Deltares

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021)



Helena van der Vegt, Marlies van der Lugt

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021)

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

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	28-04-2022
Projectnummer	11206685-004
Document ID	11206685-004-ZKS-0003
Pagina's	87
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Helena van der Vegt HJ	Zheng Bing Wang	Paul Saage	
	Manies van der Lugt		Hoogendoorn)	

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 continu 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 de Auditcommissie Monitoring Waddengas.

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 2021.

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

<u>1. Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?</u> De ontwikkeling van de wadplaten in de deelgebieden van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag, laat grote variaties zien. Op de geaggregeerde schaal van een kombergingsgebied heffen deze variaties in oppervlak en hoogte elkaar op en is de conclusie dat de ontwikkeling van het totale plaatareaal en de plaathoogte binnen de onzekerheidsmarge van de LiDAR metingen vallen. Daarmee laten de LiDAR data geen effecten van bodemdaling zien.

2. Wat zijn de verschillen tussen de waargenomen/gemeten morfologische veranderingen en de veranderingen die opgetreden zouden moeten zijn als gevolg van de gemeten diepe bodemdaling?

In zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag zijn de gemeten veranderingen in plaatareaal, plaathoogte en totaal watervolume groter dan de berekende waarden die op basis van het geodetische bodemdalingsmodel verwacht zouden mogen worden. Hieruit volgt dat morfodynamische processen dominant lijken bij de ontwikkeling van de wadplaten in deze kombergingsgebieden onder de huidige omstandigheden en bij de huidige mate van bodemdaling.

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

Op de schaal van deelgebieden binnen de kombergingsgebieden zijn veranderingen in morfologie waar te nemen. Als deze veranderingen een direct gevolg zouden zijn van diepe bodemdaling, dan zouden zij het grootst moeten zijn in het gebied waar de meeste diepe bodemdaling optreedt, ten zuiden van Ameland-oost op basis van het geodetische bodemdalingsmodel. Hoewel op deze locatie een gemiddelde afname van de plaathoogte is geconstateerd, is de grootste afname van plaatoppervlak niet hier waargenomen. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen en de daarbij behorende sedimenttransporten, leiden tot veranderingen in plaathoogte die het effect van bodemdaling op lokale schaal

kunnen versluieren. Een eenduidig bodemdalingssignaal in de morfologische ontwikkelingen komt niet naar voren uit de LiDAR dataset.

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

Stormachtige condities in de drie maanden voorafgaand aan een LiDAR opname leiden tot een afname in plaatareaal in het Pinkegat. Deze relatie vinden we niet voor de Zoutkamperlaag. De reden waarom deze twee kombergingsgebieden anders reageren op stormachtigheid is onduidelijk. De overige onderzochte intervallen correleren niet met het plaatgedrag in de kombergingsgebieden.

Aanbevelingen

De laatste jaren is er veel gedaan om de kwaliteit van de LiDAR monitoring en analyse van deze gegevens te optimaliseren. In 2022 werd door NAM een derde iteratie uitgevoerd op de methodiek waarmee de referentievlakcorrectie wordt bepaald. Het is aan te bevelen om deze referentievlakcorrectie, met 2019a als referentiejaar, toe te voegen aan de standaardprocedure. De relatieve correcties van de Ground Control Point grids ten tijde van de LiDAR opnames kunnen op basis van satelliet radar interferometrie (InSAR) data bepaald worden.

Er zijn geen causale relaties gevonden tussen het plaatareaal en de condities tijdens de inwinning. Door de toepassing van een correctie is de interpretatie van de LiDAR data eenduidiger geworden en is analyse van meteorologische condities tijdens inwinning niet meer nodig. We bevelen daarom aan deze analyse in de toekomst niet meer uit te voeren.

Verder is het van belang dat bij iedere rapportage de nieuwste inzichten in de morfologische ontwikkelingen in het Friesche Zeegat mee te nemen in de interpretatie van de LiDAR metingen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat	8
1.1 1.1.1 1.1.2	Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2020 Status kennis morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat	9 9 10
1.2	Aanbevelingen Auditcommissie 2021	10
1.3	Onderzoeksvragen	11
1.4	Aanpak en leeswijzer	11
2	Verwerken van LiDAR data	12
2.1	Beschrijving opnamen 2021	12
2.2 2.2.1 2.2.2 2.2.3	Opwerkingsprotocol LiDAR opwerking Correctie systematische afwijking Data overzicht	13 13 13 17
3	Analyse areaalontwikkeling	19
3.1	Kombergingsgebieden	19
3.2 3.2.1 3.2.2 3.2.3	Individuele platen Pinkegat kombergingsgebied (A – F) Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G-H) Zoutkamperlaag (I-R)	20 21 22 23
3.3	Langetermijntrends	25
3.4	Conclusies areaalontwikkeling	29
4	Analyse ontwikkeling plaathoogte	31
4.1	Hypsometrie kombergingsgebieden	31
4.2	Hypsometrie individuele platen	32
4.3	Tijdsgemiddelde ontwikkeling	39
4.4	Profielen	40
4.5	Conclusies plaathoogte ontwikkeling	43
5	Vergelijking LiDAR metingen en geodetisch bodemdalingsmodel	44
5.1 5.1.1 5.1.2	Areaalontwikkeling Kombergingsgebieden Deelgebieden	45 45 46
5.2 5.2.1 5.2.2	Ontwikkeling plaathoogte Kombergingsgebieden Deelgebieden	50 51 52

5.3	Volumetrische analyse	58
5.4	Conclusies vergelijking LiDAR metingen met berekeningen op basis van geodetische bodemdalingsmodel	59
6	Invloed hydrodynamische en meteorologische condities	60
6.1	Invloed condities tijdens inwinning	60
6.2	Invloed stormachtigheid tussen opnamen	62
6.3	Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities	64
7	Conclusies en aanbevelingen	65
7.1	Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?	65
7.1	Wat zijn de verschillen tussen de waargenomen/gemeten morfologische veranderingen en de veranderingen die opgetreden zouden moeten zijn als gevolg van de gemeten diepe bodemdaling?	65
7.2	In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?	65
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?	66
7.4	Aanbevelingen	66
8	Referenties	68
Α		70
	Overzicht vluchtgegevens	10
В	Overzicht vluchtgegevens NAM rapportage datareeks correctie	73
B B.1	NAM rapportage datareeks correctie Samenvatting	73
B B.1 B.2	Overzicht vluchtgegevens NAM rapportage datareeks correctie Samenvatting Introductie	73 73 73
B B.1 B.2 B.3 B.3.1 B.3.2 B.3.3	Overzicht vluchtgegevens NAM rapportage datareeks correctie Samenvatting Introductie Ground Control Point grids en de inzet van InSAR Waterpassingen Ground Control Point grids InSAR metingen Mogelijkheden voor uitbreiding Ground Control Points	73 73 73 74 74 74 74 77
B B.1 B.2 B.3 B.3.1 B.3.2 B.3.3 B.4	Overzicht vluchtgegevens NAM rapportage datareeks correctie Samenvatting Introductie Ground Control Point grids en de inzet van InSAR Waterpassingen Ground Control Point grids InSAR metingen Mogelijkheden voor uitbreiding Ground Control Points Harde topografie hoogtes	73 73 73 74 74 74 74 77 78
B B.1 B.2 B.3 B.3.1 B.3.2 B.3.3 B.4 B.5	Overzicht vluchtgegevens NAM rapportage datareeks correctie Samenvatting Introductie Ground Control Point grids en de inzet van InSAR Waterpassingen Ground Control Point grids InSAR metingen Mogelijkheden voor uitbreiding Ground Control Points Harde topografie hoogtes Keuze referentie survey	73 73 73 74 74 74 74 77 78 79
B B.1 B.2 B.3 B.3.1 B.3.2 B.3.3 B.4 B.5 B.6	Overzicht vluchtgegevens NAM rapportage datareeks correctie Samenvatting Introductie Ground Control Point grids en de inzet van InSAR Waterpassingen Ground Control Point grids InSAR metingen Mogelijkheden voor uitbreiding Ground Control Points Harde topografie hoogtes Keuze referentie survey Berekening correctie parameters	73 73 73 74 74 74 74 77 78 79 81

Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat

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



Figuur 1-1 Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2020) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling van 2019 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2019). De punten met label in de Waddenzee representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2019. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GNSS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2021 (NAM, 2021).

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 2021. Leidend in deze rapportage is de vraag of de morfologie van de wadplaten gevolgen ondervindt van de diepe bodemdaling door gaswinning.

De morfologische analyse is gebaseerd op de hoogteontwikkeling van het droogvallend wad in het Friesche Zeegat. Deze ontwikkeling wordt afgeleid uit een reeks LiDAR opnamen van het gebied die sinds 2010 één- tot tweemaal per jaar worden ingewonnen. Sinds het vorige

Deltares

1

rapport (van der Vegt & van der Lugt, 2021) is één nieuwe opname uit oktober 2021 toegevoegd aan deze dataset.

1.1 Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat

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



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

1.1.1 Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2020

Van der Vegt en Van der Lugt (2021) constateerden dat over de meetperiode 2010-2020 zowel in het kombergingsgebied Pinkegat als in de Zoutkamperlaag de veranderingen in plaatareaal binnen de foutmarge van de metingen bleven. Daarmee liet de LiDAR data geen effecten van bodemdaling zien. Op de schaal van deelgebieden binnen de kombergingsgebieden zijn morfologische veranderingen groter dan de foutmarge van de metingen waargenomen. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen en het daarbij behorende sedimenttransport leiden tot veranderingen in plaathoogte die het effect van bodemdaling op lokale schaal kunnen versluieren. Een eenduidig bodemdalingssignaal in de morfologie kwam niet naar voren uit de LiDAR dataset.

Om opeenvolgende LiDAR metingen nauwkeuriger met elkaar te kunnen vergelijken, is er de afgelopen jaren een correctiemethode ontwikkeld om systematische fouten weg te filteren aan de hand van de metingen op harde oppervlakten waarvan de hoogtes bekend zijn (van

der Lugt et al., 2019; van der Lugt et al., 2020a; van der Vegt & van der Lugt, 2021). Door toepassing van de correctie zijn de meetfouten gereduceerd, wat er toe heeft geleid dat de geconstateerde areaalveranderingen beter te interpreteren zijn.

1.1.2 Status kennis morfologische ontwikkeling van het Friesche Zeegat

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

Geuldynamiek beïnvloedt de ontwikkeling van platen in een kombergingsgebied. Zo leidt de intensieve verplaatsing van geulen in het Pinkegat tot jongere platen die meer variëren in positie en hoogte. Bij geulmigratie is de nieuw gegenereerde plaat achter de geul lager dan de geërodeerde, oorspronkelijke plaat. Dit is terug te zien in de hoogte van de platen in het Pinkegat die gemiddeld lager zijn dan de platen in het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag. Daar is de positie en hoogte van de platen veel stabieler. 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 Auditcommissie 2021

Deze paragraaf refereert naar advies van de Auditcommissie (Commissie mer) over de 2020 jaarrapportages "Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen" van 16 November 2021 (Commissie mer, 2021a).

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.

Een aantal aanbevelingen van de commissie heeft betrekking op het optimaliseren van de LiDAR datasets. De Auditcommissie adviseert verdere optimalisatie van de referentievlakcorrectie, door het aantal GCP's uit te breiden en de hoogte ervan goed te monitoren. De Auditcommissie onderschrijft ook het advies in Van der Vegt en Van der Lugt (2021) om de GCP's die niet in 2020 opnieuw zijn ingemeten alsnog in te meten. Omwille van de vergelijkbaarheid van de opnamen en de nauwkeurigheid acht de Auditcommissie het wenselijk om de vlieghoogte niet verder aan te passen.

De Auditcommissie adviseert ook een aantal nieuwe analyses, zoals een nadere volumetrische analyse van de ontwikkeling van de theoretisch te verwachten bodemdalingsschotel versus de werkelijk geobserveerde morfologische ontwikkeling in het

Deltares

10 van 87

desbetreffende deel van het kombergingsgebied. Het doel van deze analyse is inzichtelijk maken van het volume sediment dat gemoeid is met de theoretisch en maximaal te verwachten bodemdalingsschotel aan het oppervlak, ervan uitgaande dat de diepe bodemdaling zich 1 op 1 vertaalt naar de ligging van het oppervlak. Dit getal kan worden vergeleken met de werkelijk aan- of afgevoerde hoeveelheid sediment in het dalingsgebied.

Ook werd aangegeven dan "In het Monitoringprogramma Waddenwinningen 2020-2026 wordt voorgesteld de metingen terug te brengen van tweemaal naar eenmaal per jaar" en dat Auditcommissie zich kan "vinden in het voorstel met dien verstande dat dit wel impliceert dat de thans bereikte nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de metingen behouden blijft" (Commissie mer, 2021b).

1.3 Onderzoeksvragen

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

Om deze vraag te beantwoorden behandelen we vier onderzoeksvragen:

- 1. Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?
- 2. Wat zijn de verschillen tussen de waargenomen/gemeten morfologische veranderingen en de veranderingen berekend op basis van alleen het geodetische bodemdalingsmodel?
- 3. In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?
- 4. In welke mate is de dynamiek van het plaatgedrag in het Friesche Zeegat te correleren aan andere factoren die niet met bodemdaling samenhangen?

1.4 Aanpak en leeswijzer

Om deze onderzoeksvragen te beantwoorden analyseren we de verlengde meetreeks. Hoofdstuk 2 bespreekt de opwerking van de ruwe datasets tot hoogtekaarten. Hierbij wordt voortgebouwd op het opwerkingsprotocol van de voorgaande rapportages. Hoofdstuk 3 beschrijft de analyse van de ontwikkeling van het plaatareaal boven NAP-0.5 m, alsook de aansluiting van de LiDAR data op de Vaklodingen van Rijkswaterstaat. Uit de hypsometrische curven in Hoofdstuk 4 kan dan worden afgelezen hoe de sedimentverdeling in de verticaal (boven NAP-0.5 m) verandert. Hoe deze ontwikkelingen zich verhouden tot het geodetische bodemdalingsmodel wordt in Hoofdstuk 5 besproken. Hoofdstuk 6 beschrijft de correlatie van de ontwikkeling van het plaatareaal in de verlengde meetreeks met meteorologische factoren. Tenslotte worden in Hoofdstuk 7 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

Deltares

11 van 87

2 Verwerken van LiDAR data

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

2.1 Beschrijving opnamen 2021

Op 7 september 2021 heeft Terratec wederom LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat gemaakt. Het rapport van Terratec (2021) beschrijft het vliegplan, de vlakdekking, puntendichtheid en de kwaliteitscontrole. De vluchthoogte van 1750 m in 2021 is gelijk aan de hoogte in 2020. De minimale puntendichtheid geassocieerd met deze nieuwe hoogte is nog steeds 5.7 punten/m², wat voldoende is voor het opwerking naar rasters van 1x1m en 10x10m.

Het vluchtplan is gebaseerd op het getijvenster van de stations Lauwersoog, Nes, Schiermonnikoog en Holwerd, waarbij de waterstand op al deze stations lager dan NAP -0,7 m moet zijn. Hierdoor ligt er zoveel mogelijk plaatareaal droog tijdens de metingen. De opname in september 2021 viel niet helemaal binnen het getijvenster bij station Nes (Figuur 2-1). Dit was geen probleem omdat de vlieglijnen van noord naar zuid zijn ingewonnen en de noordwestelijke hoek van het gebied niet in het laatste uur werd opgenomen.

Uit Figuur 2-2 wordt duidelijk dat de vlakdekking van de data goed was in de 2021 opname. Een samenvatting van gegevens over meetdienst, instrumentgebruik en inwinduur bij elke opname is getabuleerd in Bijlage A.



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

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021) 11206685-004-ZKS-0003, 28 april 2022



Figuur 2-2 Hoogtekaart van de ingewonnen data in najaar 2021, na toepassing van correctievlak.

2.2 Opwerkingsprotocol

Voor de interpretatie van de NAM meetreeks is de 2021 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).

2.2.1 LiDAR opwerking

Deltares hanteert het opwerkingsprotocol voor verwerking van 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 (niet toegepast op 2021 data m.b.t. het getijvenster bij Nes omdat het geen zichtbaar effect had op opnamen).
- Mediaan van de LAS punten binnen een roostercel bepalen op standaard 1x1m, 10x10m en 20x20m rooster, waarbij geen minimum aantal punten wordt aangehouden.
- Wegfilteren van roostercellen met minder dan 3 LAS punten uit het 10x10m rooster.

2.2.2 Correctie systematische afwijking

In de recente rapportages bleek een deel van de verschillen tussen opeenvolgende LiDAR opnamen te kunnen worden verklaard door systematische verschillen in het referentievlak van de puntenwolk. Door verschillen tussen opeenvolgende opnamen op 'harde oppervlakken' (dat wil zeggen oppervlakten waarvan we zeker weten dat deze niet door bodemdaling zakken) 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 (2010-2021) als uitgangspunt.

De in 2020 gehanteerde referentiedataset (2017a) liet een kleine scheefheid in de verdeling van de residuen zien. Hierdoor domineert een positieve afwijkingen (oftewel meetwaarden worden geacht te hoog te zijn) in veel opnamen. De gemeten bodemhoogtes uit andere jaren liggen ten opzichte van 2017a dus hoger en worden door de correctie naar beneden bijgesteld. Deze scheefheid heeft geen invloed op de relatieve verschillen tussen jaarmetingen, maar een referentiejaar waarvan de residuen een betere normaalverdeling

tonen is wenselijk. Een verandering van referentiejaar kan echter wel leiden tot veranderingen in absolute waarden, en hierdoor ook tot veranderingen in de analyse van de correlatie met andere verklarende factoren, zoals wind en waterhoogte. In de huidige rapportage is het referentiejaar aangepast naar 2019a. De gemiddelde hoogteligging van deze opname is meer representatief voor de gehele datareeks. 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 (NAM 2017) zijn ingewonnen zijn deze toegevoegd aan de LiDAR hoogtemetingen, alsook 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 (Zie uitleg Bijlage B)
- Voor ieder jaar t ∈ T is voor alle punten in de set Y het verschil met de 2019a opname berekend: ε(t) = Y(t) − Y_{2019a}.
- Deze fouten liggen ruimtelijk verdeeld door het projectgebied. Voor elk jaar is een lineair vlak (ε(x, y, t) = a(t) · x + b(t) · 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.

Deltares

14 van 87

survey	а	b	с
2010a	0.00089	0.00151	-1.07713
2011a	0.00058	-0.00098	0.4656
2011b	0.00224	-0.00728	3.94051
2012b	0.00196	0.0022	-1.72892
2013b	0.00262	-0.00232	0.86475
2014a	0.00039	0.00121	-0.80517
2015a	0.00216	-0.0006	-0.08984
2016a	0.00071	0.00043	-0.40137
2016b	0.00105	0.00063	-0.61184
2017a	-0.00029	0.00092	-0.51356
2017b	0.00051	0.00072	-0.55615
2018a	0.00037	-0.00372	2.19521
2018b	0.00084	0.00316	-2.05291
2019a	0	0	0
2019b	0.00058	-0.00158	0.83543
2020b	0.0013	0.00015	-0.35101
2021b	0.00002	0.00267	-1.62418

Tabel 2.1 Correctievlak coëfficiënten per survey.



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.

Een aantal effecten van deze voorgestelde correctie zijn berekend. Ten eerste is het correctievlak over het hele Friesche Zeegat gemiddeld, en geplot in het bovenste paneel van Figuur 2-4. Dit toont aan dat opnamen (op harde oppervlakken) gemiddeld genomen zowel

hoger als lager liggen dan opname 2019a. Gemiddeld genomen zijn opnamen door de correctie bijgesteld met -1.5 tot 3 cm. Hoe hoger de geconstateerde shift, hoe sterker deze bijstelling is. Daarnaast is berekend wat het verschil is in de correctie tussen de oostrand van het domein en de westrand, dit is weergegeven in het tweede paneel van Figuur 2-4. De oostrand van het domein wordt over het algemeen genomen sterker naar beneden bijgesteld dan de westrand. Dit verschil kan oplopen tot 10 cm (zie opname 2013b). Eenzelfde analyse is gemaakt voor de noordrand en de zuidrand (onderste paneel). Hier is voor opname 2011b het verschil tussen de twee randen het grootst, zo'n 10 cm. Deze getallen komen kwalitatief overeen met de analyse van vorig jaar, met voornamelijk veranderingen in de gemiddelde correctie (de shift), die nu beter rond 0 gecentreerd is. De precieze getallen verschillen tussen de twee analysen omdat de keuze van de set controlepunten iets is aangepast en de referentieopname veranderd is naar 2019a. Een verdere beschouwing hiervan is te vinden in Bijlage B.

 $\begin{bmatrix} 0.02 \\ 0.00 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.00 \\ 0.05 \\ 0.00 \\ 0.05 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.01 \\ 0.00$

plane coefficients wrt 2019a

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

2.2.3 Data overzicht

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

- 1. de gecorrigeerde hoogtekaarten
- 2. de originele hoogtekaarten
- 3. de berekeningen op basis van geodetische bodemdalingsmodel

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

In lijn met de rapportages van de twee voorgaande jaren worden de opnamen 2014b en 2015b weggelaten uit de analyse. In deze opnamen zijn teveel vlieglijnen buiten het



getijvenster gevlogen, waardoor opvullen van het beeld met voorgaande metingen en omliggende observaties niet nuttig bleek. Voor een visueel overzicht van de kaartbeelden 2010-2018 verwijzen we naar Van der Lugt et al. (2019), voor 2019 naar Van der Lugt et al. (2020a) en voor de nieuwe dataset van 2021 naar Figuur 2-2.

Omdat de voorgestelde correctieberekening iets is aangepast ten opzichte van Van der Vegt en Van der Lugt (2021), worden dit jaar weer de analyses van areaalontwikkeling (Hoofdstuk 3) en hypsometrie (Hoofdstuk 4) zowel mét als zonder correctie gerapporteerd.

Hoe zou de data eruit zien als de diepe bodemdaling zich één op één vertaalt naar de oppervlakte en er geen morfologische verandering plaatsvond sinds de eerste opnamen? Voor de berekeningen op basis van de geodetische bodemdalingsmodel, is het meest recente geodetische bodemdalingsmodel van de NAM gebruikt om de bodemdalingswaarden te berekenen op de datums waarop de LiDAR data opgenomen zijn. Deze ruimtelijk variërende bodemdalingswaarden zijn dan afgetrokken van de opnamen van 2010a om te komen tot de serie berekende bodems op basis van het geodetische bodemdalingsmodel.

3 Analyse areaalontwikkeling

In dit hoofdstuk rapporteren we de ontwikkeling van het plaatareaal voor zowel de kombergingsgebieden als individuele platen op basis van de LiDAR opnamen van 2010 tot en met 2021. Ook plaatsen we deze observaties in de context van de Vaklodingen dataset van RWS.

3.1 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 zijn onzekerheidsbanden overeenkomstig met σ =3cm voor de bodemhoogte geplot. Dit is de onzekerheidsmarge waarvan we denken dat deze nog aanwezig is in de dataset na correctie van de referentievlakken (van der Vegt & van der Lugt, 2021; Bijlage B).



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

De correctie op de dataset leidt tot een gelijkmatiger verandering in plaatareaal in de Zoutkamperlaag. Het plaatareaal van zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag blijft grotendeels constant met geringe fluctuaties ten opzichte van de onzekerheidsmarge. Voor het Pinkegat blijkt dat de sprong in plaatareaal tussen 2014 en 2015, waarvoor Van der Lugt et al. (2019) geen verklaring konden vinden, een gevolg was van de systematische verschillen tussen referentievlakken van de opnamen onderling. In de gecorrigeerde tijdreeks is de ontwikkeling geleidelijk. De correctie verwijdert niet de fluctuaties in de meetreeks, ze worden alleen gelijkmatiger over de tijd verdeeld. Voor het Pinkegat lijkt een licht dalende trend in het signaal te zitten, maar het areaal in de laatste 4 opnamen is zeer constant.

19 van 87



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

3.2 Individuele platen

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



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

3.2.1 Pinkegat kombergingsgebied (A – F)

De areaalontwikkeling van individuele platen in het Pinkegat wordt gepresenteerd in Figuur 3-4. In deelgebied A schommelt het plaatareaal sterk, met grote onzekerheid, maar het areaal daalt licht. In het westen (B, C, D) en oosten (E, F) van het Pinkegat zijn zowel platen te vinden die groeien (C, E) als krimpen (B, F). Deze veranderingen horen bij de dynamiek van het Pinkegatsysteem.



Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021) 11206685-004-ZKS-0003, 28 april 2022



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

3.2.2 Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G-H)

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



G: Wierumerwad

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021) 11206685-004-ZKS-0003, 28 april 2022



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 onzekerheidsbanden tonen het effect van een onzekerheidsmarge van 3 cm. De oranje reeks (··•··) toont de originele data en de blauwe reeks (-·•--) de gecorrigeerde dataset. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

3.2.3 Zoutkamperlaag (I-R)

De platen in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag vallen buiten het sterkste bodemdalingsgebied en worden hier ter referentie besproken. De areaalontwikkeling van deze platen wordt gepresenteerd in Figuur 3-6. Ook in de Zoutkamperlaag zien we hoe natuurlijke dynamiek kan bijdragen aan de krimpen van platen, voornamelijk in de buurt van de grotere geulen, zie bijvoorbeeld de Kuipersplaat (I) gelegen tussen de Zoutkamperlaag en het Binnenplaatgat. De drie deelgebieden direct ten zuiden van Schiermonnikoog (K, L, M) vertonen zeer vergelijkbare ontwikkeling. De arealen van de grootste platen in het westen van het gebied (O, P, R) 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 (N, Q).



I: Kuipersplaat

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021) 11206685-004-ZKS-0003, 28 april 2022





Figuur 3-6 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor individuele platen van het Zoutkamperlaag kombergingsgebied (I-R in Figuur 3-3). De onzekerheidsbanden tonen effect van onzekerheidsmarge van 3 cm. De oranje reeks (--•--) toon de originele data en de blauwe reeks (--•--) de gecorrigeerde dataset. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Verticale schalen verschillen per deelgebied.

3.3 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. Er zijn geen nieuwe Vaklodingen beschikbaar gekomen sinds 2019.



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 1987-2019 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 twee RWS opnamen die binnen de monitoringsperiode vallen: een opname in 2012 en een opname in 2019. De aansluiting van de 2012 Vaklodingen op de NAM data was in de originele NAM dataset al behoorlijk goed, maar de correctie van de NAM data verbetert deze aansluiting nog verder. Dit geldt voor beide kombergingsgebieden. Het plaatareaal in 2019 berekend uit de Vaklodingen wijkt in beide kombergingsgebieden iets meer af van de NAM datareeks dan het 2012 areaal. De correctie van de NAM data vergroot het verschil met de waarden uit de Vaklodingen iets. Dit verschil is nog altijd klein, want voor beide jaren en in beide kombergingsgebieden is het verschil van de RWS datapunten vergelijkbaar met de onzekerheid geassocieerd met de NAM dataset (Figuur 3-8, Figuur 3-9).

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

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



Figuur 3-8 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m voor het Pinkegat kombergingsgebied tussen Vaklodingen (groen -->--), de originele NAM LiDAR data (oranje, -->--), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, -->--). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van de controlepolygoon (boven). 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 -->--), de originele NAM LiDAR data (oranje, --•--), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, --•--). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van de controlepolygoon (boven). Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).



Figuur 3-10 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m voor de Engelsmanplaat. Vaklodingen (groen - ->--), de originele NAM LiDAR data (oranje, -->--), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw, -->--). De zwarte lijn geeft het totale oppervlakte van de controlepolygoon (boven). Een uitsnede ingezoomd op de monitoringsperiode (onder).

3.4 Conclusies areaalontwikkeling

Het gerapporteerde plaatareaal in de Zoutkamperlaag is constanter dan in het Pinkegat. Voor het Pinkegat laat de meetreeks een lichte afname van plaatareaal over de gehele tijdsreeks zien. De deelgebiedsanalyse toont aan dat dit met name wordt veroorzaakt door het signaal van de westelijke deel van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5) en de plaat in deelgebied Pinkegat oost-2 (F, Figuur 3-4) waar een verbreding en uitbochting van de geul tussen deze platen optreedt. Deze afname is klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge horend bij 3 cm foutmarge in de gemeten bodemhoogte die ook na de correctie nog aanwezig is, en zet niet door tussen 2019 en 2021. De opname in 2020 laat een kleine afname van het plaatareaal in de Zoutkamperlaag zien, gevolgd door een toename in 2021, ook geheel binnen de onzekerheidsmarge.

De nieuwste iteratie van de referentievlakcorrectie verandert de uiteindelijke conclusies omtrent de tijdreeksen van areaalontwikkelingen niet. De correctie levert wel een verbetering op in de interpretatie van de tijdreeksen; deze biedt, net als in voorgaande rapporten, een verklaring voor de sprong in het gerapporteerde plaatareaal waargenomen tussen 2014 en

29 van 87

2015. De correctie suggereert dat deze verandering geen sprong tussen twee opnamen betrof, maar een meer geleidelijke ontwikkeling.

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

Binnen de onzekerheidsmarges van de RWS en de NAM datasets sluiten de datasets goed op elkaar aan.

4 Analyse ontwikkeling plaathoogte

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

4.1 Hypsometrie kombergingsgebieden

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

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



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

4.2 Hypsometrie individuele platen

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

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

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. Voor de meest noordelijke van deze platen (B), fluctueert het areaal behoorlijk, maar neemt deze in de laatste jaren toch duidelijk af. De centrale plaat (C) is in de monitoringsperiode enorm gegroeid: een hoogtetoename van 30-40 cm heeft er voor gezorgd dat deze plaat bijna verdubbelde in oppervlak (contour NAP-0,5m; Figuur 4-3 C). De twee platen in het oosten van het kombergingsgebied Pinkegat (E, F) laten een ander soort ontwikkeling zien. Plaat Pinkegat oost-1 (E) neemt beneden ca. NAP-0,1m in oppervlakte toe, terwijl daarboven de oppervlakte en hoogte afnemen. Plaat Pinkegat oost-2 (F) laat een tegenovergestelde ontwikkeling zien: beneden ca. NAP+0,2m neemt het plaatoppervlak af, daarboven groeit het oppervlak en neemt de hoogte toe. De eerste plaat vlakt als het ware af, de tweede plaat versteilt.



A: Ameland zuidoost

Deltares

A [×10⁶m²]

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021) 11206685-004-ZKS-0003, 28 april 2022

A [×10⁶m²]



D: Pinkegat west-3

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).

Consistent met Van der Vegt en Van der Lugt (2021), heeft de datacorrectie geen grote invloed op de interpretatie van de curves in het controlegebied Wierumerwad (G, Figuur 4-4). De kleuren leveren een bandbreedte van de curves op, maar zeker in de tweede helft van de meetreeks lijkt de plaathoogte vrij constant. Voor de Engelsmanplaat (H, Figuur 4-4) laat de hypsometrie op basis van de gecorrigeerde dataset zien dat de sedimentatie varieert over de verticaal. Op en net onder NAP+0m liggen de curves dicht op elkaar en over elkaar heen. Hoger en lager dan NAP+0m is er meer differentiatie in de curves van de opeenvolgende jaren, en wordt de plaat iets lager met de tijd.



G: Wierumerwad

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

0.0

2.0

4.0

6.0

A [×10⁶m²]

8.0

10.0

Voor de volledigheid 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. Hierdoor heeft de datacorrectie minder invloed op de interpretatie van de curves. De platen tussen Eilanderbult en Paesens (J) vertonen een lichte groei in hoogte tussen NAP-0,5m en NAP+1m. In tegenstelling

2020 2021

2.0

4.0

6.0

A [×10⁶m²]

8.0

-0.5 -0.0

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

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



I: Kuipersplaat

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021)


Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021) 11206685-004-ZKS-0003, 28 april 2022



N: Grote Siege zuid



Q: Zoutkamperlaag zuidoost-1

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

4.3 Tijdsgemiddelde ontwikkeling

Tijdsgemiddelde bodemhoogteveranderingen zijn weergegeven in Figuur 4-6. Om hoogteveranderingen per roostercel te laten zien is het jaargemiddelde van de bodemhoogtemetingen voor alle roostercellen van 10x10m berekend. De trendcoëfficiënt is uitgedrukt in millimeters bodemhoogteverandering per jaar. Alléén roostercellen waarvoor meer dan 8 geldige waarden aanwezig zijn in de meetreeks hebben een waarde gekregen. De ontwikkeling van de bodemhoogte hoeft in werkelijkheid niet lineair te verlopen. Wanneer er echter een sterke positieve dan wel negatieve ontwikkeling plaatsvindt, zal dit zich uiten in een hoge waarde van de coëfficiënt. Als er geen duidelijke ontwikkeling plaatsvindt zal de coëfficiënt zich in de buurt van 0 bevinden. Zo kunnen sterk variabele gebieden worden onderscheiden van meer statische gebieden, en kan ook de richting van de ontwikkeling (verhoging of verlaging) worden aangegeven.

Migratiepatronen domineren het verkregen beeld. De grootste veranderingen zijn de aanlanding van het Rif op de Engelsmanplaat waardoor het Oude Smerig Gat verzandt. Er

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



Figuur 4-6 De gemiddelde verandering in bodemhoogte zoals berekend per roostercel op basis van de tijdserie 2010-2021 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 juist diep en heel stabiel gedurende alle opnamen sinds 1987. De profielontwikkeling van twee platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied bevestigt duidelijk de oostwaartse migratie van de platen in dit gebied, zoals ook al geconstateerd werd op basis van de tijdsgemiddelde ontwikkeling (Figuur 4-8).

Deltares

40 van 87



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 2021b (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 2021b (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. Het plaatareaal tussen NAP-0,5m en NAP+0,5m lijkt in het Pinkegat licht af te nemen. Op kombergingsniveau valt deze afname binnen de meetonzekerheid.

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

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

Als laatste blijkt uit de hypsometrische curven de invloed van de referentievlakcorrectie duidelijker dan uit de tijdreeksen van areaalontwikkeling. Deze bevinding is dus niet gewijzigd met de nieuwe iteratie van de referentievlakcorrectie.

Vergelijking LiDAR metingen en geodetisch bodemdalingsmodel

De Auditcommissie adviseerde in 2021 (Commissie mer, 2021) een nadere volumetrische analyse uit te voeren naar de ontwikkeling van de bodemdalingsschotel als gemeten met behulp van diep gefundeerde peilmerken versus de werkelijk geobserveerde morfologische ontwikkeling van de kombergingsgebieden. Het doel hiervan is de ontwikkelingen in de morfologie te vergelijken met de bodemdaling door gaswinning.

In dit hoofdstuk is daarom de geconstateerde ontwikkeling van het oppervlak vergeleken met de berekende areaalontwikkeling die zou plaatsvinden als de bodemdalingskommen uit het geodetisch bodemdalingsmodel van de NAM (Figuur 5-1) zich één op één zou vertalen naar de ligging van het oppervlak. Het geodetische bodemdalingsmodel vertaalt lokale waarnemingen van de opgetreden bodemdaling op basis van waterpas- en GNSS metingen, naar een met de tijd veranderende bodemdalingsschotel. Het model varieert ruimtelijk, en geeft daarom per deelgebied in de analyse verschillende waarden. De berekende diepe bodemdaling is hiervoor gekoppeld aan de eerste opname uit de meetreeks. Deze berekening is toegepast op zowel de LiDAR (gecorrigeerde datasets) als de Vaklodingen dataset. Een volumeberekening op basis van LiDAR data kan alleen gedaan worden voor het sedimentvolume van het intergetijdengebied (NAP-0,5 m tot NAP+2m). Zo een berekening zegt dus niet alles over de sedimentbalans van het gebied, nog geeft hij informatie over de hoogteverdeling of het areaal intergetijdengebied, welke van belang is voor de ecologie. Voor de LiDAR meetreeks is daarom plaatareaal en hypsometrie vergeleken tussen de gemeten en berekende bodems. In de Vaklodingen omvatten ook gegevens over de geuldiepte, en daarom zijn daarvoor wel volumeberekeningen gemaakt.



Figuur 5-1 Verticale bodembeweging tussen 2009 en 2020 volgens het geodetische model. De relatieve bodembeweging is hier gevisualiseerd ten opzichte van twee stabiel veronderstelde referentiegebieden bij Driesum (ten oosten van Dokkum) en in het westen van Ameland (NAM, 2022).

Omdat het geodetisch bodemdalingsmodel niet de gehele analysepolygonen van Pinkegat en Zoutkamperlaag beslaat, zijn de kombergings- en deelgebiedspolygonen iets gewijzigd t.o.v. Hoofdstuk 3 (Figuur 5-2).

Deltares

44 van 87



Figuur 5-2 Analysepolygonen voor volumeberekeningen op kombergingsschaal.

5.1 Areaalontwikkeling

Figuur 5-3 toont dat als de bodemdaling zich één op één zou doorvertalen naar de oppervlakte zonder natuurlijke ontwikkeling erbij, het effect op het plaatareaal klein is. Op geaggregeerd kombergingsniveau is duidelijk dat voor zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag de veranderingen in plaatareaal veel groter zijn dan dat de doorwerking van de geodetische bodemdalingsmodel aan de oppervlakte tot gevolg kan hebben (Figuur 5-3). Daarnaast blijkt dat de ontwikkeling door morfostatische doorvertaling van de resultaten van het geodetisch model, de areaalontwikkeling klein is ten opzichte van de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Ingezoomd op deelgebieden zijn er wel veranderingen in areaal op te merken die groter zijn dan de meetonzekerheid (Figuur 5-4). Maar ook in de deelgebieden blijkt de waargenomen ontwikkelingen uit de LiDAR beelden veel groter zijn dan alleen de doorvertaling van de resultaten uit het geodetische bodemdalingsmodel.





Figuur 5-3 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP-0,5m voor de kombergingsgebieden Pinkegat (boven) en Zoutkamperlaag (onder). De onzekerheidsbanden tonen het effect van een onzekerheidsmarge van 3 cm. Voor de oranje reeks wordt de error bar van de eerste LiDAR survey, waaraan het gerelateerd is, aangehouden. De oranje reeks (--•--) toont het berekende plaatareaal op basis van de geodetische bodemdalingsmodel en de blauwe reeks (--•--) het plaatareaal op basis van de LiDAR metingen. De verticale streepjeslijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Het geodetische bodemdalingsmodel varieert ruimtelijk, en verschilt daarom per kombergingsgebied.













Figuur 5-4 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0,5m voor individuele platen van het Friesche Zeegat. De onzekerheidsbanden tonen effect van onzekerheidsmarge van 3 cm. Voor de oranje reeks wordt de error bar van de eerste LiDAR survey, waaraan het gerelateerd is, aangehouden. De oranje reeks (--•--) toont het berekende plaatareaal op basis van de geodetische bodemdalingsmodel en de blauwe reeks (--•--) het plaatareaal op basis van de LiDAR metingen. De verticale zwarte lijnen geven de wisseling van type laserscanner weer. Het geodetische bodemdalingsmodel varieert ruimtelijk, en verschilt daarom per deelgebied.

5.2 Ontwikkeling plaathoogte

Om de ontwikkeling van de plaathoogte boven NAP-0,5m te beschouwen, tonen we de ontwikkeling op basis van de LiDAR opnamen naast de morfostatische ontwikkeling op basis van het geodetisch model. Als de bodemdaling zich één op één zou doorvertalen naar de oppervlakte, zouden er op geaggregeerd kombergingsniveau veel kleinere veranderingen in plaathoogte plaatsvinden dan blijkt uit de LiDAR data (Figuur 5-5, Figuur 5-6). Voor de deelgebieden verschilt de mate van plaathoogte ontwikkeling door de diepe bodemdaling (Figuur 5-7). In deelgebied Ameland-zuid-oost (A) en het Wierumerwad (G), beiden relatief dicht bij het centrum van de dalingskom gelegen, neemt de plaathoogte af. Bij andere platen is de potentiële ontwikkeling op basis van het geodetisch model verwaarloosbaar. Deelgebieden A en G zijn echter niet de deelgebieden waar de grootste veranderingen in hypsometrie plaatsvinden in de LiDAR metingen.

5.2.1 Kombergingsgebieden



Figuur 5-5 Hypsometrische curven voor 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 hypsometrie berekend op basis van de LiDAR metingen (links) en de hypsometrie berekend op basis van de geodetische bodendalingsmodel (rechts) worden vergeleken.



Figuur 5-6 Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij een hoogte waterstand 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 hypsometrie berekend op basis van de LiDAR metingen (links) en de hypsometrie berekend op basis van de geodetische bodendalingsmodel (rechts) worden vergeleken.



A: Ameland zuidoost



D: Pinkegat west-3



G: Wierumerwad



J: Eilanderbult



M: Schiermonnikoog zuid-3



Figuur 5-7 Hypsometrische curven voor de platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied. Op de horizontale as is het wateroppervlakte horende bij de waterstand op de verticale as geplot. Het areaal aan wadplaat boven NAP -0.5 m is bijvoorbeeld gelijk aan het totale bekkenoppervlakte minus de waarde bij NAP -0.5. De hypsometrie berekend op basis van de LiDAR metingen (links) en de hypsometrie berekend op basis van de geodetische bodendalingsmodel (rechts) worden vergeleken.

57 van 87

5.3 Volumetrische analyse

Om ook het potentiële effect van de diepe bodemdaling op de geulen te bekijken, is een volumetrische analyse uitgevoerd aan de hand van de Vaklodingengegevens van 2012 en 2019. Voor deze analyse werd het geodetische bodemdalingsmodel toegepast op de Vakloding van 2012, om daarmee de te verwachten nieuwe bodem voor 2019 te berekenen. In plaats van naar het volume van het sediment te kijken, kijken we in deze analyse juist naar het watervolume tussen de bodem en NAP+2m. Het natte volume voor deze twee bodems is berekend door ze af te trekken van NAP+2m. Het verschil tussen het berekende volume (2019) en het initiële volume (2012) geeft de verandering in watervolume (zie Figuur 5-8). Dezelfde procedure wordt daarna gevolgd voor de berekende volumenveranderingen tussen de gemeten bodems van 2012 en 2019. Zowel de gemeten als de berekende volume volumeveranderingen worden gegeven in Tabel 5.1.



Figuur 5-8: Berekening van <u>water</u>volume zoals gebruikt in Tabel 5.1, voor de verandering in gemeten bodems

Als de enige morfologische veranderingen tussen 2019 en 2012 het gevolg zouden zijn van de veranderingen volgens het geodetische bodemdalingsmodel, dan zou het watervolume van kombergingsgebied Pinkegat 1,35 miljoen m³ zijn tegenomen (een toename van 1% van het watervolume). Dit komt overeen met een 1,35 miljoen m³ vraag naar sediment. Bij beschouwing van de metingen blijkt echter dat het Pinkegat in feite een afname van 2,79 miljoen m³ watervolume heeft gekend (een afname van 2% van het watervolume). De waargenomen waarden impliceren dat de morfologische veranderingen in de periode 2012 tot 2019 groter zijn geweest dan de door bodemdaling veroorzaakte veranderingen. De waargenomen verandering komt overeen met een toename van 2,79 miljoen m³ sediment in het bekken, bovenop een toename van 1.35 miljoen m³ sediment die de bodemdaling compenseert. De totale toename in het Pinkegat betreft dus 4.14 miljoen m³ sediment. Een soortgelijk effect kan ook worden waargenomen in de Zoutkamperlaag, maar met een dubbele toename aan sedimentvolume in vergelijking tot het Pinkegat (Tabel 5.1).

58 van 87

Tabel 5.1: $\Delta V_{gemeten}$ is de verandering in <u>water</u>volume tussen de 2019 en 2012 Vaklodingen. $\Delta V_{bodemdaling}$ is de berekende toename in watervolume op basis van de geodetische bodemdalingsmodel. Een negatieve waarde van de eerste twee volumes correspondeert dus met een toename in sedimentvolume. De sedimentvolumeveranderingen zijn als volgt berekend $\Delta V_{sediment} = -(\Delta V_{gemeten} - \Delta V_{bodemdaling})$.

Kombergings -gebied	ΔV _{gemeten} (10 ⁶ m ³)	$\Delta V_{bodemdaling}$ (10 ⁶ m ³)	ΔV _{sediment} (10 ⁶ m ³)	ΔV _{gemeten} (10 ⁶ m³/jr)	ΔV _{bodemdaling} (10 ⁶ m ³ /jr)	ΔV _{sediment} (10 ⁶ m ³ /jr)
Pinkegat	-2.79	1.35	4.14	-0.40	0.19	0.59
Zoutkamper- laag	-7.03	1.42	8.45	-1.00	0.20	1.21

De volumeveranderingen in Tabel 5.1 zijn van dezelfde grootte-orde als de sedimentbalans berekeningen van Elias (2019) op basis van trendlijnen voor langetermijntrends (1933-2012) en recentere trends (1989-2015). De polygonen gebruikt in het huidige rapport komen niet geheel overeen met de polygonen van Elias (2019). Zo is het in de huidige studie, vanwege het gebruik van alleen recente Vaklodingen, mogelijk om ook de kwelders mee te nemen in de berekeningen. De veranderingen in sedimentvolumes zijn dan ook maar ~2% van de accommodatieruimte (watervolume onder NAP+2m) in 2012 voor zowel de Pinkegat en Zoukamperlaag. De bijdrage van bodemdaling tot de totale accommodatieruimte voor het interval 2012 – 2019 voor Pinkegat is 1%, en voor Zoutkamperlaag 0.3% van de accommodatieruimte in 2012.

5.4 Conclusies vergelijking LiDAR metingen met berekeningen op basis van geodetische bodemdalingsmodel

De gemeten veranderingen in plaatareaal, plaathoogte en het totale volume water in zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag zijn veel groter dan de waarden die berekend zijn op basis van het geodetisch bodemdalingsmodel. We concluderen daarom dat andere processen dan bodemdaling door gaswinning, zoals bijvoorbeeld natuurlijke morfologische veranderingen als geulmigratie en sedimentaanvoer, een veel grotere rol spelen bij het plaatgedrag in deze kombergingsgebieden.

Invloed hydrodynamische en meteorologische condities

Van der Lugt et al., 2019 zochten naar een fysische interpretatie van de grilligheid van de gerapporteerde areaalontwikkelingen, maar konden geen duidelijk verband vaststellen tussen de gemeten areaalveranderingen en de onderzochte meteorologische indicatoren. Van der Lugt et al. (2020a) stelden vast dat de correctie van de meetreeks van grote invloed is op de conclusies uit de analyse van verklarende factoren. Uit de gecorrigeerde meetreeks komt toch een correlatie tussen areaalverandering en een aantal verklarende factoren naar voren. In Van der Vegt en Van der Lugt (2021) werd de correctiemethode verbeterd, waardoor de verbanden tussen verklarende factoren en areaalverandering zijn aangepast. In dit rapport is een verdere verbetering van der correctiemethode gedaan, waaronder het wijziging van de referentiejaar naar 2019a. Het is dus te verwachten dat de ware correlatie tussen verklarende factoren en areaalverander naar voren komt.

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

Onderzoeksvragen voor de analyse zijn:

6

60 van 87

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

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

De datareeks bestaat nu uit 17 punten. Dat is vrij kort voor een statistische beschouwing. Daardoor is de kans behoorlijk groot dat berekende correlatiecoëfficiënten het resultaat zijn van toevallig samenvallen van condities en waarnemingen. Bij 17 datapunten ligt de significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt ongeveer op 0,46. Dat betekent dat voor deze dataset er minder dan 5% kans bestaat dat het geconstateerde verband willekeurig is wanneer de correlatiecoëfficiënt boven 0,46 (of onder -0,46) uitkomt. Om ook zwakke verbanden te kunnen onderscheiden, (die zich in een lange tijdreeks uitten door een Pearson correlatiecoëfficiënt van < 0,5), moeten er nog veel datapunten bijkomen; een significantiegrens van 0,2 wordt bijvoorbeeld pas bereikt met 90 datapunten.

6.1 Invloed condities tijdens inwinning

Voor vier fysische indicatoren (zie Van der Lugt et al., 2020a, voor selectie en Tabel 6.1 voor de gehanteerde definities) werd onderzocht of er een correlatie bestaat tussen hun waarde tijdens de inwinning en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. Indicator W voor windsnelheid is berekend uit tijdreeksen van potentiële wind (gemeten windsnelheid omgerekend naar de windsnelheid bij een standaard landschapsruwheid en een standaard hoogte van 10 meter) van het KNMI voor het station Lauwersoog. De waterstandsindicatoren zijn berekend uit de

historische waterstandsgegevens van Rijkswaterstaat, eveneens voor station Lauwersoog. De berekende tijdsreeksen voor de indicatoren zijn geplot in Figuur 6-1.

Parameter	Definitie
W	Gemiddelde windsnelheid tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [m/s]
LW	Gemiddeld laagwater tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [NAP+m]
нพ	Gemiddeld hoogwater tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [NAP+m]
TD	Gemiddelde duur van het dalend tij tijdens de metingen en 2 dagen vooraf

Tabel 6.1 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van het gemeten areaal.



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



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

In Figuur 6-2 zijn de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten geplot tussen de indicatoren en zowel het areaal boven NAP-0,5m en het areaal boven NAP+0m. Hierin is te zien dat

enkel de windsnelheid nog een significante (negatieve) correlatie laten zien van -0,51. Een sterkere windsnelheid vlak voor en tijdens de meetcampagne kan dus leiden tot een kleiner gemeten plaatareaal boven NAP-0,5m in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. In deze correlatie zien we geen causaal verband.

6.2 Invloed stormachtigheid tussen opnamen

Voor vier windsnelheidsindicatoren (zie Tabel 6.2 voor de gehanteerde definities) werd onderzocht of er een correlatie bestaat tussen hun waarden tussen de opnamen en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. De indicatoren E1, E2, E0 en Eclim voor windsnelheid zijn berekend uit de potentiële windtijdreeksen van het KNMI voor het station Lauwersoog.

We verwachten dat stormachtige (energieke) condities aan het einde van het interval meer invloed zullen hebben op de areaalveranderingen dan aan het begin van het interval, daarom berekenen we waarden voor de indicatoren over

- Seizoen: de laatste 112 dagen van het interval
- Maand: de laatste 28 dagen van het interval
- Week: de laatste 7 dagen van het interval

Tijdreeksen voor elk van deze referentieperioden zijn geplot in Figuur 6-3.

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

Parameter	Definitie
E1	Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid binnen het gedefinieerde tijdsinterval $[m^2/s^2]$
Ew	Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid van de westelijk georiënteerde wind (180 tot 360 graden) binnen het gedefinieerde tijdsinterval $[m^2/s^2]$
Eo	Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid van de oostelijk georiënteerde wind (0 tot 180 graden) binnen het gedefinieerde tijdsinterval $[m^2/s^2]$
Eclim	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overgeschreden binnen het gedefinieerde tijdsinterval, gebaseerd op windklimaat 2010-2020 [-]

62 van 87



Figuur 6-3 Tijdreeksen van indicatoren tussen twee opeenvolgende metingen. Kleuren representeren tijdreeksen berekend over verschillende referentieperioden.

In Figuur 6-4 (seizoen), Figuur 6-5 (maand) en Figuur 6-6 (week) zijn de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten geplot voor areaal boven NAP-0,5m en areaal boven NAP+0m. Voor de langere referentieperiode van 112 dagen (dat wil zeggen 'seizoen') zijn de correlaties voor areaal boven NAP-0,5m sterker dan wanneer alleen het areaal boven NAP+0m wordt meegenomen. Correlaties zijn ook over het algemeen sterker en negatief voor het kombergingsgebied Pinkegat en juist minder sterk en positief voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De platen in de Pinkegat liggen gemiddeld genomen minder hoog dan in de Zoutkamperlaag (Figuur 4-1, Figuur 4-2). Golven breken op de platen in het Pinkegatgebied. De platen in het Zoutkamperlaaggebied liggen meer beschut. Datzelfde verband komt niet naar voren voor kortere referentieperioden (maand of week voorafgaand aan de meetkampanje).



Figuur 6-4 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal en windcondities tussen opnamen, gebaseerd op de 112 dagen voor de opname. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,46.



Figuur 6-5 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal en windcondities tussen opnamen, gebaseerd op de laatste 28 dagen voor de opname. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,46



Figuur 6-6 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal en windcondities tussen opnamen, gebaseerd op de 7 dagen voor de opname. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0,46.

6.3 Conclusies hydrodynamische en meteorologische condities

Er zijn geen causale relaties gevonden tussen het plaatareaal en de condities tijdens de inwinning. Door de correctie die sinds 2020 op de LiDAR analyse word toegepast (Van der Lugt et al., 2020, Bijlage B), is de interpretatie van de LiDAR data eenduidiger geworden en is analyse van meteorologische condities niet meer nodig. We bevelen daarom aan deze analyse in de toekomst niet meer uit te voeren.

Stormachtige condities in de drie maanden voorafgaand aan een LiDAR opname leiden tot een afname in plaatareaal in het Pinkegat. Deze relatie vinden we niet voor de Zoutkamperlaag. De reden waarom deze twee kombergingsgebieden anders reageren op stormachtigheid is onduidelijk. De overige onderzochte intervallen correleren niet met het plaatgedrag in de kombergingsgebieden.

7 Conclusies en aanbevelingen

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

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

De 2021 opname past wederom goed in de meetreeks. Het gerapporteerde plaatareaal van de Zoutkamperlaag is constanter gebleven door de tijd heen dan het plaatareaal van het Pinkegat. Voor het Pinkegat suggereert de meetreeks een geringe afname van het plaatareaal over de tijd, maar deze afname is klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge en zet niet door tussen 2019 en 2021.

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

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

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

7.1 Wat zijn de verschillen tussen de waargenomen/gemeten morfologische veranderingen en de veranderingen die opgetreden zouden moeten zijn als gevolg van de gemeten diepe bodemdaling?

Gemeten veranderingen in plaatareaal, plaathoogte en het totale volume water in zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag zijn veel groter dan wanneer deze waarden morfostatisch worden berekend uit het geodetische bodemdalingsmodel. Hieruit volgt dat andere processen dan bodemdaling (bijvoorbeeld natuurlijke morfologische veranderingen) een veel grotere rol spelen bij het plaatgedrag in deze kombergingsgebieden.

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

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

waargenomen. Het gebied waar de sterkste bodemdaling verwacht wordt komt dus niet overeen met het gebied waar de sterkste daling in plaathoogte voorkomt. Ook de berekende veranderingen vanuit het geodetische bodemdalingsmodel zijn veel kleiner dan de gemeten veranderingen.

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

Voor deelgebieden en individuele platen binnen 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 hierdoor 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 in de drie maanden voorafgaand aan een LiDAR opname leiden tot een afname in plaatareaal in het Pinkegat. Deze relatie vinden we niet voor de Zoutkamperlaag. De reden waarom deze twee kombergingsgebieden anders reageren op stormachtigheid is onduidelijk. De overige onderzochte intervallen correleren niet met het plaatgedrag in de kombergingsgebieden.

7.4 Aanbevelingen

Er is de laatste jaren veel gedaan om de kwaliteit van de LiDAR monitoring en analyse van deze gegevens te optimaliseren. Het additionele effect van verdere aanscherping van de referentievlakcorrectie op de resultaten is marginaal. De keuze voor de referentiesurvey 2019a geeft een iets betere verdeling van de correctieparameters rondom 0. Wij bevelen aan om de referentievlakcorrectie, met 2019a als referentiejaar, toe te voegen aan de standaard opwerkingsprotocol.

De relatieve correctie van de Ground Control Point grids ten tijde van de LiDAR opnames kunnen worden bepaald op basis van satelliet radar interferometrie (InSAR) data. Door de hoge dichtheid in ruimte en tijd levert InSAR een consistent beeld op van de bodembeweging (zie paragraaf B3.2). Een aantal mogelijke punten voor het uitbreiding van Ground Control Points op basis van InSAR zijn aangetoond. Deze punten zijn meegenomen in de puntensets die als basis dienen voor de correctiebepalingen. Het gebruik van een grotere datareeks maakt het gemakkelijker om eventuele onregelmatige metingen te identificeren en elimineren. Het wordt geadviseerd de uitgebreide set van harde topografie punten en Ground Control Points ook in toekomstige analyses te gebruiken.

Er zijn geen causale relaties gevonden tussen het plaatareaal en de condities tijdens de inwinning. Door de correctie die sinds 2020 op de LiDAR analyse word toegepast (Van der Lugt et al., 2020, Bijlage B), is de interpretatie van de LiDAR data eenduidiger geworden en is analyse van meteorologische condities niet meer nodig. We bevelen daarom aan deze analyse in de toekomst niet meer uit te voeren.

Deltares

66 van 87

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.

8 Referenties

Commissie mer (2021a). "Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen. Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2020." Projectnummer: 3534. Commissie voor milieueffectrapportage, Utrecht, Nederland.

Commissie mer (2021b). "NAM Waddenwinningen 2020-2026. Advies over het Monitoringsprogramma" Projectnummer: 3551. Commissie voor milieueffectrapportage, Utrecht, Nederland.

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

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

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

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

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

NAM B.V. (2022). "Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2021". EP Document Nummer: EP202203203063

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

Terratec AS. (2021). "Project report Waddenzee - LiDAR acquisition for 2021". Oslo, Norway

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

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

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

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

Deltares

68 van 87

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021) 11206685-004-ZKS-0003, 28 april 2022

A Overzicht vluchtgegevens

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

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

LiDAR	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
				Start	Eind			
2014 (najaar)	Fugro Fugro Geospatial B.V. (2014b)	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 Eurosense (2016a)	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 Eurosense (2016b)	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 Aerodata (2016)	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 Aerodata (2017)	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 Aerodata (2017)	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	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

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

**Geregistreerde 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)

B.1 Samenvatting

In de 2022 LiDAR analyse van de surveys tot en met 2021 zijn de surveys wederom gecorrigeerd met een lineair correctievlak ten opzichte van een referentie survey. In voorgaande analyses is gebleken dat door deze correctie de trends in wadplaathooges beter te interpreteren zijn. De correcties liggen voor het grootste gedeelte binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR.

De correctie parameters zijn integraal geschat op basis van harde topografie, de sediment grids, en de Ground Control Point grids. Hieraan zijn in deze analyse enkele Ground Control Point clusters op basis van InSAR (satelliet radar interferometrie) meetpunten toegevoegd. Verder is een nieuwe keuze voor de referentie suvey gemaakt: de acquisitie in voorjaar 2019.

B.2 Introductie

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

In (Van der Vegt et al., 2021) wordt geadviseerd om de GCPs die niet in 2020 opnieuw zijn ingemeten, alsnog een keer in te meten, ter controle van de relatieve hoogtes ten opzichte van naburige peilmerken. In de toekomst kunnen deze hoogtes dan vervolgens uit de InSAR data worden afgeleid. Alleen bij afwijkingen in de trend in de InSAR data worden dan de betreffende GCP grids opnieuw ingemeten.

Tevens wordt in Bijlage B van (Van der Vegt et al., 2021) aangegeven dat in de volgende LiDAR analyse zou kunnen worden overwogen om een andere referentie survey te kiezen. Dit omdat de LiDAR hoogtes van de GCP en de sediment grids van 2020 al goed passen bij de hoogte op basis van geodetische metingen, en deze passing na correctie ten opzichte van de referentie survey (voorjaarsopname van 2017) iets minder wordt.

In het advies van de Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2020 (Commissie MER, 2021) worden mogelijkheden tot verbetering aangedragen die gerelateerd zijn aan LiDAR hoogtemetingen en de bepaling van de correctie parameters. Het betreft de aanbeveling voor de optimalisatie van de referentievlakcorrectie het aantal Ground Control Points uit te breiden, en het onderzoeken of InSAR data gebruikt kunnen worden om verschillen in de hoogte van harde topografie in opeenvolgende jaren te verifiëren.

Deze bijlage behandelt achtereenvolgens de Ground Control Point grids, de mogelijkheden van InSAR, de harde topografie hoogtes, de keuze voor de referentie survey, en de berekende correctie parameters voor de 2022 LiDAR analyse.

B.3 Ground Control Point grids en de inzet van InSAR

B.3.1 Waterpassingen Ground Control Point grids

In 2020 zijn GCP-1 en GCP-8 ingemeten door middel van waterpassingen. In 2021 zijn de overige grids (GCP-2t/m7 en GCP-9) op deze wijze ingemeten. De waterpassingen van de GCP grids zijn aangesloten op naburige waterpas peilmerken. Middels extrapolatie van de geschatte waterpashoogtes van de peilmerken van de meest recente waterpascampagnes zijn de NAP hoogtes van de GCP grids bepaald op het moment van de LiDAR opname.

In (Terratec, 2021) 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-2. De gemiddelde hoogteverschillen op de GCP grids zijn voor alle grids kleiner dan 1.5 centimeter; voor 7 van de 9 GCP grids zijn de verschillen zelfs kleiner dan 1 centimeter. De standaarddeviatie van de hoogte verschillen ligt in de orde van 1-2 centimeter. De LiDAR resultaten van 2021 passen dus goed bij de Ground Control Point grids.

Control Surface	Average dZ	Minimum dZ	Maximum dZ (m)	Average magnitude		
	(m)	(m)		(m)	RMS	Std. Dev
GCP - 1	-0.014	-0.034	0.010	0.015	0.018	0.011
GCP - 2	-0.008	-0.025	0.014	0.011	0.013	0.010
GCP - 3	0.007	-0.018	0.041	0.011	0.015	0.013
GCP - 4	-0.011	-0.025	0.038	0.013	0.016	0.012
GCP - 5	-0.002	-0.050	0.031	0.012	0.016	0.016
GCP - 6	0.009	-0.025	0.036	0.013	0.016	0.014
GCP - 7	0.000	-0.035	0.032	0.011	0.014	0.014
GCP - 8	-0.005	-0.049	0.036	0.018	0.022	0.022
GCP - 9	0.007	-0.030	0.033	0.014	0.016	0.014

Tabel B-2: Vergelijking hoogtes LiDAR puntenwolk met Ground Control Point grids (uit Terratec, 2021).

B.3.2 InSAR metingen

Volgens het Meetplan Waddenzee 2021 zijn de vlakdekkende metingen op het vasteland (Lauwersmeer gebied) uitgevoerd door middel van InSAR metingen. In de InSAR techniek wordt gebruik gemaakt van een tijdserie van radar opnames met een satelliet. De resultaten zijn gerapporteerd in het Meetregister Lauwersmeer 2021 (NAM, 2021a).

De nauwkeurigheid van InSAR metingen is vergelijkbaar met die van waterpasmetingen. De dichtheid van InSAR metingen in ruimte en tijd is echter hoger. Door de hogere ruimtelijke dichtheid van InSAR meetpunten is een betere selectie van representatieve meetpunten mogelijk, en daardoor is de uit InSAR afgeleide bodembeweging minder gevoelig voor autonome bewegingen van enkele meetpunten. Door de hoge dichtheid in tijd is het verloop van de bodemdaling beter inzichtelijk.

Figuur B-7 geeft de deformatie tijdseries weer van zowel waterpaspeilmerken als InSAR meetpunten in een straal van 500 meter rondom de Ground Control Point grids. Alhoewel de horizontale locatie nauwkeurigheid van de InSAR meetpunten relatief laag is (voor Sentinel-1 meetpunten in de orde van 10 meter), is de precisie van InSAR deformatie metingen hoog (enkele mm, sub-cm). De kracht van InSAR ligt in de hoge dichtheid in ruimte en tijd van deformatiemetingen.

Figuur B-7 toont dat de bodembeweging bepaald uit InSAR en waterpassen overeenkomt binnen de nauwkeurigheidsmarges. Tevens laten deze tijdseries zien dat de deformatie van peilmerken (waarop de Ground Control Point grids worden aangesloten) ook aan kleine locale variaties onderhevig zijn. Door de hoge dichtheid in ruimte en tijd van InSAR is de relatieve correctie van de Ground Control Point grids ten tijde van de LiDAR opnames beter te bepalen op basis van InSAR data dan op basis van relatieve waterpassingen ten opzichte van waterpaspeilmerken.





Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2021) 11206685-004-ZKS-0003, 28 april 2022



Figuur B-7: Deformatie tijdseries waterpas peilmerken (zwart) en InSAR meetpunten (donkerblauw, lichtblauw en bruin voor respectievelijk de satellietmissies Envisat, Radarsat-2 en Sentinel-1) in een straal van 500 meter rondom de Ground Control Point grids.

B.3.3 Mogelijkheden voor uitbreiding Ground Control Points

Voor de uitbreiding van Ground Control Points is gekeken naar de mogelijkheden in combinatie met de InSAR techniek voor het monitoren van bodembeweging. Voor LiDAR is het gunstig dat de Ground Control Points zoveel mogelijk op vlakke oppervlakken liggen, zodat de LiDAR hoogtes binnen de horizontale positie nauwkeurigheid van de LiDAR reflecties zo goed mogelijk kunnen worden bepaald (dit geldt tevens voor de bepaling van de

relatieve correctie in opeenvolgende surveys). Om te kunnen corrigeren voor bodembeweging op basis van InSAR, moeten er reflecterende objecten of reflecterende grondbedekking aanwezig zijn in de directe omgeving. Daarom is gekeken of er vlakke oppervlakken beschikbaar zijn die door LiDAR bedekt worden, en waar tevens InSAR meetpunten aanwezig zijn. Hierbij is het concept van een regelmatig grid van meetpunten losgelaten, en is gekeken of er mogelijkheden voor Ground Control Point *clusters* zijn op basis van bestaande natuurlijke meetpunten.

InSAR meetpunten (Persistent Scatterers, PS) hebben een consistente reflectie in de tijd, en corresponderen voornamelijk met bebouwing in het terrein. Omdat voor de Ground Control Point clusters wordt gezocht naar vlakke oppervlakken, is in een GIS analyse is gekeken naar clusters van InSAR meetpunten die niet op en in de directe omgeving van panden liggen. Er blijven dan een gelimiteerd aantal locaties over, zoals het havengebied Lauwersmeer, NAM locaties (Ameland, Moddergat), en wegen op dijken en harde bedekkingen van dijken zelf, zie Figuur B-8. Het aantal meetpunten op en nabij wegen is beperkt omdat deze oppervlakken werken als een spiegel (zeker bij gladde bedekking) en er daarom geen duidelijke reflecties terugkomen naar de satelliet. Dijken zijn minder geschikt als Ground Control Point cluster, omdat het reflecterende deel vaak onder een helling ligt.

De LiDAR hoogtes van een Ground Control Point cluster kunnen relatief gecorrigeerd worden op basis van de gemiddelde bodemdaling in ruimte en tijd van alle InSAR meetpunten binnen een cluster. Een andere optie is om te corrigeren op basis van de bodemdaling die integraal berekend wordt uit alle geodetische metingen, zoals gerapporteerd in figuur 2-1 van de Meeten regelcyclus 2020 rapportage (NAM, 2021b). Dit opent tevens de mogelijkheid voor het gebruik van langwerpige Ground Control Point clusters, en kan tevens worden toegepast op de harde topografie punten.



Figuur B-8: Mogelijkheden voor uitbreiding Ground Control Points op basis van InSAR.

B.4 Harde topografie hoogtes

Wat betreft de harde topografie hoogtes, is er bij de bepaling van de correctie parameters op twee gebieden getracht de nauwkeurigheid nog verder te verbeteren:



- 1. 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, zijn verwijderd uit de bestaande set.
- De harde topografie hoogtes zijn gecorrigeerd voor de bodemdaling berekend uit geodetische metingen. Echter, omdat de topografie punten al geselecteerd zijn buiten de 2 cm bodemdalingscontour, is de verwachting dat dit slechts een marginale verbetering geeft voor een kleine subset van de punten.

In de berekening van de LiDAR correctie parameters in 2021 is al een afstand van 1 m van de wegkant geïmplementeerd.

De bodemdaling berekend uit geodetische metingen onder 2. is het ruimtelijk en temporeel gecorreleerde patroon op basis van een geodetische ruimte-tijd analyse zoals gerapporteerd in figuur 2-1 van de Meet- en regelcyclus 2020 rapportage (NAM, 2021b).

Vanuit het oogpunt dat harde topografie zoals paden en wegen niet diep gefundeerd is, aan verandering onderhevig kan zijn (e.g. opnieuw asfalteren), en locale veranderingen (vegetatie, (temporele) objecten) de LiDAR nauwkeurigheid kunnen beïnvloeden, is de behaalde relatieve nauwkeurigheid tussen de LiDAR opnames, zeker in de laatste jaren, hoog. Dit geldt zowel voor de Ground Control Point Grids (zie Tabel B-2), als voor de harde topografie hoogtes (zie paragraaf Berekening correctie parameters).

B.5 Keuze referentie survey

In Bijlage B in (Van der Vegt et al., 2021) is geconstateerd dat de histogrammen van de sediment grids en de Ground Control Point grids niet geheel gecentreerd rond 0 liggen, maar ca. 1-2 cm lager (zie Figuur B-9, dat enkele figuren uit dit rapport toont).



Figuur B-9: Figuren uit Van der Vegt et al., 2021. Hoogteverschillen (alle surveys van 2010 t/m 2020) LiDAR en geodetische metingen op sediment grids (links) en Ground Control Point grids (midden). De LiDAR hoogtes zijn gecorrigeerd naar de referentie survey van 2017. Rechts: verschillen tussen de hoogtes uit de 2017 LiDAR survey en de geodetische metingen (GNSS, waterpassen) op de sediment grids.

Omdat tevens voor de 2020 survey geconstateerd werd dat de histogrammen van de verschillen tussen ongecorrigeerde LiDAR hoogtes en de sediment en GCP grids beter rond 0 gespreid lagen dan de verschillen met de gecorrigeerde LiDAR hoogtes, is de overweging meegegeven om in deze Meet- en Regelcyclus de keuze voor de referentie survey te herzien.

De keuze van de referentie survey is opnieuw bepaald, en gericht op de passing met geodetische metingen op de sediment grids. Figuur B-10 toont een aantal histogrammen van de verschillen tussen LiDAR hoogtes en hoogtes bepaald op de sediment grids uit geodetische metingen. Hierbij moet rekening worden gehouden dat niet in iedere GNSS (GPS) campagne evenveel GNSS clusters worden ingemeten, en dat de metingen niet altijd tegelijkertijd met de LiDAR acquisities plaatsvinden en er daardoor variaties door de natuurlijke dynamiek van het Wad kunnen zijn.



Figuur B-10: Verschillen (m) tussen LiDAR hoogtes en hoogtes bepaald uit geodetische metingen (GNSS, waterpassen) op de sediment grids.

De nieuwe keuze voor de referentie survey is de acquisitie in voorjaar 2019. Zowel voor ongecorrigeerde als gecorrigeerde LiDAR metingen is de spreiding van de histogrammen van de hoogteverschillen met de geodetische metingen zo optimaal mogelijk rondom 0, zie Figuur B-11.



Figuur B-11: Hoogteverschillen (m) tussen ongecorrigeerde en gecorrigeerde LiDAR metingen en geodetische metingen op de sediment en GCP grids. Referentie survey 2019a (voorjaar 2019).

B.6 Berekening correctie parameters

De correctie parameters zijn voor de Meet- en Regel cyclus 2021 integraal bepaald op basis van de volgende sets punten (zie Figuur B-12):

- De sediment grids, gecorrigeerd voor bodembeweging middels de GNSS en waterpasmetingen tijdens de meetcampagnes op het Wad.
- De Ground Control Point grids (GCPs), gecorrigeerd voor bodemdaling door middel van InSAR en waterpasmetingen.
- Een selectie van harde topografie punten (zie Harde topografie hoogtes).
- Extra Ground Control Point clusters op basis van de InSAR meetpunten.

Voor de extra Ground Control Point clusters op basis van InSAR meetpunten is gekozen voor de locatie clusters Ameland en, Moddergat en voor het Lauwersmeer havengebied. Dit omdat het aandeel punten op wegen al relatief groot is in de puntenset voor de bepaling van de 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.



Figuur B-12: In donker grijs de selectie harde topografie punten en de extra Ground Control Point clusters zoals gebruikt in 2022. In groen de locaties van de Ground Control Point grids. In oranje de locaties van de sediment grids. De contouren geven de bodemdaling 2006-2020 weer volgens (NAM, 2021b).

De correctie parameters (zie Tabel B-3) 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, de sediment grids, de Ground Control Point grids, en de extra Ground Control Point clusters berekend.

Survey	а	b	с
2010a	0.0009	0.0015	-1.0771
2011a	0.0006	-0.0010	0.4656
2011b	0.0022	-0.0073	3.9405
2012b	0.0020	0.0022	-1.7289
2013b	0.0026	-0.0023	0.8648
2014a	0.0004	0.0012	-0.8052
2015a	0.0022	-0.0006	-0.0898
2015b	0.0019	-0.0021	0.8653
2016a	0.0007	0.0004	-0.4014
2016b	0.0011	0.0006	-0.6118
2017a	-0.0003	0.0009	-0.5136
2017b	0.0005	0.0007	-0.5562
2018a	0.0004	-0.0037	2.1952
2018b	0.0008	0.0032	-2.0529
2019a	0.0000	0.0000	0.0000
2019b	0.0006	-0.0016	0.8354
2020a	0.0013	0.0002	-0.3510
2021a	0.0000	0.0027	-1.6242

Tabel B-3: Berekende correctie parameters a, b en c ten opzichte van de referentie survey 2019a. Zie voor de toepassing de formule hierboven.

Deltares

82 van 87

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-13.



Figuur B-13: 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-14: Berekende constante verschuivingen ('shifts') en geschatte tilts ten opzichte van de referentie survey 2019a – nu zonder meeneming van de hoogteverschillen op de extra Ground Control Point clusters.

In tegenstelling tot de 2020 en 2021 analyses (referentie survey 2017a), zijn de shifts rondom 0 verdeeld nu 2019a als referentie survey is gekozen. Tevens is te zien dat de shifts van de laatste 3 surveys ten opzichte van 2019a minimaal zijn.

De correcties vallen wederom binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Er is wel een effect zichtbaar als naar de verdeling van hoogteverschillen in de histogrammen voor en na toepassing van de correctie parameters wordt gekeken, zie Figuur B-15. Na toepassing van de correctie parameters is het histogram van de hoogteverschillen van de 2021 survey ten opzichte van de referentie survey smaller verdeeld rondom 0.



Figuur B-15: Residuen hoogteverschillen (m) survey 2021a ten opzichte van 2019a, voor (links) en na (rechts) correctie.

Tabel B-4 geeft een overzicht van de parameters van de histogrammen van de gecorrigeerde hoogteverschillen ten opzichte van survey 2019a. Zowel de standaardafwijking, als de 16% en 84% percentielen (overeenkomend met 1o voor de normale verdeling) zijn aangegeven. De standaardafwijkingen van de hoogteverschillen liggen in de orde van 1-3 cm. De laatste twee kolommen geven de percentielen aan bij -3 en +3 cm. 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 puntdichtheid.

Survey	σ(cm)	16% percentiel (cm)	84% percentiel (cm)	percentiel (%) -3 cm	percentiel (%) +3 cm
2010a	2.4	-2.4	2.2	10	89
2011a	2.5	-2.6	2.4	13	91
2011b	2.0	-1.9	2.1	8	94
2012b	6.0	-2.6	2.2	13	92
2013b	1.7	-1.7	1.6	4	97
2014a	4.5	-2.4	2.0	11	91
2015a	2.4	-1.4	1.1	4	98
2015b	5.0	-2.1	1.6	7	96
2016a	2.9	-1.7	1.2	5	94
2016b	2.3	-2.1	2.0	8	93
2017a	1.7	-1.4	1.3	3	96
2017b	1.2	-1.2	1.1	0	99
2018a	1.7	-1.2	1.2	3	95
2018b	1.1	-1.0	1.1	0	99
2019a	0.0	0.0	0.0	0	0
2019b	1.1	-1.0	1.1	0	99
2020a	1.4	-1.3	1.3	1	97
2021a	1.3	-1.2	1.3	0	97

Tabel B-4: Overzicht parameters histogrammen gecorrigeerde hoogteverschillen ten opzichte van survey 2019a. Zowel de standaardafwijking als de 16% en 84% percentielen (overeenkomend met 1σ voor de normale verdeling) zijn aangegeven. De laatste twee kolommen geven de percentielen aan bij -3 en +3 cm.

85 van 87

B.7 Referenties

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

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

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

NAM (2021b) Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2020, 5/2021, EP202104200793

Terratec (2021) Project report 'Waddenzee - LiDAR acquisition for 2021'.

Commissie MER (2021) Monitoring aardgaswinning onder de Waddenzee vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen; Advies Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2020

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.



www.deltares.nl

Handtekening:

Jun

E-mail: helena.vandervegt@deltares.nl

Handtekening:

E-mail: ad.vanderspek@deltares.nl

Handtekening:

Pog.

E-mail: toon.segeren@deltares.nl