvaltijden in winter (veel) korter dan in de zomer (zie seizoen variatie in puntenwolken LiDAR en Vaklodingen Figuur 6-7). De jaarlijkse afname in droogvaltijd is voor het winterhalfjaar 0.42%/0.37% (LiDAR/Vaklodingen) (Figuur 6-7, rood) en voor het zomerhalfjaar 0.23%/0.12% (LiDAR/Vaklodingen) (Figuur 6-7, groen). De droogvaltijden zijn dus sterker afgenomen in de winter dan in de zomer.

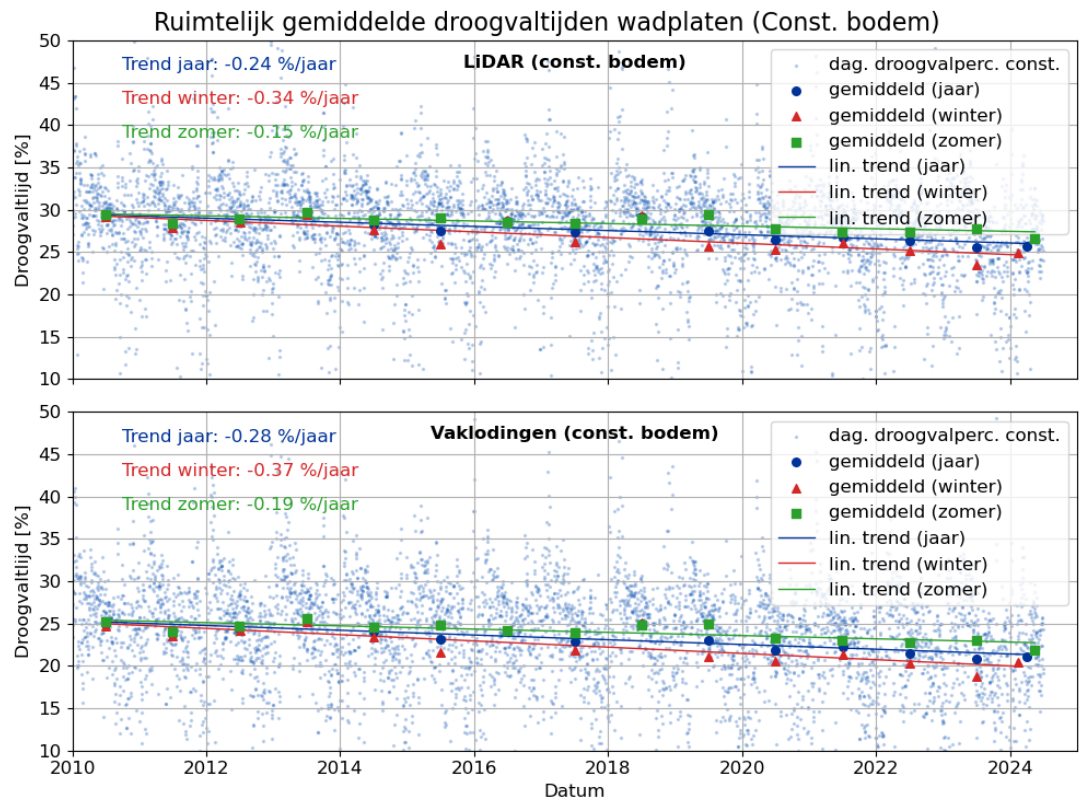
Om een indruk te krijgen van onzekerheid van de bepaalde droogvaltijden is onderzocht wat het betekent als de verandering in waterstand wordt losgekoppeld van de verandering in de bodem. Dit is gedaan door de droogvaltijden nogmaals te berekenen op basis van een constante bodemligging. Voor de droogvaltijden van de LiDAR is hiervoor de eerste meting uit 2010 gebruikt. Voor de droogvaltijden van de Vaklodingen bestaat geen meting uit 2010 en is de dichtstbijzijnde meting van 2012 gebruikt. Uit de analyse van droogvaltijden op basis van constante bodemligging wordt eveneens een afname van droogvaltijd geconstateerd (Figuur 6-8).

Deze afname is vergelijkbaar met de eerder geconstateerde afname van droogvaltijd voor variërende bodemligging voor zowel LiDAR als ook Vaklodingen. Volgens de lineaire trend, is de jaarlijkse afname voor de constante LiDAR bodem nu iets vlakker ten opzichte van de variërende bodem (0.24 %/j vs. 0.33 %/j), echter voor de Vaklodingen is het omgekeerd en is de jaarlijkse afname voor constante bodem steiler dan voor de variërende bodemligging (0.28 %/j vs. 0.21 %/j). Voor de winter en zomer seizoenen geldt het zelfde, waarbij de trends voor constante bodemligging ten opzichte van de variërende bodemligging iets vlakker zijn voor LiDAR en iets steiler zijn voor Vaklodingen.

De afname van droogvaltijd op basis van constante bodemligging is vergelijkbaar met de afname van droogvaltijd op basis van tijds-variërende bodemligging (voor LiDAR iets vlakker en voor Vaklodingen iets steiler). Dat betekent dat veranderingen in de bodemligging volgens de LiDAR en Vaklodingen data geen bepalende factor kunnen zijn voor de geobserveerde afname van de droogvaltijd. Gezien de droogvaltijd wordt bepaald door de bodemligging in combinatie met de waterstand moet noodzakelijkerwijs de verandering in waterstanden verantwoordelijk zijn voor de geobserveerde afname in droogvaltijd.



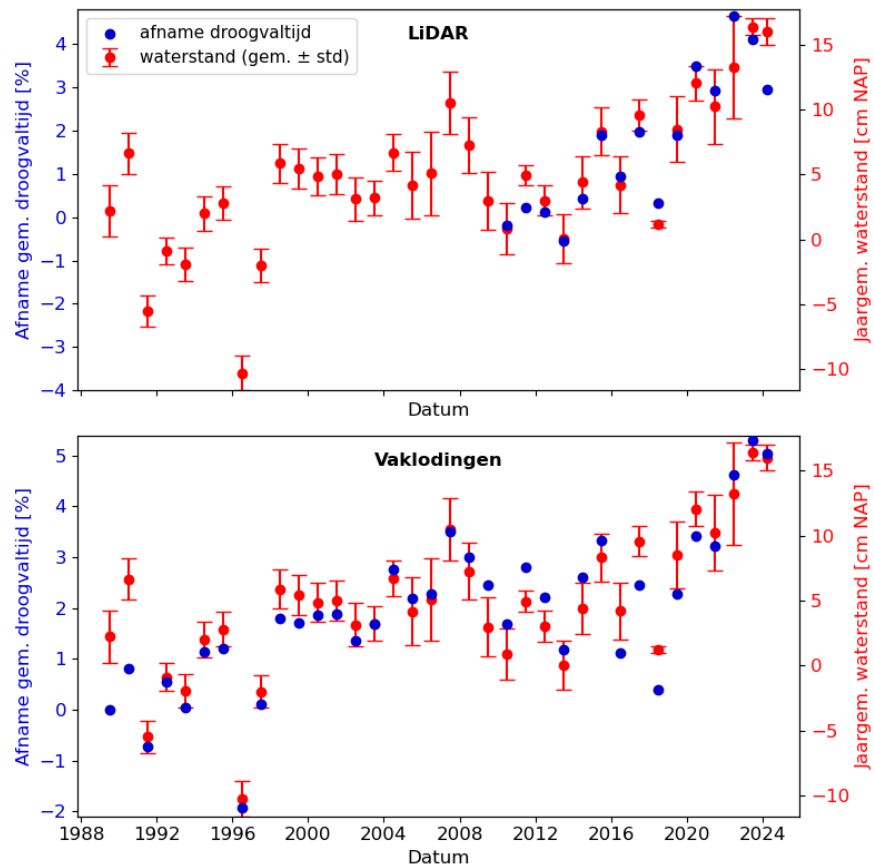
Figuur 6-7 Droogvaltijden berekend op basis van ruimtelijk geïnterpoleerde waterstanden voor bodemgegevens uit LiDAR (boven) en Vaklodingen (onder).



Figuur 6-8 Droogvaltijden berekend op basis van ruimtelijk geïnterpoleerde waterstanden voor constante bodem volgens LiDAR van 2010 (boven) en Vakloding van 2012 (onder).

6.4 Waarnemingen van droogvaltijden en waterstand

De afname van de droogvaltijd als gevolg van veranderingen in de waterstand zijn nader onderzocht. Hiervoor is de geobserveerde afname van de droogvaltijd voor variërende bodem metingen (LiDAR en Vaklodingen) uitgezet tegen de gemiddelde waterstandveranderingen van de stations Nes, Schiermonnikoog, Lauweroog en Eemshaven (Figuur 6-9). Daaruit blijkt dat de waterstanden zijn begonnen toe te nemen ergens tussen 2009-2014 en dus rond de start van de LiDAR metingen (Figuur 6-9, boven) en ook het tijdstip dat de droogvaltijden begonnen af te nemen. Dit is ook te zien voor de droogvaltijden volgens Vaklodingen data (Figuur 6-9, onder) die de veranderingen in waterstand al vanaf 1989 nauwgezet volgen. De waterstanden fluctueren sterk, maar rond 2009-2014 begint een structurele toename van de gemiddelde waterstand. Deze toename van de waterstand is groot. Afhankelijk van het precieze tijdstip van initialisatie tussen 2009 en 2014 is de totale toename 12-17 cm binnen 10-15 jaar. Deze toename is groter dan de algemene zeespiegelstijging van 2.9 mm/j langs de Nederlandse kust (zeespiegelstijging sinds 1993, zie Taal, 2023) die tot een verwachte toename van 3-4 cm zou leiden. Toch is de toename van 12-17 cm ook niet ongewoon. Al eerder is een gemiddelde stijging van waterstanden van 11 cm binnen een relatief korte periode 1991-1998 waargenomen. Deze toename werd toen gevolgd door een lange periode 1998-ca.2014 waarin de gemiddelde waterstand zelfs licht afnam (ca. 5 cm) en de droogvaltijd licht toenam (ca. 0.8 %).



Figuur 6-9 Afname van droogvaltijd (blauw, verticale as links) uitgezet tegen veranderingen in jaargemiddelde waterstand (rood, verticale as rechts) over de periode 1989-2024 voor LiDAR (boven) en Vaklodingen (onder). Waterstanden zijn aangegeven als het gemiddelde van de stations Nes, Schiermonnikoog, Lauwersoog en Eemshaven met toebehorende standaarddeviatie tussen de vier stations. Ter visualisatie, is een afname in droogvaltijd hier positief gedefinieerd.

6.5 Theoretische beschouwing van droogvaltijd in relatie tot waterstandsobservaties

Op basis van historische waterstandsmetingen is de afname van de droogvaltijd gedurende de afgelopen 10-15 jaar niet uitzonderlijk en waarschijnlijk van tijdelijke aard. Om veranderingen in droogvaltijd in relatie tot veranderingen in waterstand te kunnen duiden helpt een theoretische beschouwing. Een versimpeld model voor de droogvaltijd op bodem hoogte z als functie van het gemiddeld zeeniveau, GMZ, en een sinusvormige (getij) golf met amplitude A geeft verder inzicht (Vergelijking 4).

$$\text{droogvaltijd} = \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{\pi}\right) * \arcsin\left(\frac{z - \text{GMZ}}{A}\right) \quad \text{Vergelijking 4}$$

De droogvaltijd op een bepaalde locatie hangt dus af van drie parameters die als volgt zijn onderzocht:

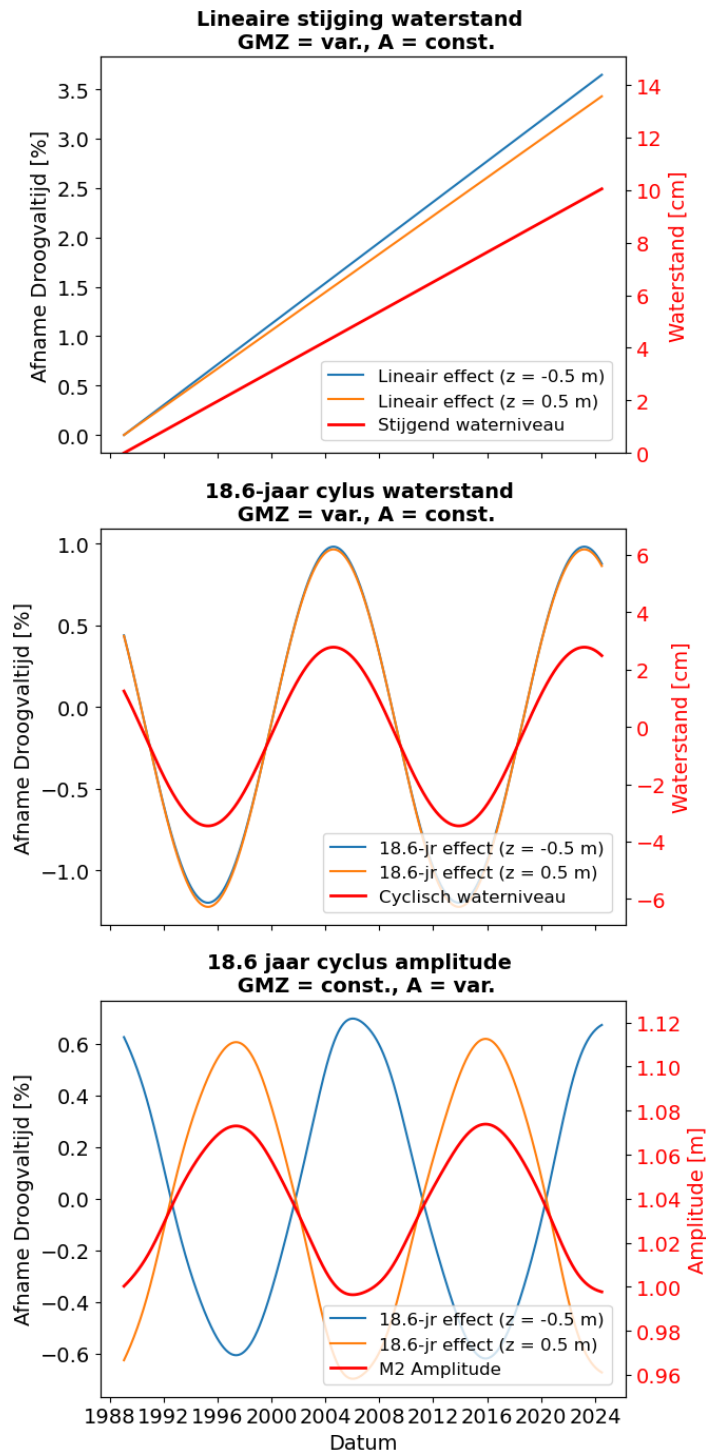
- de bodemhoogte, z is met name ruimtelijk afhankelijk van de locatie in het kombergingsgebied*
Het effect van z is onderzocht door naar een theoretisch punt onder de waterlijn $z = -0.5$ m (Figuur 6-10, blauwe lijnen) en een punt boven de waterlijn $z = +0.5$ m (Figuur 6-10, oranje lijnen) te kijken.
- het gemiddeld zeeniveau, GMZ, is met name tijdsafhankelijk*
Het effect van de GMZ variatie is onderzocht aan de hand van alle waterstandsdata tussen 1989-2024 gemiddeld over de vier meetstations (zie ook Figuur 6-9, rode punten). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen

- a. een lineaire stijging van GMZ (Figuur 6-10, bovenste paneel) en
 - b. een 18.6 jaar oscillatie van GMZ (Figuur 6-10, middelste paneel).
- De lineaire stijging (a) en de 18.6 jaar oscillatie (b) in de waterstandsmetingen zijn verkregen door middel van een best-fit op de station-gemiddelde waterstandsobservaties. De best-fit is gedaan met behulp van een kleinste kwadraten regressie waarbij simultaan wordt opgelost naar een lineaire trend, en de fase en amplitude van een oscillatie met een periode van 18.6 jaar.
- iii. *de amplitude van het getij varieert op lange termijn op basis van de 18.6-jaar cyclus en is tijdsafhankelijk*
- Het effect van een variatie in de getijdeamplitude is bekeken aan de hand van de amplitude variatie van het M2 getij (Figuur 6-10, onderste paneel).

(i, iia) Als eerste is gekeken naar het effect van een continue toename in gemiddeld zeeniveau op de afname van droogvaltijd (Figuur 6-10, bovenste paneel). Over de periode 1989-2024 is de lineaire toename van het zeeniveau 10.0 cm (2.8 mm/j) en komt daarmee nagenoeg exact overeen met de algemene zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust (2.9 mm/j sinds 1993, zie Taal, 2023). Het effect van deze lineaire zeespiegelstijging is een lineaire afname van de droogvaltijd. Ook blijkt dat de droogvaltijd voor een dieper gelegen bodempunt (Figuur 6-10, -0.5 m, blauwe lijn) sneller afneemt dan voor een hoger gelegen bodempunt (Figuur 6-10, +0.5 m, oranje lijn). Het geeft daarmee een directe verklaring voor het feit dat in de periode van de LiDAR monitoring de droogvaltijden gedurende de wintermaanden harder zijn afgenomen dan gedurende de zomermaanden (zie Figuur 6-7 en Figuur 6-8), want in de winter zijn de waterstanden hoger en liggen de platen dus relatief dieper dan in de zomer. De totale afname in droogvaltijd is ca. 3-3.5 %.

(i, iib) Een andere factor die mee speelt in lange termijn veranderingen van de droogvaltijd is de 18.6 jaar getij cyclus. Deze cyclus, ook wel de nodale cyclus genoemd, ontstaat doordat het baanvlak van de maan langzaam kantelt (precessie). Dit veroorzaakt een lange-termijn modulatie van de getijdeamplitude. De 18.6 jaar cyclus kan ook een variatie in zeeniveau veroorzaken. Dat is een niet-lineair effect dat moeilijk voorspelbaar is, maar wel kan worden gedetecteerd (in dit geval door middel van de best-fit, zie ii) (Figuur 6-10 middelste paneel, rode lijn). In de waterstandsmetingen wordt een 18.6 jaar oscillatie met een amplitude van 3.1 cm gedetecteerd. Dat betekent dat het totale verschil (de range) 6.2 cm is en dat is significant ten opzichte van de lineaire lange termijn trend van 10.0 cm gedurende de afgelopen 35 jaar. Het effect van deze oscillatie op de droogvaltijd is een totaal verschil van ca. 2.2 % tussen de minimale en maximale droogvaltijd voor bodemhoogtes van ± 0.5 m. De droogvaltijd neemt af als waterstand toeneemt en vice versa. Het effect is symmetrisch rond de waterlijn (Figuur 6-10 middelste paneel, blauwe en oranje lijnen overlappen), maar hangt wel af van de afstand tot de waterlijn (bijvoorbeeld voor $z = \pm 0.1$ m is het verschil in droogvaltijd ca. 1.9 %, niet getoond).

(i,iii) De variatie van de getijdeamplitude zorgt ook voor veranderingen in droogvaltijd (Figuur 6-10 onderste paneel, rode lijn). Ter illustratie is hier gekeken naar de amplitudevariatie van het dominante M2 getij. Het effect daarvan op de droogvaltijd is voor een bodempunt onder de waterlijn tegenovergesteld aan een punt boven de waterlijn (Figuur 6-10 onderste paneel, -0.5 m blauwe lijn vs. +0.5 m oranje lijn). Als de getijamplitude kleiner wordt neemt de droogvaltijd af voor een punt onder de waterlijn en neemt de droogvaltijd toe voor een punt boven de waterlijn. Voor beide bodemhoogtes is het totale verschil in droogvaltijd ca. 1.3%, maar dat hangt wel af van de afstand tot de waterlijn (bijvoorbeeld voor $z = \pm 0.1$ m is het verschil in droogvaltijd ca. 0.2 %, niet getoond).



Figuur 6-10 Theoretische afname van droogvaltijd (verticale as links) voor een bodemhoogte onder de waterlijn (-0.5 m, blauw) en een bodemhoogte boven de waterlijn (+0.5 m, oranje). De afname van de droogvaltijd wordt bepaald door drie verschillende factoren (rode lijnen, verticale as rechts): een continue stijging van het waterniveau (bovenste paneel), een 18.6 jaar oscillatie van de waterstand (middelste paneel), en een 18.6 jaar oscillatie in de getij amplituden (onderste paneel). Ter visualisatie, is een afname in droogvaltijd hier positief gedefinieerd.

Een interessante observatie is dat de 18.6 jaar waterstand oscillatie (iib; Figuur 6-10 middelste paneel, rode lijn) in tegenfase is met de 18.6 jaar amplitude oscillatie (iii; Figuur 6-10 onderste paneel, rode lijn). Dat betekent dat de effecten op de droogvaltijd positief optellen voor een punt onder de waterlijn en negatief optellen voor een punt boven de waterlijn.

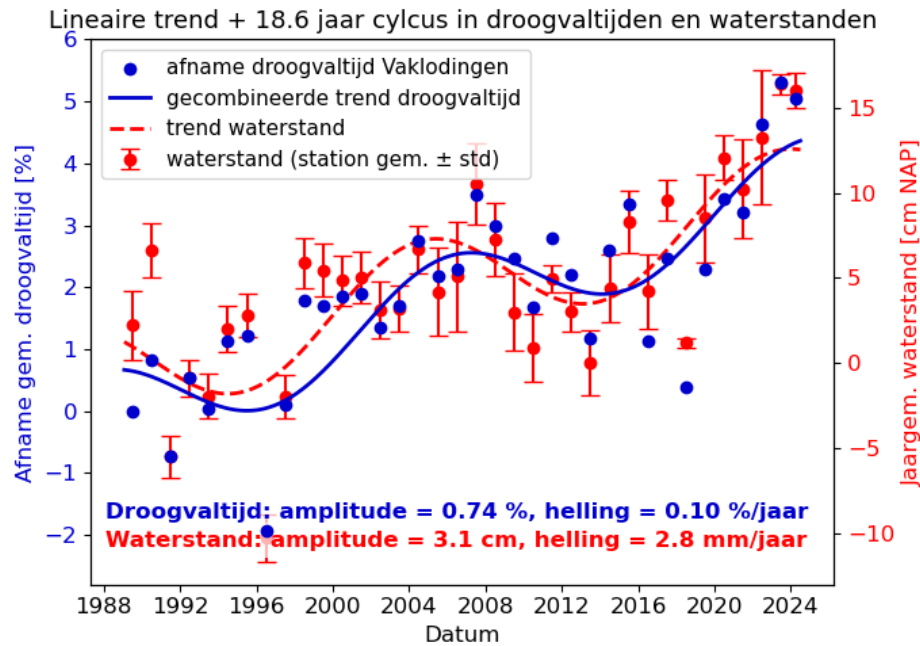
De vraag is vervolgens of de bodemhoogte van het intergetijdegebied in het Friesche Zeegat voornamelijk onder of boven NAP ligt. Het plaatareaal van het Friesche Zeegat ligt grotendeels onder NAP volgens de LiDAR metingen (areaal onder NAP: Pinkegat 75% en Zoutkamperlaag 50%; zie Figuur 4-1 en Figuur 4-2). Echter wordt daarin alleen het areaal meegenomen boven -0.5 m NAP. De Vaklodingen bevatten alle bodemhoogtes en laten zien dat het intergetijde areaal tussen 0 en -1.5 m NAP zelfs meer dan vier keer zo groot is als het gebied boven 0 m NAP. De gemiddelde bodemhoogte van het intergetijdegebied (tussen ± 1.5 m NAP) is ongeveer -0.4 m NAP. Met dit gegeven, is de verwachting voor het Friesche Zeegat dat punten onder de waterlijn het signaal sterk domineren en dat de effecten van (iib) de waterstandsoscillatie en (iii) de getijamplitude oscillatie voornamelijk positief optellen.

Samenvattend neemt droogvaltijd naar verwachting af ten tijde van een toename van het gemiddeld zeeniveau en een afname van de getij amplitude. De lineaire stijging in de station-gemiddelde waterstanden van 10 cm over de periode 1989-2024 komt overeen met de algemene zeespiegelstijging. Voor een bodemhoogte van -0.5 m leidt dat volgens het versimpelde theoretische model grofweg tot een 3% afname van de droogvaltijd. De 18.6-jaar waterstandsoscillatie heeft een significante range van 6 cm en leidt op zichzelf tot een verschil in droogvaltijd van ca. 2 %. De 18.6-jaar amplitudemodulatie van het getij leidt tot een verschil van ca. 1% in droogvaltijd en telt naar verwachting positief op de overige droogvaltijden gezien het intergetijdengebied van het Friesche Zeegat voornamelijk onder NAP ligt, met een gemiddelde bodemhoogte van ca. -0.4 m NAP. De genoemde percentages voor -0.5 m geven een indruk van de grote orde van de te verwachten droogvaltijdsverschillen in het Friesche Zeegat.

6.6 Waargenomen droogvaltijd in relatie tot waterstandsobservaties (decennia, lange termijn)

Om de uitkomsten van de theoretische beschouwing te toetsen zijn de droogvaltijden volgens de bodemmetingen geanalyseerd. Om een dergelijke analyse robuust te kunnen doen moet de periode van metingen langer zijn dan de gezochte fenomenen waaronder hier de 18.6 jaar cyclus. Idealiter is de periode van metingen minstens twee keer zo lang als het gezochte fenomeen. De periode van beschikbare LiDAR metingen is met 14 jaar te kort, daarom is de analyse gedaan op basis van de droogvaltijden volgens Vaklodingen (zie Figuur 6-9, onder) die de volledige periode van 35 jaar waterstandsmetingen beslaan. Daarnaast zijn de Vaklodingen volledig diepte dekkend.

De dagelijkse droogvaltijden zijn ruimtelijk gemiddeld (zie ook Figuur 6-7 onder, blauwe punten wolk) en net als de waterstanden geanalyseerd door een best-fit te doen op een lineaire trend en een 18.6 jaar oscillatie (cf. paragraaf 6.5 ii). Zo kan worden getoetst welke invloed de zeespiegelstijging en de 18.6 jaar cyclus daadwerkelijk hebben uitgeoefend op de droogvaltijden in het Friesche Zeegat. De berekende trends in de droogvaltijden volgen nauwgezet de trends in de waterstanden (Figuur 6-11). Het bevestigt de verwachting uit de theoretische beschouwing dat de afname in droogvaltijd in fase is met de waterstandsveranderingen (zie paragraaf 6.5 iib en Figuur 6-10 middelste paneel) en in tegenfase is met de 18.6 jaar amplitude modulatie van het getij (zie paragraaf 6.5 iii en Figuur 6-10 onderste paneel). In het Friesche Zeegat is de 18.6-jaar cyclus in de waterstanden met amplitude 3.1 cm (range 6.2 cm) gekoppeld aan een 18.6-jaar cyclus in de droogvaltijden met amplitude 0.74% (range 1.5 %). Daarnaast is de zeespiegelstijging van 2.8 mm/j gekoppeld aan een afname in droogvaltijd van 0.1% per jaar.



Figuur 6-11 Afname droogvaltijd volgens Vaklodingen (blauw, verticale as links) in combinatie met toename ruimtelijk gemiddelde waterstanden. Trends voor waterstanden (rood gestippelde lijn) en droogvaltijden (blauwe lijn) zijn respectievelijk berekend op basis van de 10 min waterstandsmetingen en de dagelijkse droogvaltijden en representeren het effect van een lineaire trend (helling) plus 18.6-jaar cyclus (amplitude). Ter referentie zijn de jaargemiddelde waarden voor de waterstanden (rode punten) en droogvaltijden (blauwe punten) aangegeven. De gebruikte waterstanden zijn het gemiddelde van de stations Nes, Schiermonnikoog, Lauwersoog en Eemshaven. Ter visualisatie, is een afname in droogvaltijd hier positief gedefinieerd.

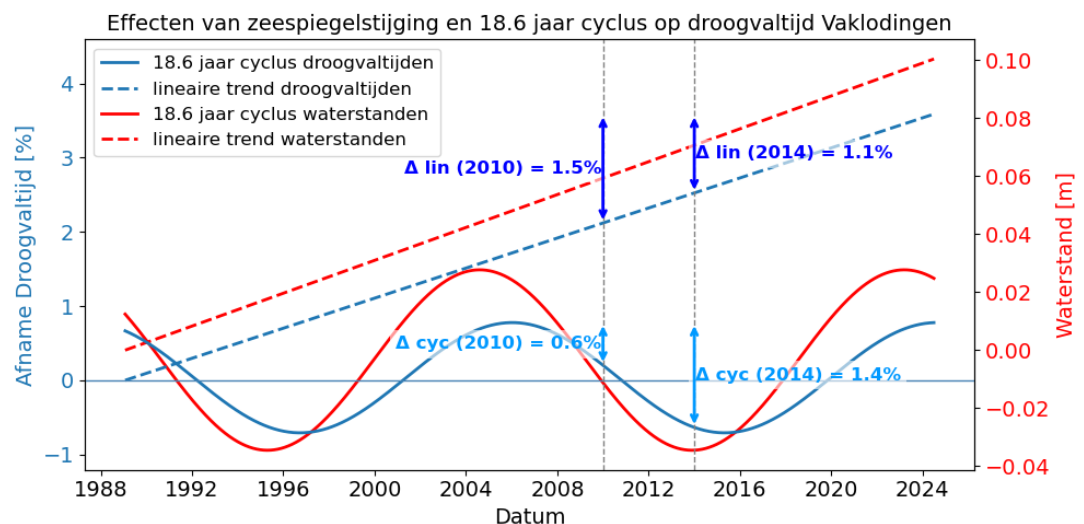
De recente periode vanaf begin van de monitoring van het plaatareaal in 2010 tot op heden, ligt voornamelijk in een stijgende fase van de 18.6-jaar cyclus. Volgens de analyse zijn rond 2014 de waterstanden overgegaan naar de stijgende fase in de 18.6 jaar cyclus en zijn de droogvaltijden vervolgens overgaan naar een fase van versterkte afname (Figuur 6-12). Kijkt men vanaf 2010 tot 2024, dan bedraagt de totale afname van de droogvaltijd 2.1 % met een bijdrage van 0.6 % door de 18.6 jaar cyclus en een bijdrage van 1.5 % door zeespiegelstijging. Tussentijds, 2010-2014 vond er nog een lichte toename van droogvaltijd plaats met 0.4% (zie Figuur 6-11, geannoteerde verschillen in 2010 en 2014; Figuur 6-11, blauwe lijn). Deze toename komt door de omslag in 2007 naar dalende waterstanden in de 18.6 jaar cyclus (2007-2024 is totale toename droogvaltijd 0.7%). De daadwerkelijke lange termijn afname in de droogvaltijden begint ongeveer 10 jaar geleden, in 2014/2015, als de waterstanden in een stijgende fase komen van de 18.6 jaar cyclus. Tot en met 2024 zorgt dat voor een totale afname van 2.5 % in de droogvaltijden. Gedurende deze jaren wordt de afname gedomineerd door de 18.6 jaar cyclus met een bijdrage van 1.4% (maximum 1.5% in 2015). De trendanalyse verklaart zodoende waarom er in de recente jaren 2014-2024 een sterke afname is geweest in de droogvaltijd. De droogvaltijd is afgenomen omdat de 18.6-jaar cyclus in een fase van stijgende waterstanden zat in combinatie met een fase van afnemende amplituden van het getij. Deze veranderingen tellen op de lineaire trend van zeespiegelstijging.

Verder terugkijkend in de tijd heeft de 18.6-jaar cyclus in de jaren 2004-2014 de lineaire zeespiegelstijging tegengewerkt (Figuur 6-11, Figuur 6-12) en zo voor relatief stabiele waterstanden en zelfs een lichte daling in waterstanden gezorgd. Dit kwam ook de droogvaltijden ten goede die gedurende deze tijd vrij stabiel waren. Kijkend naar de toekomst, wordt voor de komende jaren weer een zelfde gedrag verwacht. In 2024-25 lijkt de 18.6-jaar cyclus zijn piek te bereiken, waarna de waterstanden waarschijnlijk weer verlagen (zie ook paragraaf 6.5 iib en Figuur 6-10 middelste paneel).

Samen met een toenemende amplitude van het getij (zie ook paragraaf 6.5 iii en Figuur 6-10 onderste paneel) zal de 18.6-jaar cyclus zodoende de droogvaltijden stabiel houden en mogelijk weer licht laten toenemen de komende jaren 2024/2025 tot 2034/2035.

De lineaire lange termijn toename van de waterstanden zorgt voor een algehele afname van droogvaltijd van 0.1 %/j gedurende de afgelopen 35 jaar. Het is onbekend hoe deze ontwikkelingen binnen nog langere tijdschalen van eeuwen passen en of het dus een natuurlijke lange termijn fluctuatie is of een blijvende trend. De waterstandsmeeetreeksen in dit rapport zijn niet lang genoeg om te kunnen onderzoeken hoe een systeem als het Friesche Zeegat in het verleden mogelijk heeft gereageerd op zulke multidecale veranderingen in waterstanden en droogvaltijd.

Naast de zeespiegelstijging zijn er mogelijk ook kunstmatige lange termijn artefacten in de droogvaltijdberekeningen door zakking van de waterstandsmeters (zie ook paragraaf 6.1). Met mogelijke zakkingen op centimeter(s) niveau in de periode vanaf 2010 is de invloed op de berekende droogvaltijden naar verwachting echter klein ten opzichte van de langjarige zeespiegelstijging (lineaire trend: waterstand 2.8 mm/j , droogvaltijd -0.1 %/j) en de 18.6-jaar getij cyclus (oscillatie range: waterstand 6.2 cm, droogvaltijd 1.5%). Lokale bodembeweging bij getijdenstations en wel/niet toegepaste correcties daarvoor moeten nader worden uitgezocht in samenwerking met Rijkswaterstaat.



Figuur 6-12 Waargenomen afname van droogvaltijd (blauw, verticale as links) in relatie tot waterstandsvariëaties (rood, verticale as rechts). De stijging van het gemiddeld zeeniveau met 10 cm (GMZ) (rood gestippeld) en het effect op de afname van de droogvaltijd (blauw gestippeld). Het effect van de 18.6 jaar getij cyclus (rood doorgetrokken) op de droogvaltijden (blauw doorgetrokken). Verticale pijltjes met annotaties geven verschillen weer tussen 2010-2024 en tussen 2014-2024. Ter visualisatie, is een afname in droogvaltijd hier positief gedefinieerd.

6.7 Waargenomen droogvaltijd in relatie tot wind en waterstand (jaren, middellange termijn)

De 18.6-jaar getijcyclus is verantwoordelijk voor de versterkte toename van de waterstanden en daarmee de afname van droogvaltijd gedurende 2014-2024 (het merendeel van de monitoring periode 2010-2024). Naast deze lange-termijn ontwikkeling laten de waterstanden ook fluctuaties zien van jaar tot jaar (zie spreiding in rode punten Figuur 6-11). Deze waterstand fluctuaties zijn aanzienlijk met een standaarddeviatie van 3.4 cm en worden voornamelijk bepaald door meteorologische condities, met name door de oost-west windcomponent. Deze windcomponent is bepaald door de oost-west vectorcomponent van de windrichting (zie ook paragraaf 5.3). Op een bepaald tijdstip kan deze oost-west vectorcomponent positief zijn of negatief zijn.

Oostelijke wind is hier gedefinieerd door alle negatieve waarden en westelijke wind door de positieve waarden. Westelijke wind drijft de waterstanden op in het Friesche Zeegat (windopzet). Oostelijke wind doet het tegenovergestelde en zorgt voor een verlaging van de waterstanden in het Friesche Zeegat (windafzet). Als gedurende een jaar de windkracht vanuit westelijke richting gemiddeld hoger was, dan was ook de waterstand hoger en omgekeerd (Figuur 6-13 boven links). Gezien de droogvaltijden een functie zijn van de waterstanden (zie paragraaf 6.5; Vergelijking 4), verklaart de oost-westelijke windcomponent ook de korte termijn fluctuaties van 1-2% in de droogvaltijden (Figuur 6-13 boven rechts). De oost-west windcomponenten tonen geen lange termijn stijgende of dalende trend.

Voor de periode van 2014-2024 waarin de lange termijn ontwikkelingen een afname in droogvaltijd forceren vinden er ook grote variaties plaats gedreven door meteorologische condities. De meteorologische variaties vertonen op middellange termijn een toenemende droogvaltijd tussen 2014-2018 (Figuur 6-13 rechter kolom, groen gestippeld) en een afname tussen 2018-2024 (Figuur 6-13 rechter kolom, cyaan gestippeld). Deze toename en afname vallen binnen de natuurlijke variatie van de droogvaltijden en zijn dus een stochastisch patroon. Het patroon wordt bepaald door drie sterke pieken: een piek in 2018 waarin de waterstanden laag waren en de droogvaltijden hoog (Figuur 6-13 boven, groene balk), en twee pieken rond 2015 en 2023 toen de waterstanden juist hoog waren en de droogvaltijden conform laag waren (Figuur 6-13 boven, rode balken). Deze pieken kunnen worden verklaard door stormachtige perioden in de oostelijke windcomponent en stormachtige perioden in de westelijke windcomponent. Stormachtigheid is gedefinieerd als het percentage van tijd per jaar dat de windkracht hoger was dan het 95 percentiel van alle metingen met desbetreffende windcomponent (cf. paragraaf 5.3). Zo blijkt dat het rond de jaren 2015 en 2023 stormachtiger was vanuit westelijke windrichtingen (Figuur 6-13 midden), wat zorgde voor hoge waterstanden (Figuur 6-13 midden links, rode balken) en afnemende droogvaltijden (Figuur 6-13 midden rechts, rode balken). In 2018 was de situatie omgekeerd en was het stormachtig vanuit oostelijke windrichtingen (Figuur 6-13 onder), wat zorgde voor lagere waterstanden (Figuur 6-13 onder links, groene balk), en toenemende droogvaltijden (Figuur 6-13 onder rechts, groene balk).

Op middellange termijn, bepalen de jaren 2015 en 2018 een patroon met toenemende droogvaltijden van 3.0% gedurende de periode 2014-2018. De jaren 2018 en 2023 bepalen een omgekeerd patroon met 3.0 % afname in droogvaltijd voor de recente periode 2018-2024. Deze stochastische schommelingen heffen elkaar op en gebeuren rond de langetermijntrend van afnemende droogvaltijden door de lineaire zeespiegelstijging en 18.6-jaar cyclus (2.1 % voor periode 2014-2024, zie paragraaf 6.6). Het levert zo een sluitende verklaring en tijdlijn voor de waargenomen variaties in de droogvaltijden op lange en middellange termijn (zie, Figuur 6-11):

Tijdlijn 2014-2024

Vanaf 2014/2015 beginnen de droogvaltijden toe te nemen door de omslag naar stijgende waterstanden (en afnemende getij amplituden) in de 18.6-jaar cyclus.

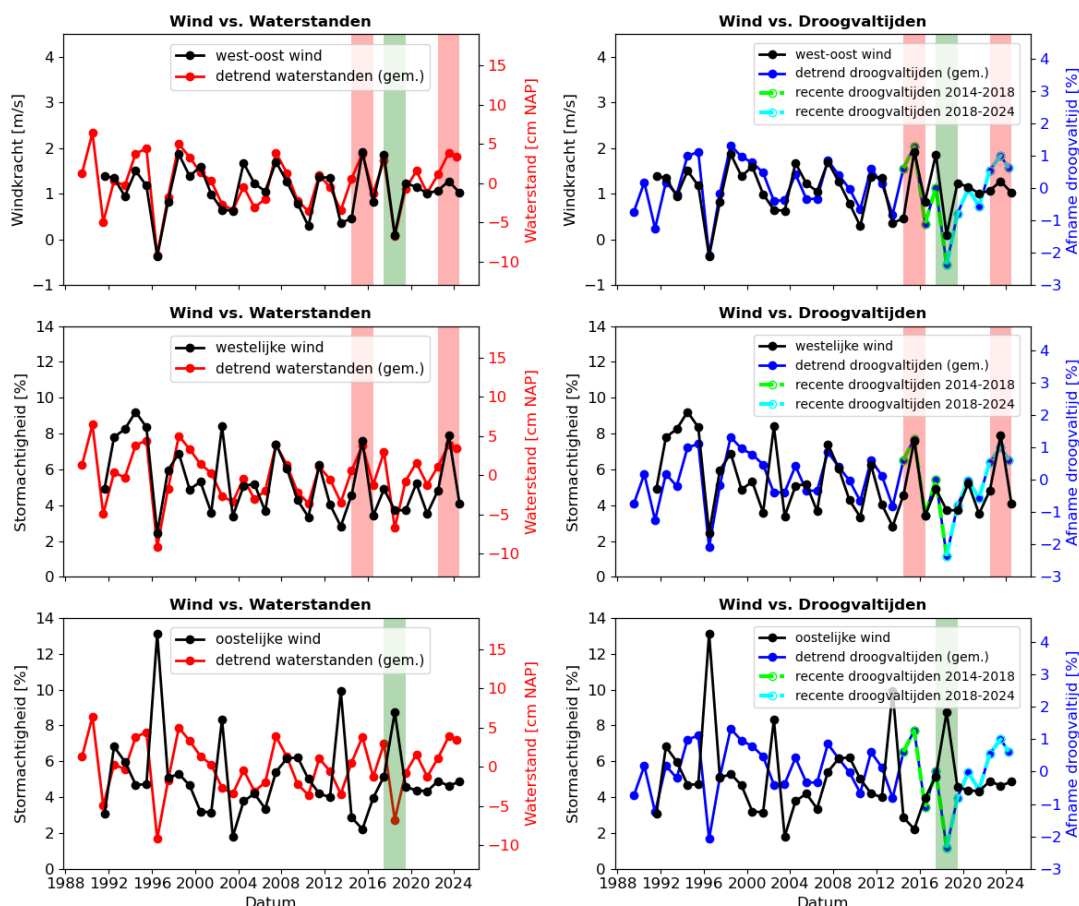


Tussen 2014 en 2018 wordt de lange termijn afname in de droogvaltijden nog gecompenseerd door een middellange termijn toename in droogvaltijd van 3.0 % gedreven door variaties in oost-westelijke wind. Deze middellange termijn toename komt door een combinatie van meer wateropzet in 2015 en waterafzet in 2018.



Vanaf 2018 wordt de lange termijn afname in de droogvaltijd versterkt door een afname in droogvaltijd van 3.0 % gedreven door variaties in oost-westelijke wind. Deze middellange termijn afname komt door een combinatie van waterafzet rond 2018 en wateropzet rond 2023.

Opgemerkt dient te worden dat de meteorologische condities ook historisch sterke uitschieters in de waterstanden en droogvaltijden verklaren. Zo zijn er bijvoorbeeld in 1996 buitengewoon lage waterstanden gemeten die voor buitengewoon hoge droogvaltijden zorgden (zie ook Figuur 6-9, Figuur 6-11). De lage waterstanden kunnen direct worden verklaard uit het feit dat er weinig wind was vanuit de westelijke windrichtingen (Figuur 6-13 midden) en het tegelijkertijd stormachtig was vanuit oostelijke windrichtingen (Figuur 6-13 onder).



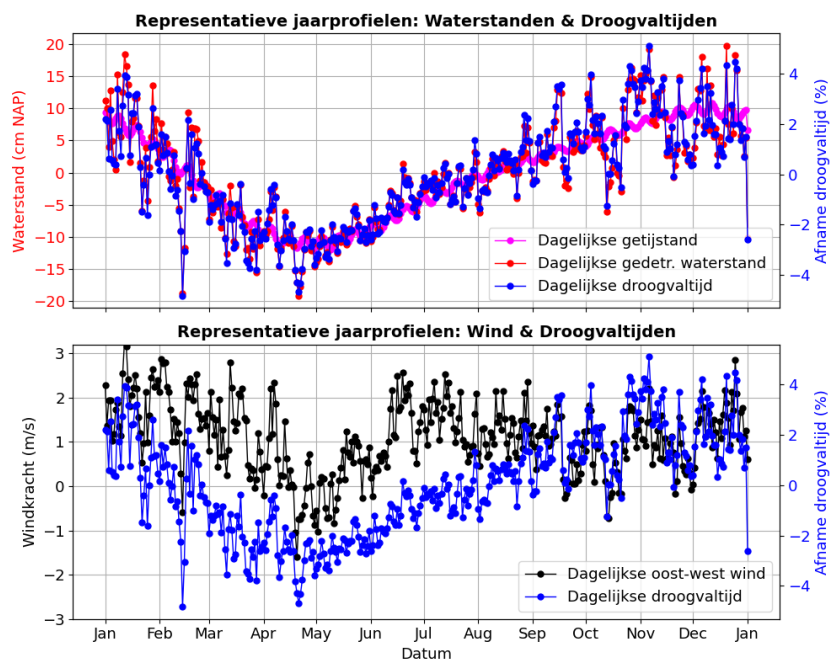
Figuur 6-13 Oostelijke- en westelijke windcomponenten (zwarte lijnen) in relatie tot korte termijn variatie in waterstanden (linker kolom) en afname droogvaltijd (rechter kolom). De waterstanden (rode lijnen) zijn trendvrij gemaakt door de lineaire trend en de 18.6-jaar trend ervan af te trekken. Hetzelfde is gedaan voor de droogvaltijden (blauwe lijnen). Bovenste panelen geven de relatie met de jaargemiddelde oost-west wind component weer. Middelste panelen geven de relatie weer met stormachtigheid vanuit westelijke wind richting. Onderste panelen geven de relatie weer met stormachtigheid vanuit oostelijke wind richting. Stormachtigheid is gedefinieerd als het percentage van tijd per jaar dat de windkracht hoger was dan het 95 percentiel van alle metingen met desbetreffende windcomponent. De toename in droogvaltijden 2014-2018 is geaccentueerd (groen gestippeld) net als de recente afname in droogvaltijd 2018-2024 (cyaan gestippeld). Sterke pieken gedurende deze perioden zijn uitgelicht met rode balk als de droogvaltijd afnam en groene balk als de droogvaltijd toenam. Ter visualisatie, is een afname in droogvaltijd hier positief gedefinieerd.

6.8 Waargenomen droogvaltijd in relatie tot wind en waterstand (seizoenen, korte termijn)

Ook op korte termijn worden de droogvaltijden beïnvloed door waterstandsveranderingen (zie ook puntenwolk Figuur 6-7). Seizoensgebonden veranderingen in de waterstanden uiten zich als meteorologische getijvariatie (Figuur 6-14 boven, magenta), die veroorzaakt wordt door variatie in de oost-west windcomponent (Figuur 6-14 onder, zwart).

Daarnaast zorgt de wind ook van dag tot dag voor waterstandschommelingen die groter zijn in de winter dan in de zomer (Figuur 6-14 boven, rood). De droogvaltijden lopen gedurende

het jaar synchroon met de waterstanden (Figuur 6-14 boven, blauw lijn en magenta lijn overlappen). Dit is zelfs van dag tot dag het geval (Figuur 6-14 boven, blauw lijn en rode lijn overlappen), waarbij de variatie in de droogvaltijden ook het grootst is in de winter en veroorzaakt wordt door windopzet en -afzet (Figuur 6-14 onder, waar dagelijkse variaties in blauwe en zwarte lijnen overlappen tussen Okt. tot Feb.). De seizoensgebonden variatie in de droogvaltijden is 4.2%. In de wintermaanden is er daarbovenop nog een dagelijkse variatie in de droogvaltijden door oost-westelijke wind van 2.0%.



Figuur 6-14 Korte termijn veranderingen in afname droogvaltijd (blauw, verticale as rechts) in relatie tot waterstanden (rood, verticale as links boven) en de jaarlijkse getijcyclus (magenta, verticale as links boven), en in relatie tot de oost-west windcomponent (zwart, verticale as links onder). De waterstanden (rood) zijn trendvrij gemaakt door de lineaire trend en de 18.6-jaar trend ervan af te trekken. Representatieve jaarprofielen geven veranderingen weer met behulp van dagelijkse gemiddelden van alle jaren tussen 1991-2024. Ter visualisatie, is een afname in droogvaltijd hier positief gedefinieerd.

6.9 Conclusies ontwikkeling droogvalduur

De adviezen van de Auditcommissie zijn opgevolgd en worden puntsgewijs beantwoord.

De procedure rond de interpolatie van gemeten waterstanden nader tegen het licht houden.

Voor de bepaling van droogvaltijden in het Friesche Zeegat zijn gebied dekkende waterstandmetingen nodig en bodemmetingen. Waterstandsmetingen voor het Friesche Zeegat zijn verkregen door ruimtelijke interpolatie van vier meetstations bij Nes, Lauwersoog, Schiermonnikoog en Eemshaven. De interpolatie is gedaan rekening houdend met faseverschillen in het getij tussen de meetstations.

Zoveel mogelijk gebruik maken van synoptische data voor de bodemligging van wadplaten. Zowel LiDAR data als ook (recente) Vaklodingen.

Droogvaltijden zijn bepaald op basis van LiDAR metingen en Vaklodingen, waarbij ook een nieuwe Vakloding van 2024 is gebruikt. De berekeningen voor LiDAR en Vaklodingen zijn onafhankelijk van elkaar gedaan, om artefacten in tijd en/of ruimte te voorkomen. Droogvaltijden zijn bepaald door waterstanden te koppelen aan de dichtstbijzijnde bodemmeting in de tijd. Voor een lange termijn beschouwing zijn de LiDAR data te kort. Ook dekken deze metingen niet het intergetijdengebied onder -0.5m NAP. Daarom zijn droogvaltijden op basis van Vaklodingen gebruikt om de ontwikkelingen te analyseren over de volledige periode van 35 jaar waterstandsmetingen.

Specifieke aandacht besteden voor het mogelijke effect van de 18,6-jarige astronomische cyclus in het getij en de invloed van windvelden op lokale waterstanden.

Het onderzoek toont aan dat de veranderingen in droogvaltijd veroorzaakt worden door veranderingen in de waterstand in combinatie met de modulatie van de getij amplitude. Deze veranderingen komen door een samenspel van astronomische en meteorologische factoren en vinden op verschillende tijdschalen plaats.

Lange termijn (tijdschaal decennia): De droogvaltijd wordt bepaald door (lineaire) zeespiegelstijging in combinatie met de astronomische 18.6-jaar getij cyclus. De zeespiegelstijging van 2.8mm/j in de periode 1989-2024 heeft voor een afname in droogvaltijd gezorgd van 0.1% per jaar (Figuur 6-11, Figuur 6-12). Het is onbekend hoe deze afname binnen nog langere tijdschaal van honderd(en) jaren past en of en hoe het Friesche Zeegat hier op gegeven moment morfodynamisch op reageert. De 18.6-jaar cyclus heeft naast een modulatie van de getijamplituden ook tot een oscillatie in waterstanden geleid (Figuur 6-12). Gezien het intergetijdegebied van het Friesche Zeegat voornamelijk onder NAP ligt, tellen droogvaltijdveranderingen door modulaties van getijamplitude en gemiddeld zeeniveau voornamelijk op (zie Figuur 6-10 midden en onder). Rond 2014 is een omslagpunt waarin de 18.6-jaar cyclus is overgaan naar stijgende waterstanden en dalende getijamplituden. Deze combinatie heeft tot een versterkte afname in droogvaltijd geleid van 2.5% tussen 2014-2024 (zeespiegelstijging: 1.1%, 18.6 jaar cyclus: 1.4%). De monitoringsperiode daarvoor, van 2010-2014 wordt nog gekenmerkt door licht toenemende droogvaltijden als gevolg van de 18.6-jaar cyclus die de zeespiegelstijging tegenwerkt (Figuur 6-11). De afname in droogvaltijd was voor het winterhalfjaar groter dan voor het zomerhalfjaar (Figuur 6-7). Dit is direct te verklaren vanuit de theorie, waarbij de droogvaltijd van een bodempunt sneller afneemt als het dieper onder de waterlijn ligt (Figuur 6-10, boven).

Middellange termijn (tijdschaal jaren): De droogvaltijd wordt bepaald door de meteorologische oost-west windcomponent (Figuur 6-13). De westelijke windcomponent zorgt voor windopzet en de oostelijke windcomponent voor windafzet. Tussen 2014 en 2018 wordt de lange termijn afname in de droogvaltijden gecompenseerd door een middellange termijn toename in droogvaltijd van 3.0 % gedreven door variaties in oost-westelijke wind. Deze middellange termijn toename komt door een combinatie van meer wateropzet in 2015 en waterafzet in 2018. Vanaf 2018 wordt de lange termijn afname in de droogvaltijd versterkt door weer een afname in droogvaltijd van 3.0 % gedreven door variaties in oost-westelijke wind. Deze middellange termijn afname komt door een combinatie van waterafzet rond 2018 en wateropzet rond 2023.

Korte termijn (tijdschaal seizoenen):

De jaarlijkse variatie in waterstanden als gevolg van windopzet(-afzet) door de oost-west windcomponent bepaald korte termijn veranderingen en zorgt voor kortere droogvaltijden in de winter dan in de zomer (Figuur 6-14). De seizoensgebonden variatie in de droogvaltijden is 4.2%. Vooral in de wintermaanden is er daarbovenop nog een 2% variatie in de droogvaltijden van dag tot dag.

Mogelijke consequenties voor het monitoringprogramma.

De afname van droogvaltijden op basis van constante bodemligging zijn vergelijkbaar met de afname van droogvaltijden op basis van tijds-variërende bodemligging (voor LiDAR iets vlakker en voor Vaklodgingen iets steiler). Dat betekent dat veranderingen in de bodemligging volgens de LiDAR en Vaklodgingen data geen bepalende factor zijn voor de waargenomen afname in droogvaltijd. De verandering in waterstanden is verantwoordelijk voor de waargenomen afname in droogvaltijd. Deze afname in droogvaltijd heeft geen consequenties voor het LiDAR monitoringsprogramma dat tot doel heeft om het plaatareaal in het Friesche Zeegat te monitoren. Daarnaast wordt in 2024/2025 de piek bereikt in de waterstandsoscillatie door de 18.6 jaar cyclus. Daarna zal deze 18.6-jaar cyclus de algemene zeespiegelstijging weer gaan tegenwerken en waarschijnlijk tot stagnatie of zelfs lichte afname van de waterstanden lijden, vergelijkbaar met de periode 2004-2014. De komend 10 jaar wordt dan ook een stagnatie of zelfs lichte toename van de droogvaltijden verwacht.

“In hoeverre is de ontwikkeling in bodemligging, de gemeten waterstanden dan wel de combinatie van deze twee aspecten van invloed op de droogvalduur in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag.”

De droogvalduur in het Friesche Zeegat wordt bepaald door veranderingen in waterstand en niet door veranderingen in bodemligging. De combinatie van lange termijn krachten (zeespiegelstijging en astronomische 18.6 jaar cyclus) en middellange termijn krachten (meteorologische oost-west windcomponent) leidt tot relatief constante en zelfs licht toenemende droogvaltijden 2010-2018, waarna er een extreme afname in de droogvaltijd plaatsvindt van bijna 5% (lineair + astronomisch: 1.9%, meteorologisch: 3.0%)

In de periode daarvoor 2004-2014 werd de zeespiegelstijging juist tegengewerkt door de 18.6 jaar cyclus en leidde zo tot een lichte toename in de droogvaltijd. De periode vóór 2004 is weer vergelijkbaar met de afgelopen 10 jaar waarbij de 18.6-jaar cyclus en zeespiegelstijging optelden.

7 Conclusies en aanbevelingen

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

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

Het gerapporteerde plaatareaal van de Zoutkamperlaag is constanter gebleven door de tijd heen dan het plaatareaal van het Pinkegat. Voor het Pinkegat lijkt een licht dalende trend in het signaal te zitten, deze is echter klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge in de gecorrigeerde bodemhoogte. Bovendien is het areaal vrij stabiel voor de recente periode 2016 tot 2024 en de LiDAR opname van 2024 suggereert zelfs een lichte groei.

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

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

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

De afname van de plaathoogte zou van noord naar zuid minder moeten worden als dit een direct gevolg zou zijn van diepe bodemdaling. In het gebied waar de diepe bodemdaling het sterkst is, namelijk op de platen ten zuiden van Ameland-oost op basis van het geodetische bodemdalingsmodel, werd wel een gemiddelde afname van de plaathoogte geconstateerd. De grootste daling van plaatoppervlak wordt echter niet hier waargenomen. Het gebied waar de sterkste bodemdaling verwacht wordt komt dus niet overeen met het gebied waar de sterkste daling in plaathoogte voorkomt. De afname ten zuiden van Ameland-oost is gelijkwaardig aan vergelijkbare gebieden ten zuiden van Schiermonnikoog-west die niet in de bodemdalingskom zitten. Ook plaatveranderingen berekend 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. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen leidt tot veranderingen in plaathoogte die veel groter zijn dan de effecten van bodemdaling. De morfologische dynamiek, en daardoor plaatareaal en -hoogte, wordt vooral gestuurd door een combinatie van hydrodynamische condities, zoals bijvoorbeeld getij, en meteorologische condities.

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

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

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

7.4 In hoeverre is de ontwikkeling in bodemligging, de gemeten waterstanden dan wel de combinatie van deze twee aspecten van invloed op de droogvaltijd in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag?

De droogvaltijden in het Friesche Zeegat worden bepaald door veranderingen in waterstand en niet door veranderingen in bodemligging. Dit heeft geen consequenties voor het LiDAR monitoringsprogramma dat tot doel heeft om het plaatareaal in het Friesche Zeegat te monitoren.

Op tijdschalen van decennia tot seizoenen wordt de droogvaltijd bepaald door veranderingen in waterstand. De waargenomen afname in droogvaltijd gedurende de monitoringsperiode 2010-2024 wordt veroorzaakt door lange termijn (decennia) en middellange termijn (jaren) krachten (respectievelijk getijkrachten en wind) die de waterstand veranderen. Deze veranderingen zijn niet uniek, maar periodiek en zijn in het verleden al eens waargenomen.

Lange termijn veranderingen worden bepaald door zeespiegelstijging en de astronomische 18.6 jaar cyclus. Een lineaire zeespiegelstijging van 2.8 mm/j gaat gepaard met een afname in droogvaltijd van 0.1 %/j. De 18.6 jaar cyclus in waterstanden heeft een range van 6.2 cm. Samen met de modulatie van het getij veroorzaakt dit een range in droogvaltijd van 1.5%. Middellange termijn veranderingen worden bepaald door de meteorologische oost-west windcomponent. Over perioden van 4-6 jaar zorgen stochastische patronen tot waterstandsverschillen van 11 cm die gepaard gaan met droogvaltijdverschillen van 3.0%.

De combinatie van lange en middellange termijn veranderingen leidt tot relatief constante en zelfs licht toenemende droogvaltijden tussen 2010-2018, waarna er een extreme afname in de droogvaltijd plaats vindt van bijna 5% (lineair+astronomisch: 1.9%, meteorologisch: 3.0%) voor de periode 2018-2024.

7.5 Aanbevelingen

Er is de laatste jaren veel gedaan om de kwaliteit van de LiDAR monitoring en analyse van deze gegevens te optimaliseren. De standaarddeviatie van de hoogteverschillen tussen gecorrigeerde LiDAR resultaten en Ground Control Point grids ligt in de orde van 1-2 cm. Daarmee kunnen de LiDAR data na correctie als relatief nauwkeurig bestempeld worden.

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

Er zijn significante relaties gevonden tussen veranderingen in plaatareaal en sterke westelijke wind. Door aanvulling van beschikbare golfmetingen met *hindcasts*, wordt de grens van significantie in de correlatie met plaatareaal verlaagd, echter laat het meetjaar 2024 zien dat fluctuaties nog tot (tijdelijke) overschrijding van deze significantie grens kunnen leiden. We bevelen aan om deze relaties daarom verder te onderzoeken. Met toekomstige LiDAR metingen zullen ook de golfmeetreeksen langer zijn geworden, waardoor structurele correlaties tussen golfcondities en veranderingen in plaatareaal kunnen uitkristalliseren.

Dit helpt om de verschillende oorzaken voor bodemveranderingen verder te kwantificeren en van elkaar te scheiden.

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 (2024). "Aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over monitoringsjaar 2023." Projectnummer: 3853. Commissie voor MilieuEffectRapportage, Utrecht, Nederland.

Dillingh, D., (2013). "Kenmerkende waarden kustwateren en grote rivieren". In opdracht van RWS, WVL. Rapport: 1207509-000-ZKS-0010. Delft, Nederland.

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

Elias, E., Oost, A. (2021). "Morfologische processen van het Friesche Zeegat: Een conceptueel model." Deltares rapport 11205236-003. Delft, Nederland.

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

Gawehn, M. (2024). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2023)". Deltares rapport 11206685-006-ZKS-0001_v1.2. Delft, Nederland.

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). "Kombergingsrapport Friesche Zeegat - Pinkegat en Zoutkamperlaag". Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0002. Delft, Nederland.

Sovon (2024). "Monitoring van het voor vogels oogstbare voedselaanbod in de kombergingen van het Pinkegat en Zoutkamperlaag". Sovon-rapport 2024/16, Sovon Vogelonderzoek, Nijmegen, 2024

Taal, M. (2023, Nov. 30). "Zeespiegel Nederlandse kust verder gestegen in 2022". Deltares.
<https://www.deltares.nl/expertise/onze-expertises/zeespiegelstijging/zeespiegelmonitor>

Terratec AS. (2024). "Waddenzee – LiDAR acquisition for 2024". 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 <i>Fugro Geospatial B.V. (2010)</i>	FLI-MAP 1000	25-03-2010 26-03-2010 28-03-2010	09:00 10:33 13:02	11:03 (*) 12:26 (*) 14:36 (*)	Noord Zuid Midden	Helder weer Bewolking en neerslag Wisselend bewolkt	Tijdsinformatie van bijgevoegde <i>FlightLineRelation.xlsx</i> Vlieghoogte 500 m AGL
2011 (voorjaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2011)</i>	FLI-MAP 1000	14-04-2011 15-04-2011 16-04-2011	10:00 10:50 11:50	12:20 13:20 13:00	Noord Midden Zuid	Bewolkt Heldere hemel Nevel	Tijdsinformatie uit H6.5 (benaderd) Vlieghoogte 500 m AGL
2011 (najaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2011a)</i>	FLI-MAP 1000	24-9-2011 25-9-2011 26-9-2011 27-9-2011	13:20 14:00 15:00 16:20	15:00 16:20 16:50 17:00	Noord Zuid Midden Midden (extra)	Heldere hemel Heldere hemel Bewolkt Bewolkt	Tijdsinformatie uit: <i>11871-002 tidal data.xls</i> Vlieghoogte 500 m AGL
2012 (najaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2012)</i>	FLI-MAP 1000	15-10-2012 16-10-2012 26-10-2012	15:15 16:30 13:10	18:15 17:45 16:10	Noord, zuid (2) Midden (1), zuid (1) Zuid	Lichte bewolking Bewolkt, survey gestopt Bewolkt	Periode van 10 dagen tussen opnamen Vlieghoogte 500 m AGL
2013 (najaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2013)</i>	Riegl Q680i	18-10-2013 19-10-2013 20-10-2013	14:50 15:40 17:00	18:20 18:30 18:10	Noord Midden Zuid	Heldere hemel Heldere hemel Heldere hemel	Vlieghoogte 440 m AGL
2014 (voorjaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2014a)</i>	Riegl Q680i	13-05-2014 14-05-2014 15-05-2014	15:20 15:20 15:50	16:50 18:10 17:30	Noord Midden Zuid	Licht bewolkt Licht bewolkt Heldere hemel	Cross-lines gedeeltelijk gevlogen buiten getijvenster Vlieghoogte 440 m AGL

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

LiDAR referentie	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
				Start	Eind			
2019 (voorjaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	15-05-2019	10:30	13:08	1-23	Bevredigend	Vlieghoogte 1500 m AGL
2019 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	07-10-2019	07:38	10:01	1-23	Bevredigend	Vlieghoogte 1500 m AGL
2020 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	02-10-2020	16:24	18:42	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2021 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	06-09-2021	15:54	18:12	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2022 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	18-07-2022	06:05	08:38	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2023 (voorjaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560 II-S	03-06-2023	14:11	16:47	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL
2024 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560 II-S	05-09-2024	16:37	19:05	1-18	Bevredigend	Vlieghoogte 1750m AGL

**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

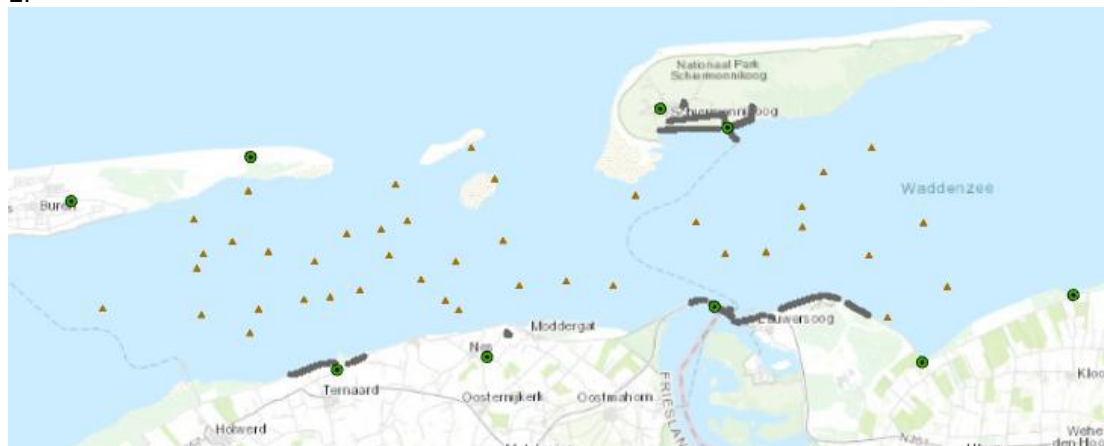
In de 2025 LiDAR analyse van de surveys tot en met 2024 zijn de surveys wederom gecorrigeerd met een lineair correctievlak ten opzichte van een referentie survey (de acquisitie in het voorjaar van 2019). De correctie parameters zijn integraal geschat op basis van harde topografie, de sediment grids, en de Ground Control Point grids.

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

B.1 Meetpunten voor de berekening van correctie parameters

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

De meetpunten voor de berekening van de correctie parameters worden getoond in Figuur 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 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, 2024) 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 afwijking op GCP-9 is iets groter (4.3 cm) dan die van de overige GCP grids. GCP-9 ligt in een gebied waar nauwelijks bodemdaling door gaswinning plaatsvindt (buiten de 1 cm contour; het is het meest oostelijke grid in Figuur B-1) en daardoor zijn de hoogtes de afgelopen jaren slechts met enkele millimeters aangepast. Ook de 2023 NAP hoogtes (bepaald door Rijkswaterstaat) van nabijgelegen peilmerken verschillen ca. 5 mm en minder van de 2018 hoogtes. Het is dan ook waarschijnlijk dat de wat hogere gemiddelde afwijking op GCP-9 aan de nauwkeurigheid van de LiDAR techniek ligt.

Control Surface	Average dZ (m)	Minimum dZ (m)	Maximum dZ (m)	Average magnitude (m)	RMS	Std. Dev
GCP - 1	-0.012	-0.029	0.002	0.012	0.015	0.008
GCP - 2	-0.003	-0.015	0.006	0.005	0.007	0.006
GCP - 3	-0.001	-0.036	0.033	0.008	0.012	0.012
GCP - 4	0.014	-0.020	0.055	0.020	0.024	0.020
GCP - 5	0.011	-0.010	0.039	0.013	0.016	0.012
GCP - 6	-0.011	-0.026	0.003	0.012	0.013	0.007
GCP - 7	-0.019	-0.044	-0.002	0.019	0.021	0.010
GCP - 8	0.020	-0.033	0.060	0.023	0.029	0.021
GCP - 9	0.043	0.009	0.072	0.043	0.046	0.016

Tabel B-1: Vergelijking hoogtes LiDAR puntenwolk met Ground Control Point grids (uit Field, 2024).

B.1.2 Harde topografie punten

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

B.1.3 Sediment grids

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

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

B.2 Correctie parameters

De correctie parameters zijn voor de monitoringscyclus 2024 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.

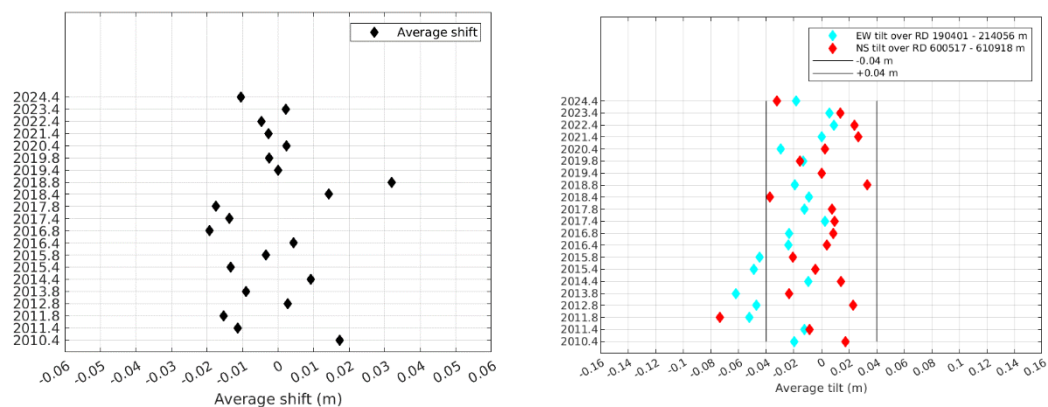
De correctie parameters (zie Tabel B-2) zijn bepaald op basis van de Deltares grids met 1 meter resolutie. Door middel van kleinste kwadraten schatting zijn de correctie parameters uit de hoogteverschillen van de harde topografie punten (inclusief extra ground control point clusters), de sediment grids 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.

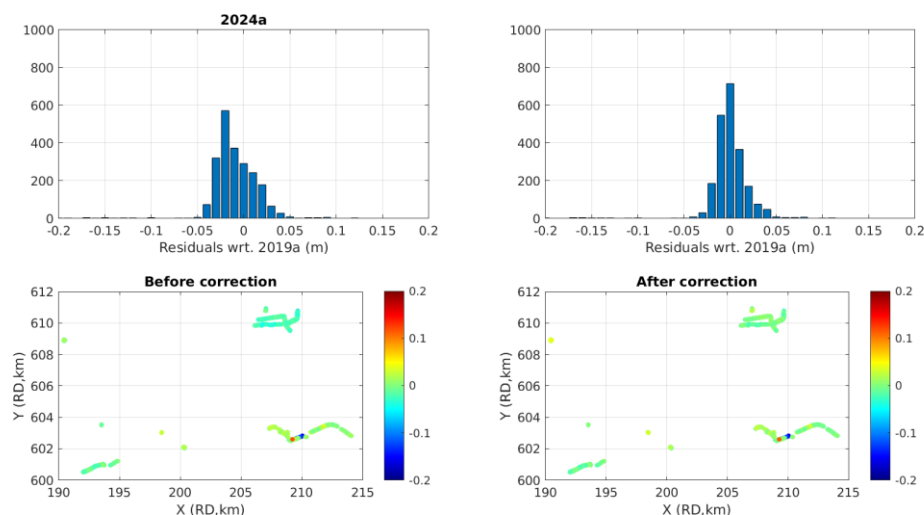
survey	a	b	c
2010a	0.0008	0.0017	-1.1762
2011a	0.0005	-0.0008	0.3755
2011b	0.0022	-0.0071	3.8258
2012b	0.0020	0.0022	-1.7341
2013b	0.0026	-0.0022	0.8208
2014a	0.0004	0.0013	-0.8841
2015a	0.0021	-0.0004	-0.1760
2015b	0.0019	-0.0020	0.8091
2016a	0.0010	0.0004	-0.4234
2016b	0.0010	0.0008	-0.7277
2017a	-0.0001	0.0009	-0.5458
2017b	0.0005	0.0008	-0.5752
2018a	0.0004	-0.0036	2.1234
2018b	0.0008	0.0032	-2.0734
2019a	0.0000	0.0000	0.0000
2019b	0.0006	-0.0015	0.8004
2020a	0.0013	0.0002	-0.3920
2021a	0.0000	0.0026	-1.5484
2022a	-0.0004	0.0023	-1.3126
2023a	-0.0002	0.0013	-0.7424
2024a	0.0008	-0.0031	1.7218

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 2024 survey voor en na toepassing van de correctie parameters.



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 2024a ten opzichte van 2019a, voor (links) en na (rechts) correctie. In de berekening van de correctie parameters zijn uitschieters verwijderd.

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 in de initiële selectie harde topografie punten waarvan de hoogte in een enkele LiDAR opname meer dan 5 centimeter afwijkt van de mediane waarde, of

waarvan de absolute residuen over alle opnames meer dan 2 centimeter afwijken, verwijderd. Deze selectie is de afgelopen jaren ongewijzigd gelaten. In de berekening van de correctie parameters worden aanvullend uitschieters gedetecteerd en verwijderd. De harde topografie punten zijn ruim in de meerderheid ten opzichte van de GCP en sediment grid punten, waardoor de percentielen in Tabel B-3 relatief laag uitvallen.

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

survey_corr	std(cm)	left_25%(cm)	right_75%(cm)	left_2.5%(cm)	right_97.5%(cm)
2010a	2.4	-1.6	1.4	-4.4	5.4
2011a	2.5	-1.6	1.7	-4.9	4.5
2011b	2.3	-1.4	1.4	-4.7	4.1
2012b	2.6	-1.3	1.6	-5.9	4.1
2013b	1.7	-1.1	1.1	-3.5	3.2
2014a	2	-1.4	1.2	-3.5	4
2015a	1.7	-0.8	0.7	-3	2.8
2015b	1.9	-1.3	1.4	-3.8	3.6
2016a	2.5	-1.1	0.7	-3.9	4.2
2016b	2.3	-1.4	1.5	-4.4	5
2017a	1.6	-0.9	0.8	-3.1	4
2017b	1.2	-0.7	0.7	-2.2	2.6
2018a	1.8	-1.1	0.9	-3	4
2018b	1.2	-0.9	0.8	-2.1	2.3
2019a	0	0	0	0	0
2019b	1.2	-0.6	0.7	-2.2	2.4
2020a	1.5	-1	0.9	-2.8	3.2
2021a	1.4	-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
2024a	2.1	-0.8	0.8	-2.6	3.8

B.3 Referenties

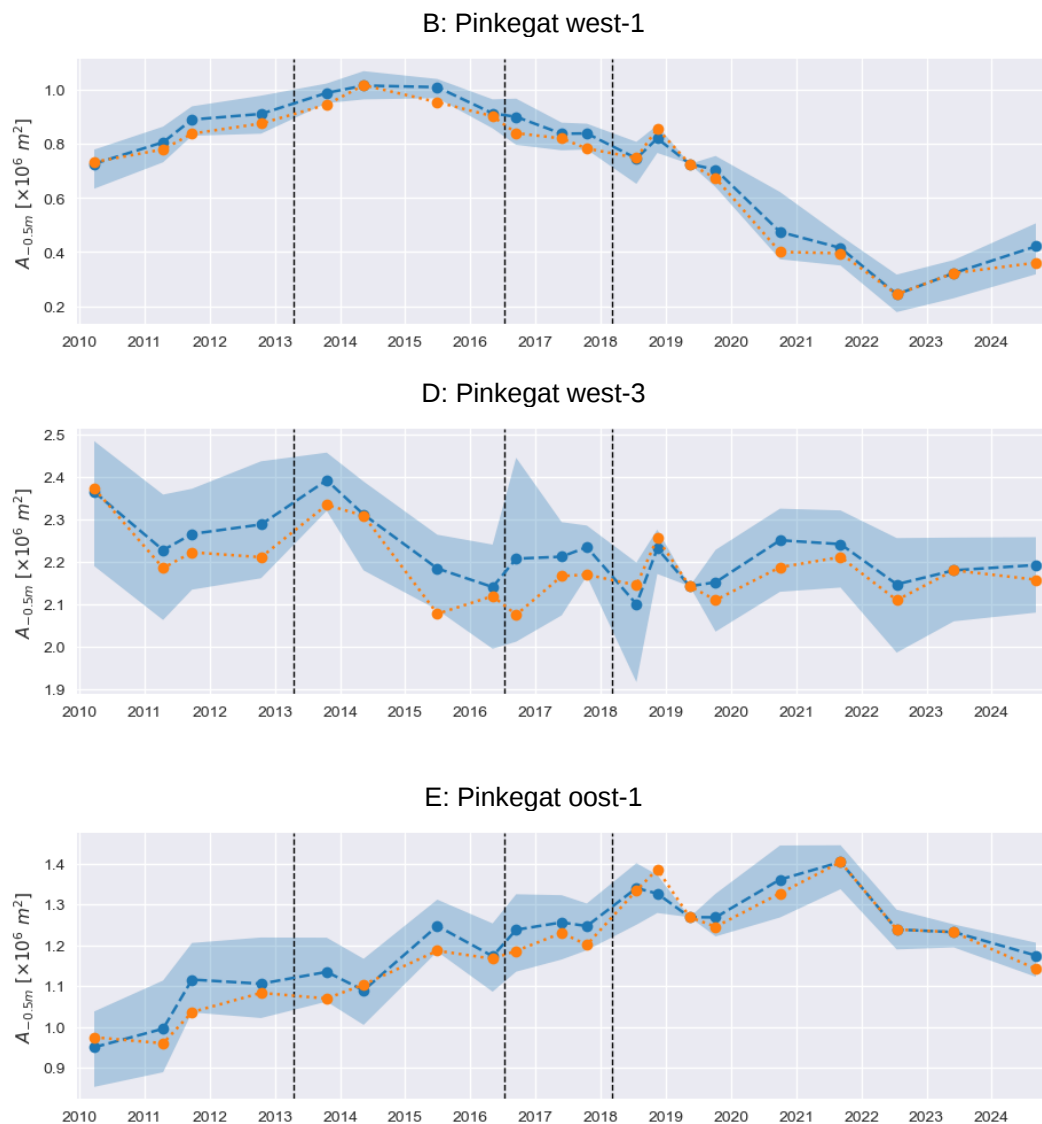
van der Lugt, M., Visser, M., Ketelaar, G. (2020). "Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019)". Deltares rapport 11203620-002-ZKS-0006. Delft, Nederland.

Field (2024) Project report '43000 – Waddenzee; LiDAR acquisition for 2024'.

C Deelgebied veranderingen

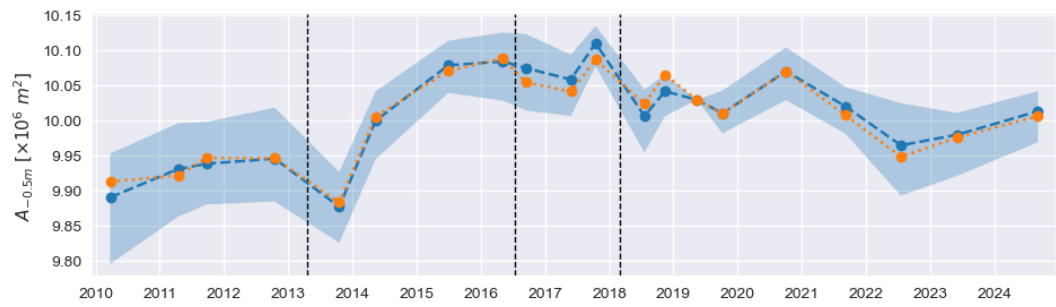
Auteur: Matthijs Gawehn (Deltares)

C.1 Tijdsreeksen deelgebieden

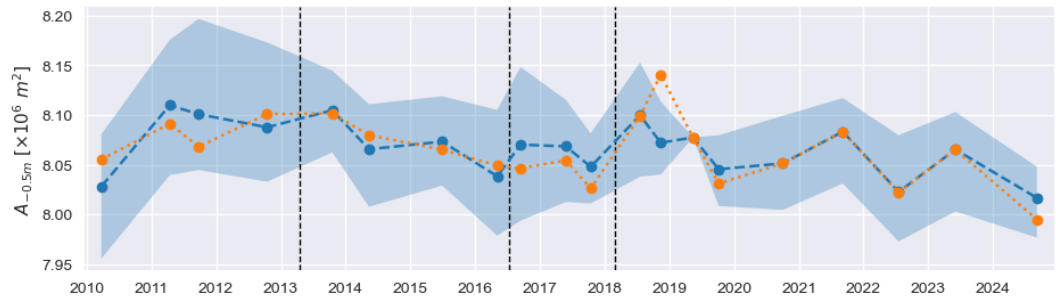


Figuur C-1 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor platen in het Pinkegat (B,D,E in Figuur 3-3). De oranje reeks (---●---) toont de originele data en de blauwe reeks (---●---) de gecorrigeerde dataset. De blauwe onzekerheidsbanden tonen de 95% onzekerheidsmarge van de correctie. De verticale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

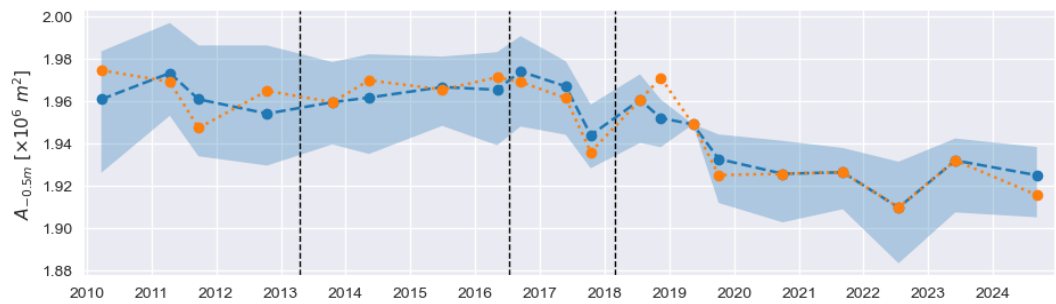
J: Eilanderbult



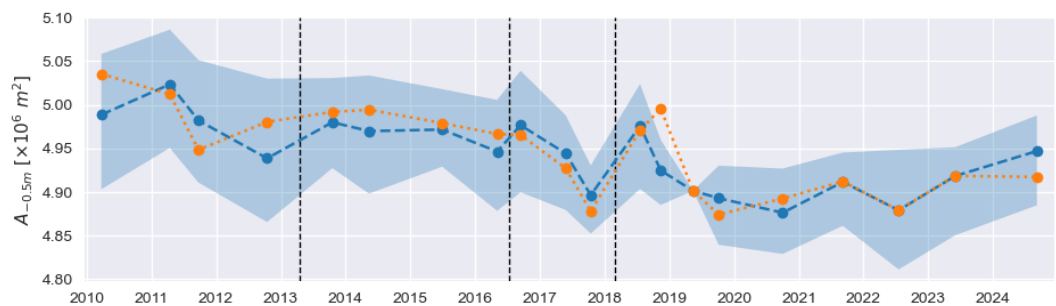
K: Schiermonnikoog zuid-1



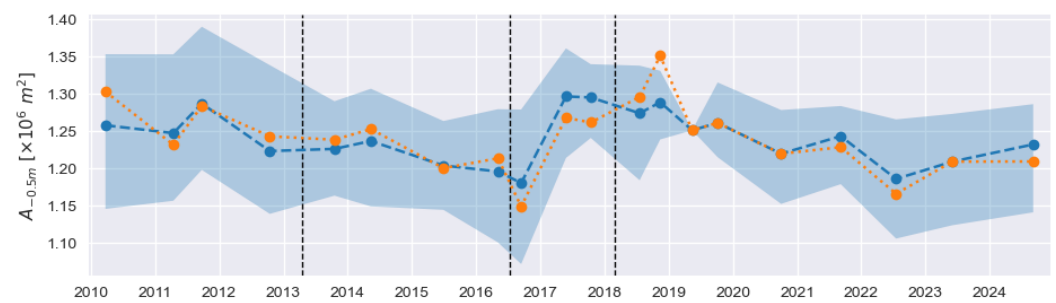
L: Schiermonnikoog zuid-2



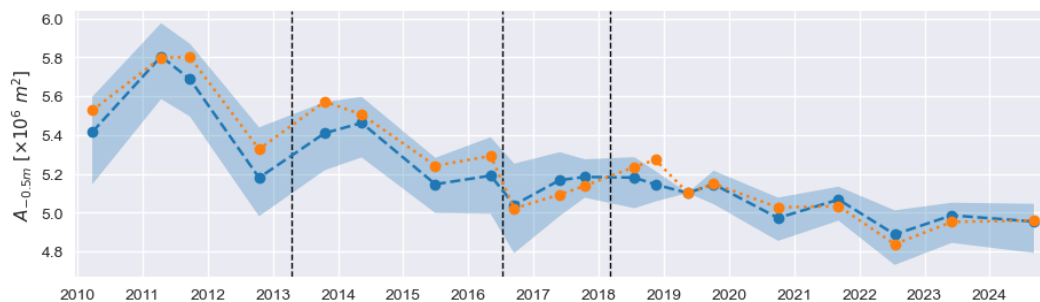
M: Schiermonnikoog zuid-3



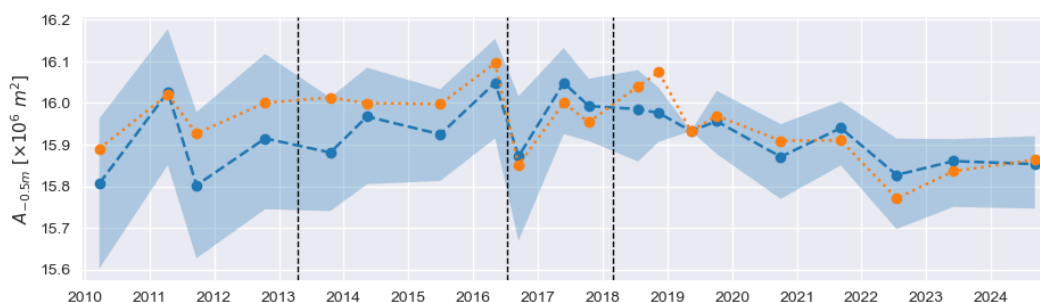
O: Roode Hoofd



Q: Zoutkamperlaag zuidoost-1



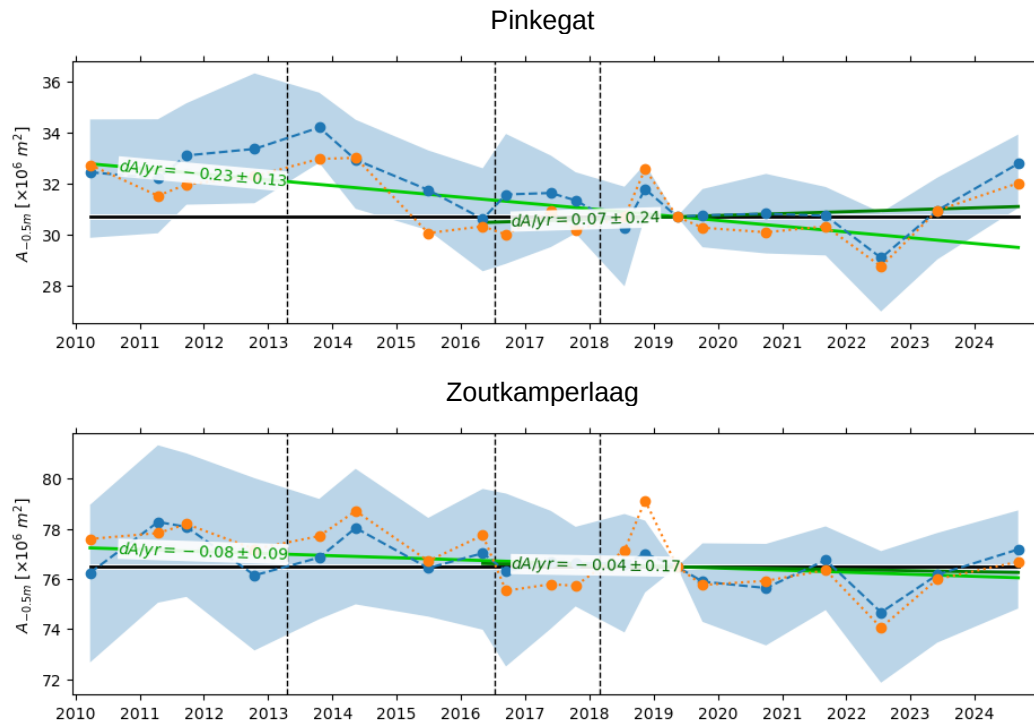
R: Zoutkamperlaag zuidoost-2



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 $w_j = 1/(A_{j,97.5\text{pct}} - A_{j,2.5\text{pct}})$, waarbij A het plaatoppervlak is van LiDAR meting j), om ervoor te zorgen dat metingen met grote onzekerheid minder invloed hebben op de regressielijn dan punten met een kleine onzekerheid.



Figuur 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.

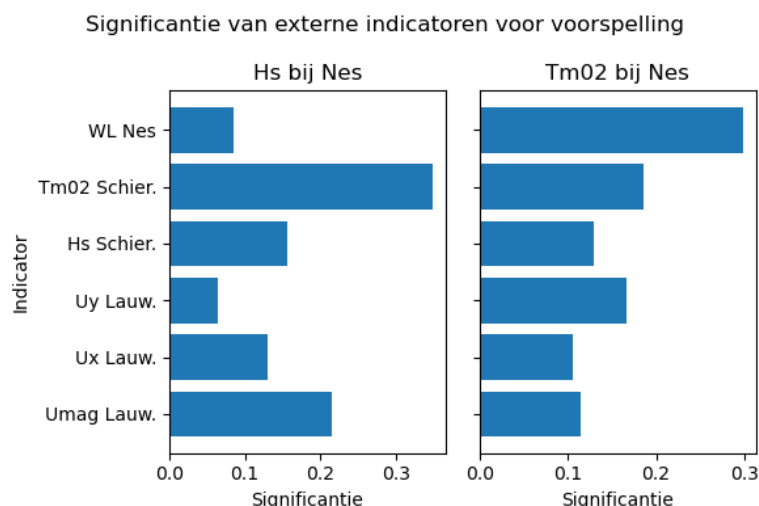
Bekijkt men opeenvolgende LiDAR metingen van plaatareaal voor het Pinkegat, lijkt er een dalende trend in het signaal te zitten van -0.23 km^2 per jaar voor de periode tussen 2010 en 2024. Daarbij wordt aangenomen dat de plaatveranderingen gedurende deze periode lineair zijn verlopen. Deze trend is echter niet constant en dat wordt duidelijk als men naar de lineaire ontwikkelingen over de recente periode 2016 tot 2024 kijkt, want gedurende deze 8 jaar is het plaatareaal in het Pinkegat vrij stabiel: de lineaire ontwikkelingen zijn klein ($+0.07 \text{ km}^2$ per jaar) en insignificant ten opzichte van de bijbehorende onzekerheid ($\pm 0.24 \text{ km}^2$ 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 2016-2024 ook de lineaire ontwikkeling klein is (-0.04 km^2 per jaar) en de bijbehorende onzekerheid relatief groot ($\pm 0.17 \text{ km}^2$ per jaar). In de Zoutkamperlaag zien we voor de gehele periode 2010-2024 maar weinig verandering van plaatareaal volgens de lineaire trend (-0.08 km^2 per jaar).

D Random Forest Modellen

Auteur: Matthijs Gawehn (Deltares)

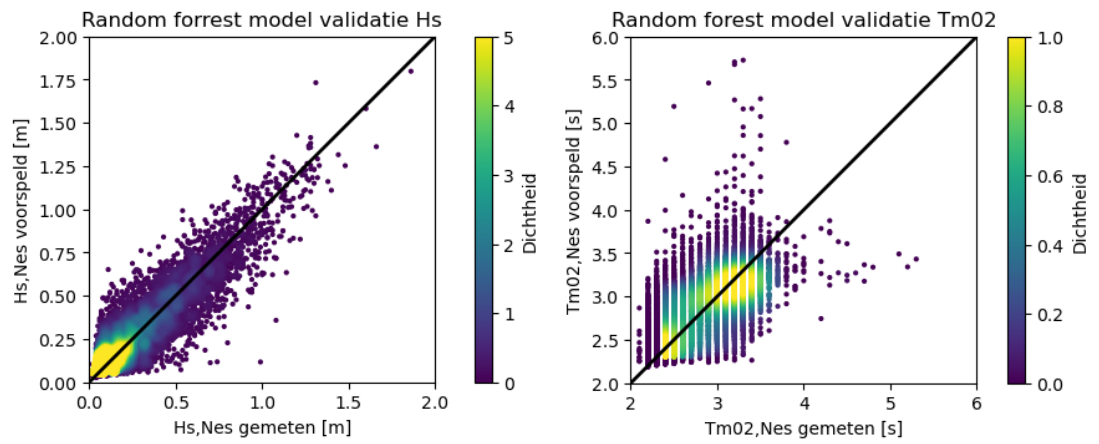
D.1 Validatie

Om de RF modellen te kunnen valideren, zijn de beschikbare golfddata bij Nes voor de periode 2019-2024 opgesplitst in 80% trainingsdata en 20% validatie data. De trainingsdataset is zodanig bemonsterd dat hij relatief meer hoge waarden bevat omdat het van belang is dat de voorspellingen van de RF modellen vooral goed zijn op tijdstippen dat de golven hoog zijn en/of lange golfperiodes hebben (voor details zie Gawehn, 2023).

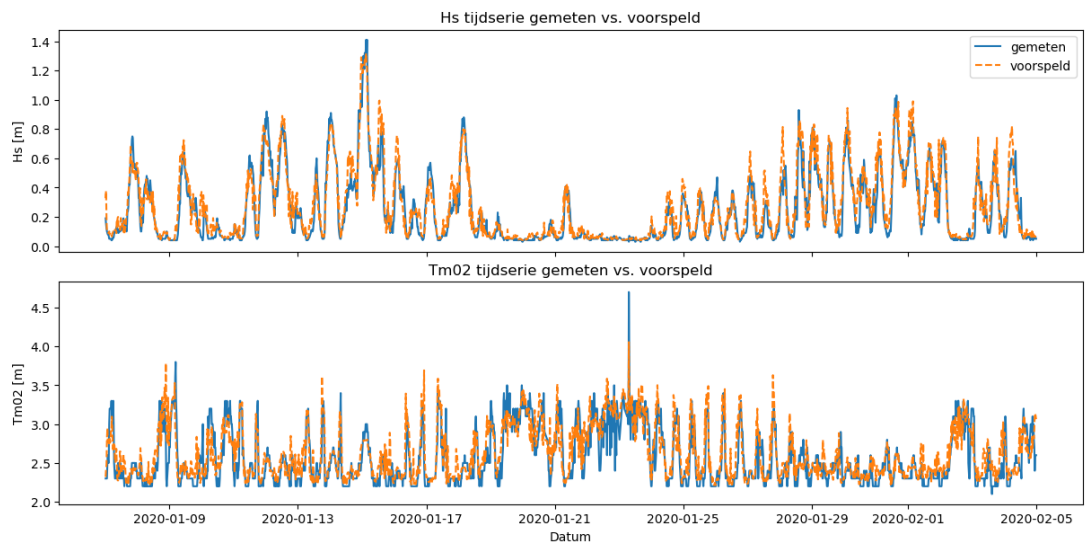


Figuur D-1 Significantie van externe indicatoren voor voorspelling van de golfhoogte (Hs) en golfperiode (Tm02) bij Nes met behulp van Random Forest modellen. De externe indicatoren zijn tijdseries van waterstanden bij Nes, golfhoogtes en golfperiodes bij de veerhaven Schiermonnikoog, noord-zuid en oost-west wind componenten en windmagnitude bij Lauwersoog.

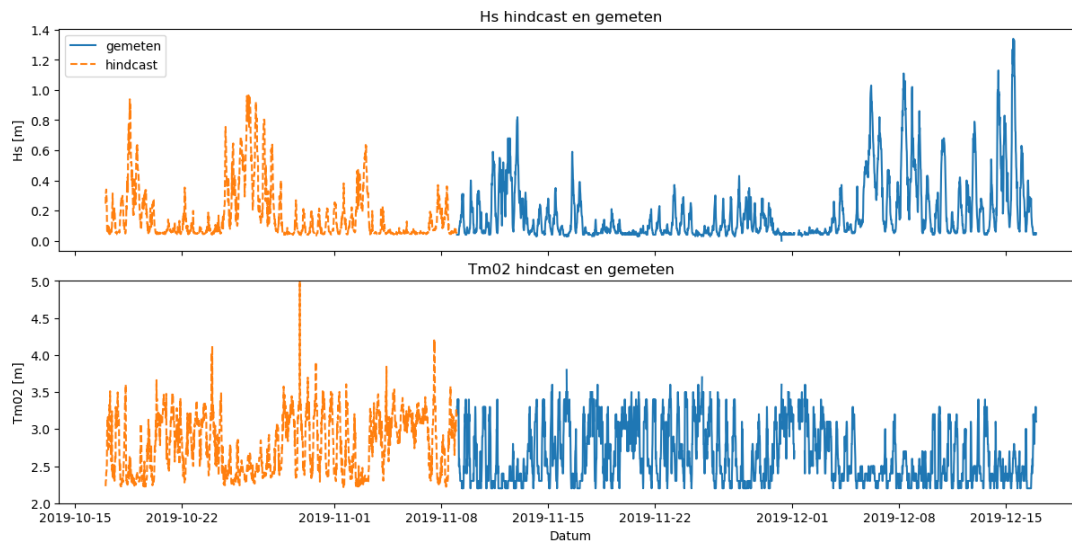
Voor de getrainde RF modellen is onderzocht welke externe indicatoren het meest belangrijk waren om een voorspelling te maken van golfhoogte en golfperiode bij Nes (Figuur D-1). Voor de voorspelling van golfhoogte bij Nes zijn met name golfperiodes van Schiermonnikoog en de windsnelheid van belang. De windrichting lijkt hier minder van belang voor de voorspellingskracht. Vergeleken met Gawehn (2024) is de voorspellende kracht van golfhoogtes bij Schiermonnikoog afgenomen. Het is mogelijk dat RF modellen andere verhoudingen tussen de indicatoren gaan kiezen naar mate er meer golfinformatie bij Nes beschikbaar komt om de RF modellen te trainen. Voor de voorspelling van golfperiodes bij Nes blijkt waterstandsinformatie ter plekke de meest cruciale informatiebron te zijn. Dit kan worden verklaard uit het feit dat golven sterk worden beïnvloed door de lokale waterdiepte. De voorspellende kracht van andere indicatoren is vrij gelijkmatig verdeeld.



Figuur D-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.



Figuur D-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 Lauweroog, waterstandsinformatie bij Nes en golfinformatie van een station bij Schiermonnikoog.



Figuur D-4 Begin van de hindcasts (oranje) aansluitend op de metingen (blauw) voor de golfhoogte (H_s) en golfperiode (T_{m02}) bij Nes.

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