Deltares

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020)



Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020)

Auteur(s) Helena van der Vegt Marlies van der Lugt

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020)

Opdrachtgever	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
Contactpersoon	mevrouw G Ketelaar
Referenties	
Trefwoorden	Monitoring gaswinning, Friesche Zeegat, Zoutkamperlaag, Pinkegat, LiDAR

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	29-04-2021
Projectnummer	11206685-000
Document ID	11206685-000-ZKS-0004
Pagina's	69
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Helena van der Vegt	
Marlies van der Lugt	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Helena van der Vegt	Zheng Wang	Toon Segeren	
	Marlies van der Lugt	Ad van der Spek	C	
1.0	Helena van der Vegt	Zheng Wang	Toon Segeren	
	Marlies van der Lugt	Ad van der Spek	d	

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 de morfologische analyse uit voor het monitoringsprogramma. Deze resultaten worden gerapporteerd in het kader van het hand-aan-de-kraan principe en voorgelegd aan de Commissie 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 tweemaal per jaar worden ingewonnen. De huidige studie is een update van de monitoringsstudie, die sinds 2010 word uitgevoerd, met toevoeging van een nieuwe LiDAR opname uit 2020.

De hoofdonderzoeksvraag van deze studie luidt: "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 worden de volgende drie onderliggende onderzoeksvragen behandeld:

<u>1. Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?</u> Het plaatgedrag in de deelgebieden binnen de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag, laat grote variaties zien. Op de schaal van het 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. 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 deze het grootst moeten zijn in het gebied waar de meeste diepe bodemdaling verwacht wordt, ten zuiden van Ameland-oost. Hoewel op deze locatie een gemiddelde afname van de plaathoogte is geconstateerd, is de grootste daling van plaatoppervlak niet hier waargenomen. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen en de daar bijbehorende sedimenttransport leidt tot veranderingen in plaathoogte die het effect van bodemdaling op lokale schaal kunnen versluieren. Een eenduidig bodemdalingssignaal in de morfologie komt niet naar voren uit de LiDAR dataset.

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

Verschillende correlaties komen naar voren tussen hydrologische en meteorologische condities en verandering in plaatareaal. Tot dusver is de enige correlatie die significant lijkt, een negatieve correlatie tussen het plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat en stormachtigheid in de maand voorafgaand aan de opname. Stormachtigheid wordt berekend op basis van windstatistieken. We verwachten dat deze en mogelijk andere correlaties steeds duidelijker zullen worden naarmate het aantal LiDAR opnamen in de dataset groeit, waarmee

de sedimentdynamiek en de invloed op het plaatgedrag in het studiegebied inzichtelijk kan worden.

Aanbevelingen

De laatste jaren is veel gedaan om de kwaliteit van de LiDAR monitoring en analyse van deze gegevens te optimaliseren. In 2021 werd door NAM een tweede iteratie uitgevoerd op de methodiek waarmee de referentievlakcorrectie wordt bepaald. Het is aan te bevelen om deze referentievlakcorrectie toe te voegen aan de standaardprocedure. Voor het toepassen van de correctie en het opwerken van de LiDAR dataset worden Ground Control Points (GCPs) gebruikt, welke eens in de 3-6 jaar worden ingemeten. De peilmerkhoogtes waaraan de GCP hoogtes gekoppeld zijn komen goed overeen met de mediane InSAR tijdserie van het onderzoeksgebied. Het advies is 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 de naburige peilmerken. In de toekomst kunnen deze hoogtes vanuit de InSAR data afgeleid worden; alleen bij afwijkingen van de trend in de InSAR data dienen de betreffende GCPs opnieuw te worden ingemeten. Verder adviseren we om in het volgende monitoringsrapport een kwantitatieve vergelijking te maken tussen de berekende bodemdaling in het gebied en de morfologische veranderingen van het systeem. Het doel is om te kwantificeren hoe bodemdaling zich verhoudt met de natuurlijke morfodynamiek.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1 1.1.1 1.1.2	Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2019 Status kennis morfologische ontwikkeling in de Friesche Zeegat	9 9 10
1.2	Onderzoeksvragen	10
1.3	Aanpak en leeswijzer	10
2	Verwerking LiDAR data	12
2.1	Beschrijving opnamen 2020	12
2.2 2.2.1 2.2.2 2.2.3	Opwerkingsprotocol LiDAR opwerking Correctie systematische afwijkingen referentievlak Data overzicht	13 13 13 13
3	Analyse areaalontwikkeling	18
3.1	Kombergingsgebieden	18
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)	19 20 21 22
3.3	Langetermijntrends	25
3.4	Conclusies areaalontwikkeling	28
4	Analyse ontwikkeling plaathoogte	30
4.1	Hypsometrie kombergingsgebieden	30
4.2	Hypsometrie individuele platen	31
4.3	Tijdsgemiddelde ontwikkeling	39
4.4	Profielen	40
4.5	Conclusies plaathoogte ontwikkeling	43
5	Invloed hydrologische en meteorologische condities	44
5.1	Invloed condities tijdens inwinning	44
5.2	Invloed stormachtigheid tussen opnamen	46
5.3	Conclusies	50
6	Vergelijking met spijkermetingen	52
7	Conclusies en aanbevelingen	54

7.1	Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?	54
7.2	In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargend veranderingen in morfologie?	omen 54
7.3	Wat heeft de natuurlijke dynamiek aangedreven?	55
7.4	Aanbevelingen	55
8	Referenties	56
Α	Overzicht vluchtgegevens	57
в	NAM rapportage datareeks correctie	60
Samenv	ratting 60	
B.1	Introductie	60
B.2	Berekening correctieparameters	61
B.3	Evaluatie op de sediment grids en de Ground Control Point grids	64
B.4	Evaluatie harde topografie hoogtes	66

1 Inleiding

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het gebied rond het Friesche Zeegat. Bij Ameland vindt deze winning vanaf 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 bodem van enkele millimeters per jaar (Figuur 1-1).



Figuur 1-1 Totale bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2020) door gaswinning sinds 1987. In blauw: contouren van de geomechanische modellering. De gestreepte contouren geven de bodemdaling op 1-1-2019 volgens de M&R-rapportage over 2018. Boven de gasvelden Ameland-Oost, Nes/Moddergat en Anjum zijn op 4 posities continue GPS-metingen uitgevoerd sinds 2007 (rode driehoek) (NAM, 2020)

Voor 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 2020. Leidend in deze rapportage is de vraag of de morfologie van de wadplaten gevolgen ondervindt van de diepe bodemdaling door gaswinning.

De morfologische analyse is gebaseerd op de hoogteontwikkeling van het droogvallend wad in het Friesche Zeegat. Deze ontwikkeling wordt afgeleid uit een reeks LiDAR opnamen van het gebied die sinds 2010 één- tot tweemaal per jaar worden ingewonnen. Sinds het vorige rapport (van der Lugt et al., 2020a) is één nieuwe opname uit oktober 2020 toegevoegd aan deze dataset.

1.1 Status waargenomen ontwikkeling Friesche Zeegat

Bestaand onderzoek naar de morfologische ontwikkeling 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 belangrijkste namen van geulen en platen in het Friesche Zeegat weergegeven in Figuur 1-2.



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

1.1.1 Status waargenomen ontwikkeling uit LiDAR monitoring tot en met 2019

Van der Lugt et al. (2020a) constateerden dat over de meetperiode 2010-2019 zowel in het kombergingsgebied Pinkegat als in de Zoutkamperlaag de veranderingen in plaatareaal binnen de foutmarge van de metingen blijven.

Verder werd door Van der Lugt et al. (2020a) een correctiemethode onderzocht die eerder geconstateerde (van der Lugt et al. 2019) systematische hoogteverschillen bij harde oppervlakten zou kunnen wegfilteren. Door toepassing van de correctie zijn de meetfouten beter normaal verdeeld en de geconstateerde areaalveranderingen bleken beter te interpreteren. Voor dit rapport werd in 2021 een revisie op de correctiemethoden gedaan, inclusief gevoeligheidsanalyse voor meegenomen punten.

Ook bleek door de referentievlakcorrectie het verwachtte verband tussen stormachtigheid en plaatareaalveranderingen vast te stellen voor het kombergingsgebied Pinkegat. In eerdere rapportages werd dit verband telkens niet gevonden, waarschijnlijk omdat het effect van de systematische fout in de hoogteverschillen dominant was. Omdat correlatieanalyse voor een tijdreeks zo kort als de LiDAR dataset erg gevoelig is voor uitschieters, moet de correlatieanalyse iedere jaar opnieuw worden uitgevoerd met de nieuw toegevoegde data om vertrouwen te krijgen in de geconstateerde verbanden.

1.1.2 Status kennis morfologische ontwikkeling in de Friesche Zeegat

Het 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 ook de plaatdynamiek in het gebied. 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 plaat. De platen in het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag zijn veel stabieler. Onder de plaat Brakzand is zelfs nog een veenlaag aanwezig, wat impliceert dat deze plaat nog nooit 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 Onderzoeksvragen

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

Om deze vraag te beantwoorden behandelen we drie onderzoeksvragen:

- Zijn plaatareaal en -hoogte veranderd sinds het begin van de LiDAR metingen?
- In welke mate kan bodemdaling worden aangetoond als oorzaak van de waargenomen veranderingen in morfologie?

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

Verder zijn de volgende methodologische vragen onderzocht:

- Leiden verbeteringen van de referentievlakcorrectie wederom tot een betere interpretatie van de LiDAR resultaten?
- In welke mate sluiten de LiDAR metingen in het gebied ten zuiden van Ameland-oost aan op de spijkermetingen?

1.3 Aanpak en leeswijzer

Voor de interpretatie van de NAM meetreeks is de 2020 opname opgewerkt volgens het standaard protocol (zie Van der Lugt et al. (2019), van der Lugt et al. (2020a)). Hierbij is ook het nieuwe correctievlak meegenomen, zoals uitgewerkt door de NAM (zie van der Lugt et al. (2020a) en Bijlage B van dit rapport). Dit is uitgewerkt in Hoofdstuk 2. Omdat de voorgestelde correctieberekening iets is aangepast ten opzichte van Van der Lugt et al. (2020a), worden dit jaar een aantal analyseresultaten zowel mét als zonder correctie gerapporteerd. Hoofdstuk 3 beschrijft de analyse van de ontwikkeling van het plaatareaal boven NAP-0.5m, alsook de aansluiting van de data op de Rijkswaterstaat vaklodingen dataset. Uit de

hypsometrische curven kan dan worden afgelezen hoe de sedimentverdeling in de verticaal vanaf NAP-0.5m verandert. Deze curven worden besproken in Hoofdstuk 4, samen met verdere analyse van hoogteverdeling en verandering van plaatgebieden. Hoofdstuk 5 bespreekt de correlatie van de ontwikkeling van het plaatareaal in de verlengde meetreeks, met gecorrigeerde referentievlakken, met meteorologische factoren. In Hoofdstuk 6 wordt een vergelijking wordt gemaakt tussen de LiDAR data en de spijkermetingen in het gebied ten zuiden van Ameland-Oost. Tenslotte worden in Hoofdstuk 7 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

2 Verwerking 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 2020

LiDAR opnamen van de Friesche Zeegat zijn in 2020 wederom door Terratec ingewonnen. In 2020 is geen voorjaarsopname ingewonnen in verband met de COVID-19 pandemie. De najaarsopname vond plaats op 3 oktober 2020. Terratec (2020) beschrijft het vliegplan, de vlakdekking, puntendichtheid en de kwaliteitscontrole. Om het inplannen van de winning binnen één getijdevenster eenvoudiger te maken, is de vluchthoogte verder aangepast ten opzichten van 2018 (1250m) en 2019 (1500m) naar 1750m 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. Van der Lugt et al. (2019) maakt duidelijk dat voor de controle van waterstanden in het zuidwestelijke hoek van het projectgebied de waterstanden bij station Holwerd ook relevant zijn. De opname in oktober 2020 viel niet helemaal binnen het getijvenster bij station Holwerd (Figuur 2-1). Dit was geen probleem omdat de vlieglijnen van noord naar zuid zijn ingewonnen en de zuidwestelijke hoek in het eerste uur niet werd opgenomen.

Uit Figuur 2-2 wordt duidelijk dat de vlakdekking van de data goed was in de 2020 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).

12 van 69 Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021



Figuur 2-2 Hoogtekaart van de ingewonnen data in najaar 2020, na toepassing van correctievlak.

2.2 Opwerkingsprotocol

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 waar uit de rapportage blijkt dat buiten het getijvenster is gevlogen (niet toegepast op 2020 data m.b.t. het getijvenster bij Holwerd omdat het geen zichtbaar effect had op opnamen).
- Mediaan van LAS punten binnen roostercel bepalen op standaard 1x1m, 10x10m en 20x20m rooster, waarbij geen minimale hoeveelheid punten wordt aangehouden.

Deze hoogtebeelden vormen de originele, niet ingevulde dataset.

2.2.2 Correctie systematische afwijkingen referentievlak

NAM hanteert de hoogtekaarten op 1x1m van alle opnamen 2010-2020 als basis voor de afleiding van een correctie van systematische afwijking in het referentievlak. Dit jaar is de totstandkoming van de referentievlakcorrectie op gevoeligheden onderzocht en is met name de selectie van punten aangescherpt. 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 (veelal aan de rand van het monitoringsgebied) aan de hand van de volgende criteria:
 - a. minder dan 2 cm bodemdaling ondergaan sinds het begin van de winning
 - b. verder dan 1 m van de kant van de weg
 - c. weglating van punten met een standard deviatie door de tijd hoger dan 5 cm.
- Voor elke opname is de LiDAR hoogte op deze punten geëxtraheerd uit de 1-m roosters, deze set is Y_{Lidar}(t) genoemd.
- Voor de jaren waar sedimentgridmetingen zijn ingewonnen zijn deze toegevoegd aan de LiDAR hoogtemetingen, alsook Ground Control Point (GCP) metingen:
 Y(t) = Y_{Lidar}(t) ∪ Y_{sedgrid}(t) ∪ Y_{GCP}(t).

- Voorjaar 2017 (dataset 2017a) is gekozen als referentiemeting, omdat dit een opname is met veel sedimentgridmetingen en de residuen ten op zicht van de andere metingen relatief laag zijn. Ook was de gemiddelde laagwaterstand tijdens deze meting zeer laag.
- Voor ieder jaar t ∈ T is voor alle punten in de set Y het verschil met de 2017a opname berekend: ε(t) = Y(t) − Y_{2017a}.
- 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.

survey	а	b	c	
2010a	.010a 0.00019		-1.9466	
2011a	-0.00034	-0.00215	1.3793	
2011b	0.00246	-0.01043	5.82441	
2012b	0.00145	0.00103	-0.90644	
2013b	0.00205	-0.00169	0.62275	
2014a	0.00065	-0.00033	0.09199	
2015a	0.00198	-0.00199	0.81073	
2016a	0.0013	-0.00004	-0.22085	
2016b	0.00051	0.00174	-1.15788	
2017a	0	0	0	
2017b	17b 0.00009 0.000		-0.5231	
2018a	0.00064	-0.00358	2.07161	
2018b	0.00011	0.00303	-1.80967	
2019a	-0.00009	-0.0003	0.21119	
2019b	0.00055	-0.00186	1.02634	
2020b	0.001	0.00092	-0.73981	

Tabel 2.1 Voorgestelde correctievlak coëfficiënten per survey

Figuur 2-3 toont de voorgestelde correctievlakken om deze beter te kunnen interpreteren. De voorjaarsmeting wordt aangegeven met een achtervoegsel a, een najaarsmeting met b. Voor de opname 2017a 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 2017a, en andere juist verhoogd. In veel opnamen valt op dat positieve afwijkingen (blauwe kleuren) domineren in het beeld. Deze jaren liggen ten opzichte van 2017a dus hoger en worden door de correctie naar beneden bijgesteld. Verder blijkt bijvoorbeeld voor opnamen 2011b en 2015a een rotatie-as duidelijk anders dan Noord-Zuid of Oost-West te bestaan.

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 alle opnamen gemiddeld genomen hoger liggen dan opname 2017a. Dat betekent dat alle opnamen door de correctie gemiddeld genomen naar beneden worden bijgesteld, variërend met 0 tot 5 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 het tweede paneel. 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 2011b). Eenzelfde analyse is gemaakt voor de noordrand en de zuidrand (onderste paneel). Ook hier is voor opname 2011b het verschil tussen de twee randen het grootst, zo'n 13 cm. Deze getallen komen kwalitatief overeen met de analyse van vorig jaar, met voornamelijk voor veranderingen in de O-W shift. De precieze getallen verschillen tussen de twee analysen omdat de Ground Control Points niet zijn meegenomen in de analyse van vorige jaar, en enkel voor kwaliteitscontrole werden gebruikt. De keuze van de set controlepunten heeft dus enige invloed op de berekende foutenvlakken. Een verdere beschouwing hiervan is te vinden in Bijlage B.



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.



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, net als in Van der Lugt et al. (2020a), 2 datasets gebruikt:

- de gecorrigeerde hoogtekaarten
- de originele hoogtekaarten

In analysen van areaal en hypsometrie worden er, net als eerder in Van der Lugt et al. (2020a) resultaten mét en zonder referentievlakcorrectie met elkaar vergeleken. Dit wordt gedaan omdat de correctiemethode dit jaar iets is aangepast door ook de GCPs mee te nemen. Binnen beide datasets bestaan ook nog roostercellen waar in sommige jaren geen LAS punten in zijn gevallen en dus geen waarde toegekend hebben gekregen.

In recente jaren is het aantal lege roostercellen sterk gereduceerd. Voor de berekening van tijdreeksen van areaal en hypsometrie zijn deze kaartbeelden nog opgevuld door middel van lineaire driehoeksinterpolatie. Voor de analyse van tijdsgemiddelde ontwikkelingen (de totale hoogteveranderingen per roostercel gemiddeld over het aantal jaren) en dwarsdoorsneden worden de niet-opgevulde hoogtebeelden gebruikt.

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 2020 naar Figuur 2-2.

3 Analyse areaalontwikkeling

In dit hoofdstuk rapporteren we veranderingen in plaatareaal voor zowel de kombergingsgebieden als individuele platen uit de LiDAR opnamen van 2010 tot en met 2020. Ook plaatsen we deze 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. De onzekerheidsmarge die nog aanwezig is, ook na de correctie, is onderzocht door NAM door middel van een analyse van de parameters van histogrammen (standaardafwijking en percentielen) van hoogteverschillen op harde topografie en sedimentgrids, zie Bijlage B en Van der Lugt et al. (2020a).



Figuur 3-1 Analysepolygonen voor areaalontwikkeling op kombergingsschaal

De correctie op de dataset leidt gemiddeld gezien tot een verlaging van het plaatareaal voor de Zoutkamperlaag ten opzichte van de ongecorrigeerde tijdserie. Dit is geen daadwerkelijke verlaging van het wad, de correctie heeft er alleen voor gezorgd dat we de opnamen onderling beter kunnen vergelijken.

Voor het Pinkegat blijkt dat een 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 geleidelijker. De correctie verwijdert niet alle 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. De tijdreeks, zowel gecorrigeerd als origineel, laat zien dat de areaalontwikkeling binnen de onzekerheidsband valt.



Figuur 3-2 Tijdsreeksen van plaatareaal boven NAP -0.5m voor de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag (boven) en Pinkegat (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 kombergingsgebied-geaggregeerd niveau 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 individueel plaatniveau vindt wel degelijk ontwikkeling plaats, die ook met de LiDAR opnamen waar te nemen is. 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

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020)

11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021

3.2.1 Pinkegat kombergingsgebied (A-F)

De areaalontwikkeling van individuele platen in het Pinkegat wordt gepresenteerd in Figuur 3-4. Deelgebied A ten zuidoosten van Ameland is zo gekozen dat deze de spijkermeetpunten omvat waar de gemeten sedimentatie de diepe bodemdaling niet compenseert. Een uitgebreide vergelijking tussen de spijkermetingen en LiDAR data volgt in Hoofdstuk 6. In deelgebied A schommelt het plaatareaal sterk, met grote onzekerheid, maar het areaal blijft gemiddeld genomen constant. 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.



A: Ameland zuidoost

20 van 69 Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021



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.

3.2.2 Wantij tussen Pinkegat en Zoutkamperlaag (G, H)

De fluctuatie van het plaatareaal op het Wierumerwad (G, Figuur 3-5), blijft steeds binnen de meetonzekerheid. Het areaal van de Engelsmanplaat (H, Figuur 3-5) krimp licht. Uit kaarten van LiDAR metingen blijk dat dit een gevolg is van de uitbochting van de geul ten westen van deze plaat, onderdeel van de natuurlijke morfologische dynamiek.



Figuur 3-5 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor platen op het Wierumerwad en de Engelsmanplaat (G-H in Figuur 3-3). De 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.

3.2.3 Zoutkamperlaag (I-R)

De platen in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag vallen buiten het bodemdalingsgebied en wordt 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 fluctuaties binnen onzekerheidsmarge. De arealen van enkele kleinere platen nemen licht af (N, Q), maar de afnames vallen vooralsnog binnen de onzekerheidsmarge.



22 van 69 Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021



Deltares

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021

23 van 69



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.

3.3 Langetermijntrends

Naast de opnamen van het Friesche Zeegat die in opdracht van NAM sinds 2010 worden gemaakt, zijn er ook opnamen door Rijkswaterstaat 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 ge-extrapoleerd. 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 weer gegeven 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 Vakloding 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 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).

Voor het Pinkegat en Engelsmanplaat spreken de Vaklodingen een mogelijke trend in de NAM opnamen tegen: het areaal op NAP-0.5m in 2019 is groter dan in 2012, maar wel binnen de onzekerheidsmarges. Voor de Zoutkamperlaag is in beide datasets geen verschil van plaatareaal tussen de twee jaren waar te nemen. Vaklodingen voor plaatgebieden zijn eveneens gebaseerd op LiDAR opnamen. Naast inherente verschillen in de opwerking van LiDAR beelden door verschillende meetdiensten, kan dit ook veroorzaakt zijn door een ander inwinningsmoment of het verschil in resolutie tussen de Vaklodingen en de NAM LiDAR 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.

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 3-3) en de plaat in deelgebied Pinkegat oost-2 (F, Figuur 3-3) 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 2020. De opname in 2020 laat een kleine afname van het plaatareaal in de Zoutkamperlaag zien, ook geheel binnen de onzekerheidsmarge.

De voorgestelde 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 een verklaring voor de sprong in het gerapporteerde plaatareaal dat in de voorgaande rapportage was waargenomen tussen 2014 en 2015. De correctie suggereert dat deze verandering geen sprong tussen twee opnamen betrof, maar een meer geleidelijke ontwikkeling betrof.

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 kan 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. De voorgestelde correctie op de data verbetert deze aansluiting wel voor de vergelijking van observaties in 2012, maar niet voor 2019. Omdat de Vaklodingen datareeks een grotere onzekerheidsmarge heeft dan de NAM dataset, zegt dit niets over de geschiktheid van de correctie van de NAM datareeks.

4 Analyse ontwikkeling plaathoogte

De ontwikkeling van plaathoogte in de Friesche Zeegat wordt op een aantal manieren onderzocht. Hypsometrische curven geven de cumulatieve areaalverdeling in relatie tot de hoogte (dat wil zeggen, het verdeelt voor iedere referentiehoogte de totale oppervlakte van een gebied in een water- en een grondoppervlakte). Ze geven het totale overzicht van sedimentverdeling over de verticaal, en zijn dus veelzeggender dan tijdreeksen op NAP-0.5m alleen. Een trend van hoogteverandering per roostercel, bepaald uit de hele tijdreeks, wordt vergeleken met de gebiedsgeaggregeerde hypsometrie om zo de oorzaak van veranderingen in de hypsometrie beter te verklaren. Daarnaast worden een aantal profielen (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). Ongeveer de helft van het plaatareaal boven de NAP-0.5m in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag ligt ook boven NAP+0m, de andere helft ligt onder NAP+0m. In het kombergingsgebied Pinkegat is de verhouding ongeveer 25% boven NAP+0m, en 75% daaronder.

De originele dataset van het kombergingsgebied Pinkegat vertoont geen duidelijke ontwikkeling van de hypsometrische curves door de tijd heen. De voorgestelde correctie schoont het beeld van het Pinkegat op en suggereert dat de hoogteligging van de platen door het gehele gebied gemiddeld genomen licht is afgenomen (blauwe curves voor de eerdere opnamen liggen hoger dan de oranje/rode curves voor de meest recente jaren).



Figuur 4-1 Hypsometrische curven voor het Pinkegat kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij de 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 originele data (links) en de gecorrigeerde data (rechts) worden vergeleken.

De referentievlakcorrectie leidt er ook toe dat de hypsometrische curven van de Zoutkamperlaag duidelijker op elkaar liggen. Uit de curven van de originele dataset is het verloop door de monitoringsjaren niet duidelijk te onderscheiden. De kleuren lopen door

30 van 69 Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021

elkaar heen en geven enkel een soort bandbreedte (verschil tussen maximum en minimum waarden per areaalwaarden op de x-as) weer. Deze bandbreedte in het interval NAP-0.25 tot NAP+1m is gereduceerd. De gecorrigeerde data geven een consistent beeld van een veel constanter plaatareaal dan het Pinkegat. Tussen NAP-0,5m en NAP+0m ligt blauw boven rood en is er dus een geringe afname in hoogte, terwijl boven NAP+0m rood boven blauw ligt en er dus een geringe hoogtetoename optreedt.

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 en Oost, 2020). Hierdoor is het dus ook mogelijk dat de waargenomen lichte verlaging van de plaathoogtes onderdeel uitmaakt van deze periodieke gedrag.



Figuur 4-2 Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij de 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 originele data (links) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).

4.2 Hypsometrie individuele platen

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

Uit de areaalontwikkeling van platen boven NAP -0.5m leidden we af dat de bodemdaling 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. Een vergelijking met spijkermetingen in het gebied volgt in hoofdstuk 6. De correctie maakt het signaal van de deelgebieden visueel consistenter. Uit de originele datasets zijn conclusies minder duidelijk te trekken.

De drie platen tegen het wantij in het westen (B, C, D), liggen voornamelijk onder NAP+0m en laten zowel een duidelijke verlaging (B) of 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

31 van 69

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. Het signaal van de plaatveranderingen bij de individuele platen is veel groter dan die voor het gehele kombergingsgebied. Hierdoor heeft de datacorrectie minder invloed op de interpretatie van de hypsometrische curves van de deelgebieden.



A: Ameland zuidoost



B: Pinkegat west-1



C: Pinkegat west-2



F: Pinkegat oost-2

Figuur 4-3 Hypsometrische curven voor de platen van het Pinkegat kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij de 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 originele data (links) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).

Zoals ook al is gerapporteerd door Van der Lugt et al. (2020a), 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. Een vergelijking met spijkermetingen wordt besproken in Hoofdstuk 6.



G: Wierumerwad

H: Engelsmanplaat



Figuur 4-4 Hypsometrische curven voor de platen tussen de Pinkegat en Zoutkamperlaag kombergingsgebieden. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij de 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 originele data (links) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).

Voor de volledigheid beschouwen we hier ook de platen binnen de Zoutkamperlaag (Figuur 4-5). Individuele platen welke onderdeel vormen van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag vertonen wisselend gedrag. Bijvoorbeeld voor de Kuipersplaat (I) is het signaal van plaatveranderingen veel sterker dan die van het gehele kombergingsgebied. Hierdoor heeft de datacorrectie minder invloed op de interpretatie van de curves. De platen tussen Eilanderbult en Paesens (J), alsook Rode Hoofd (O) vertonen een lichte groei in hoogte tussen NAP-0.5m en NAP+1m. In tegenstelling hiermee, vertonen Schiermonnikoog zuid-1 (K), Grote Siege Zuid (N) en Zoutkamperlaag zuidoost-1 (Q) groei in hoogte boven NAP+1m en een afname in hoogte tussen NAP-0.5m en NAP+1m.

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



37 van 69Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020)11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021



 38 van 69
 Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020)

 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021



Figuur 4-5 Hypsometrische curven voor de platen in het Zoutkamperlaag kombergingsgebied. A op de horizontale as is de wateroppervlakte horende bij de 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 originele data (links) wordt vergeleken met de gecorrigeerde data (rechts).

4.3 Tijdsgemiddelde ontwikkeling

Om hoogteveranderingen per roostercel te laten zien is het jaargemiddelde van 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.

Tijdsgemiddelde bodemhoogteveranderingen zijn weergegeven in Figuur 4-6. In Van der Lugt et al. (2020a) en uit de analyse in dit rapport (paragraven 4.1 en 4.2) wordt duidelijk dat de correctie van de dataset de tijdsgemiddelde trends niet verandert, maar de veranderingen meer geleidelijk in tijd laten verlopen. We beperken ons daarom tot het analyseren van de tijdsgemiddelde ontwikkeling in de gecorrigeerde dataset.

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 oever van de Engelsmanplaat leidt. Een oostwaartse migratie vindt plaats voor de meerderheid van de platen in de Zoutkamperlaag. 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 4-9). Een lichte afname in plaathoogte is ook op te merken in de platen ten Zuiden van Ameland-oost, het midden van de Engelsmanplaat en zeer geringe afnamen op het Wierumerwad.

R: Zoutkamperlaag zuidoost-2



Figuur 4-6 De gemiddelde verandering in bodemhoogte zoals berekend per roostercel op basis van de tijdserie 2010-2020 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 bevestigen we conclusies uit de geaggregeerde data. De spikes die zich in de dwarsdoorsneden op basis van eerdere opnamen bevinden zijn artefacten van het gehanteerde opwerkingsprotocol: dit betreft uitschieters van LAS punten die niet zijn uitgemiddeld omdat de datadichtheid laag was in de eerste LiDAR opnamen . Wanneer er maar één zo'n afwijkend LAS punt beschikbaar is in een roostercel, wordt dit de waarde van de hele cel. Aangezien het volume onder deze uitschieters klein is, beïnvloedt dit het resultaat van de analyse niet sterk.

De platen in het westelijk deel van het kombergingsgebied Pinkegat liggen grotendeels lager dan de ondergrens van de LiDAR opnamen (NAP -0.5m, zie fig. 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. De laatste jaren lijkt er een plaat te ontwikkelen op ca. 3000 m langs de dwarsdoorsnede van het kombergingsgebied Pinkegat. We zien dus ook in deze profielen dicht bij de wantijen dat de verhouding plaatareaal versus geulareaal verschilt tussen de twee kombergingsgebieden, net zoals de hypsometrische curven dat ook laten zien. Profielen op basis van vaklodingendata laten ook zien hoe de geulen en platen zich ontwikkelen over de laatste 30 jaar (Figuur 4-8). 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 4-9).



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 2020b (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 Profielontwikkeling ten oosten van het wantij van Ameland (boven), in de buurt en ten westen van het wantij van Schiermonnikoog (onder) op basis van de vaklodingendataset uit Oost et al. (2020).

42 van 69 Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021



Figuur 4-9 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 2020b (rood). De magenta lijn op het referentiefiguur geeft de locatie van de profielen aan; de stip komt overeen met het begin van het profiel.

4.5 Conclusies plaathoogte ontwikkeling

Uit de hypsometrische curven blijkt de invloed van de voorgestelde correctie duidelijker dan uit de tijdreeksen van areaalontwikkeling. De interpretatie van de curven wordt door de voorgestelde correctie eenduidiger, en is daarom een verbetering van de methode. De hypsometrische curven ondersteunen de conclusies die kunnen worden 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 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 is deze afname niet groter dan de meetonzekerheid.

Voor deelgebieden en individuele platen binnen het Pinkegat kan wel een afname van met name het lagere plaatareaal vastgesteld worden, waarbij deelgebied B het sterkst omlaag gaat (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 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 het een gevolg zou zijn van diepe bodemdaling. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen leidt tot veranderingen in plaathoogte die de effecten van bodemdaling versluieren. Een eenduidig bodemdalingssignaal komt dus niet naar voren uit de LiDAR dataset.

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021

Invloed hydrologische en meteorologische condities

Schrijvershof et al. (2018) en 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. De gecorrigeerde areaalveranderingen bleken voor het kombergingsgebied Pinkegat een statistisch significant verband te hebben met stormachtigheid. De correlatie met stormachtigheid bleek het sterkst wanneer de indicatoren werden berekend over het hele interval tussen twee opnamen (Pinkegat) of de laatste 3 maanden van het interval (Zoutkamperlaag). Voor de analyse van het verband tussen heersende condities en gemeten plaatareaal berekenden Van der Lugt et al. (2020a) verschillende correlatiecoëfficiënten voor de twee referentiehoogten NAP+0m en NAP-0.5m.

Onderzoeksvragen voor de analyse zijn:

- Zijn er correlaties tussen condities tijdens datainwinning en de plaatareaal?
- Zijn er correlaties tussen de condities tussen de opnamen en de plaatareaal?

Voor het kwantificeren van de correlatie tussen areaalverandering en meteorologische condities gebruiken we de Pearson correlatiecoëfficiënt. De waarden van deze coëfficiënt varieert tussen -1 en +1, waarbij -1 een sterk negatieve correlatie en +1 een sterk positieve correlatie aanduid, 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 16 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 16 datapunten ligt de significantiegrens voor de Pearson correlatiecoëfficiënt ongeveer op 0.5. Dat betekent dat voor deze dataset er minder dan 5% kans bestaat dat het geconstateerde verband willekeurig is wanneer de correlatiecoëfficiënt boven 0.5 (of onder -0.5) 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 is pas bereikt met 90 datapunten.

5.1 Invloed condities tijdens inwinning

Voor vier fysische indicatoren (zie van der Lugt et al. (2020a) voor selectie en Tabel 5.1 voor de gehanteerde definities) werd onderzocht of er een correlatie bestaat tussen hun waarden tijdens de inwinning en het uiteindelijk gemeten plaatareaal. Indicator W voor windsnelheid is berekend uit de potentiële wind tijdreeksen (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 5-1.

Tabel 5.1 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van het gemeten areaal.

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



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

In Figuur 5-2 zijn zowel de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten geplot tussen de indicatoren en 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. De gemiddelde windsnelheid vlak voor en tijdens de meetcampagne kan dus leiden tot een kleinere gemeten plaatareaal boven NAP-0.5m in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Deze correlatie is iets afgenomen in vergelijking met gerapporteerde waarde van -0.56 in Van der Lugt et al. (2020). Deze correlatie bestaat ook voor het kombergingsgebied Pinkegat, maar die correlatie is lager en valt niet binnen de significantiegrens. De eerder gerapporteerde correlatie tussen hoogwater en plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat is ook afgenomen en valt nu net onder de significantiegrens, 0.49 en 0.46 respectievelijk voor plaatareaal boven NAP -0.5m en NAP+0m.



Figuur 5-2 Pearson correlatiecoëfficiënten voor het verband tussen gemeten arealen en hydrologische en meteorologische indicatoren tijdens het inwinnen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0.5.

5.2 Invloed stormachtigheid tussen opnamen

Voor vier windsnelheidsindicatoren (zie Tabel 5.2 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

- Interval: de hele periode tussen twee metingen, welke varieert tussen 5 maanden en een jaar
- 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 5-3.

Tabel 5.2 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 $[m^2/s^2]$
Ео	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 [-]



Figuur 5-3 Tijdreeksen van indicatoren tussen twee opeenvolgende metingen. Kleuren representeren tijdreeksen berekend over verschillende referentieperioden.

In Figuur 5-4 (interval), Figuur 5-5 (seizoen), Figuur 5-6 (maand) en Figuur 5-7 (week) zijn de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten geplot voor areaal boven NAP-0.5m en areaal boven NAP+0m. Voor de langere referentieperioden (dat wil zeggen langer dan een week) 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 gecorreleerd voor het kombergingsgebied Pinkegat en juist minder sterk en positief gecorreleerd voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Hierdoor vallen er weinig harde conclusies te trekken, aangezien de meeste correlaties onder de significantiegrens vallen. De enige significante correlatie die naar voren komt uit de data is een negatieve correlatie tussen plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat en windcondities een maand voorafgaand aan de opnamen. Hier gaat het voornamelijk om wind uit het westen die leidt tot een kleiner plaatareaal in het Pinkegat en dit verband is enkel zichtbaar als ook het plaatareaal tussen NAP-0.5m en NAP+0m wordt meegenomen. De platen in het Pinkegatgebied liggen min of meer open voor de westenwind die golven kan opbouwen vanaf halverwege Ameland en wellicht nog verder westelijk. Die golven breken op de platen in het Pinkegatgebied. De

47 van 69

platen in het Zoutkamperlaaggebied liggen meer beschut, onder meer ook door de Engelsmanplaat, waardoor de correlatie daar minder is. Voor oostenwind geldt het omgekeerde.

Datzelfde verband valt net onder de significantiegrens voor seizoensgemiddelden, maar er is geen correlatie aanwezig voor de gehele interval- of weekgemiddelden. De kans dat een storm zich voordoet precies in de week vóór de meetcampagne is een stuk kleiner dan in de maand ervoor, terwijl bij 'seizoen' en 'interval' door de lange tijd juist het effect van stormen afzwakt of zelfs uitmiddelt.



Figuur 5-4 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal en windcondities tussen opnamen, gebaseerd op het hele interval tussen de opnamen. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0.5.



Figuur 5-5 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal en windcondities tussen opnamen, gebaseerd op de 112 dagen voor de opname. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0.5.



Figuur 5-6 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 0.5.

49 van 69 Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021



Figuur 5-7 Pearson correlatiecoëfficiënten voor gemeten areaal en windcondities tussen opnamen, gebaseerd op de 7 dagen voor de opname. Voor de dataset geldt een significantiegrens van 0.5.

5.3 Conclusies

Gezien het geringe aantal datapunten, worden alleen Pearson correlatiecoëfficiënten van boven 0.5 (of onder -0.5) significant geacht. Hierdoor concluderen we dat alleen de gemiddelde windsnelheid rond de meetcampagne een indicator is voor het plaatareaal boven NAP-0.5m in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Een sterkere wind tijdens de opname leidt tot een kleiner plaatareaal. Deze correlatie is iets lager in vergelijking met de waarde van -0.56 in Van der Lugt et al. (2020). Door toevoeging van het 2020 datapunt blijkt het verband tussen de gemiddelde hoogwater en het gemeten plaatareaal niet meer significant voor het kombergingsgebied Pinkegat.

Voor windcondities tussen twee meetcampagnes is de enige significante correlatie die naar voren komt voor de huidige meetreeks een negatieve correlatie tussen plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat en de windcondities in de maand voorafgaand aan de opname. Hierbij gaat het voornamelijk om wind uit het westen die leidt tot een kleiner plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat en dit verband is enkel zichtbaar als zowel het plaatareaal tussen NAP-0.5m en NAP+0M wordt meegenomen. Datzelfde verband valt net onder de significantiegrens voor seizoensgemiddelden, maar er is geen correlatie aanwezig tussen de gehele interval- of weekgemiddelden. Waarschijnlijk is de kans dat een storm zich voordoen precies in de week voor een meetcampagne een stuk kleiner dan in de maand ervoor, terwijl de lengte van 'seizoen' en 'interval' juist het effect van stormen afzwakt of uitmiddelt.

Dit onderdeel van het onderzoek levert nog weinig significante correlaties op, voornamelijk vanwege de vooralsnog kleine dataset. We verwachten dat deze correlaties steeds duidelijker naar voren zullen komen naarmate er meer LiDAR opnamen aan de dataset toegevoegd worden.

6 Vergelijking met spijkermetingen

In dit hoofdstuk vergelijken we de bevindingen uit het spijkermetingenrapport (Krol 2020) met tijdsgemiddelde veranderingen op basis van de LiDAR dataset voor het gebied ten zuiden van Ameland-oost. Krol (2020) vergeleek de LiDAR data en de spijkermetingen voor het gebied rond Paesens en liet zien dat zowel de trend als de grootte-orde van de veranderingen vergelijkbaar zijn. Het was een aanbeveling van Van der Lugt et al. (2020a) om een vergelijking van de LiDAR opnamen met spijkermetingen van Ameland-oost in dit rapport verder uit te werken.

Krol (2020) geeft aan dat een aantal meetstations voor spijkermetingen ten zuiden van het Oerd op oost Ameland langzamer sedimenteren dan de berekende diepe bodemdaling (Figuur 6-1). Deze stations bevinden zich in een gebied waar de LiDAR dataset een daling laten zien (Figuur 6-2). Ook op te merken is een gebied met netto verticale groei tussen deze meetstations; S150 bevindt zich op de meest noordelijke deel van dit groeigebied. Uit de areaalontwikkeling van dit gebied (Figuur 3-4, A) is te zien dat het plaatareaal binnen de polygoon niet buiten de onzekerheidsmarge van de metingen verandert. De hypsometrie van het gebied (Figuur 4-3, A) laat een lichte daling zien.

Op basis van deze vergelijking kan worden geconcludeerd dat de spijkermetingen en de LiDAR dataset in het gebied goed met elkaar overeenkomen.



Figuur 6-1 Meetstations voor spijkermetingen ten zuiden van Ameland-oost. De gele lijn verbind meetstations die 0.8 (S50) tot 7.6 (S20) mm/jaar gedurende de periode 2000 – 2019 netto daling laten zien. (Figuur uit Krol, 2020)



Figuur 6-2 Positie van spijkermeetstations op een kaart van de lineaire trend van hoogteverandering uit de gecorrigeerde LiDAR dataset 2010-2020. Grijze kleuren geven een daling weer, rode een verticale groei. Polygoon A: Ameland zuidoost, die ook gebruikt is voor de areaalontwikkeling (Figuur 3-4) en hypsometrische analyse (Figuur 4-3), is hier in lichtblauw overheen geplot.

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 2020 opname past goed in de meetreeks. Het gerapporteerde plaatareaal voor de Zoutkamperlaag is constanter gebleven door de meetreeks heen dan voor het Pinkegat. Voor het Pinkegat suggereert de meetreeks een geringe afname van het plaatareaal over de gehele tijdsreeks, maar deze afname is klein ten opzichte van de onzekerheidsmarge en zet niet door tussen 2019 en 2020.

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 op NAP-0.5m. Dat wil zeggen dat het plaatareaal in de Zoutkamperlaag op geaggregeerde schaal constant blijft, en ook dat ontwikkeling van deelgebieden niet sterk varieert. Het plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat lijkt licht af te nemen, maar op kombergingsniveau valt deze afname binnen de meetonzekerheid. De meetfout in de LiDAR-opnamen is vergelijkbaar met de waarde die in de vakliteratuur wordt gerapporteerd.

De plaatgebieden in het kombergingsgebied van het Pinkegat zijn gemiddeld genomen iets lager komen te liggen ten opzichte van 2010. 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 tegen elkaar weg en concluderen we dat de ontwikkeling van het totale plaatareaal binnen de onzekerheidsmarge van de metingen valt.

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

De afname van de plaathoogte zou van noord naar zuid minder moeten worden als dit een direct gevolg zou zijn van diepe bodemdaling. In het gebied waar de diepe bodemdaling het sterkst is, namelijk op de platen ten zuiden van Ameland-oost, 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. Het is belangrijk om bij 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 ligt lager dan de geërodeerde plaat. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen leidt dus tot veranderingen in plaathoogte die de effecten van bodemdaling versluieren. Voor deelgebieden en individuele platen binnen het Pinkegat kan wel een afname van met name het lagere plaatareaal vastgesteld worden. Deze veranderingen zijn eerder een gevolg van geul-plaat dynamiek dan dat ze op een sterke band met de diepe

Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2020) 11206685-000-ZKS-0004, 29 april 2021

54 van 69

bodemdaling duiden. Een eenduidig bodemdalingssignaal komt hierdoor niet naar voren uit de LiDAR dataset.

7.3 Wat heeft de natuurlijke dynamiek aangedreven?

Van de hydrologische en meteorologische condities tijdens de inwinning toont alleen gemiddelde windsnelheid een (negatieve) correlatie met het gemeten plaatareaal in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Van condities tussen de meetcampagnes is de enige significante correlatie een (negatieve) correlatie tussen plaatareaal in het kombergingsgebied Pinkegat en de westelijke wind in de maand voorafgaand aan de opname. We verwachten dat deze correlaties steeds duidelijker zullen worden naarmate het aantal LiDAR opnamen in de dataset groeit.

7.4 Aanbevelingen

Er is de laatste jaren veel gedaan om de kwaliteit van de LiDAR monitoring en analyse van deze gegevens te optimaliseren.

Dit jaar werd een tweede iteratie uitgevoerd door NAM op de methodiek waarmee de referentievlakcorrectie werd bepaald (Bijlage B). Leidt de in dit onderzoek aangescherpte referentievlakcorrectie tot een betere interpretatie van de LiDAR resultaten? De voorgestelde referentievlakcorrectie verandert de uiteindelijke conclusies uit de ruimtelijk geïntegreerde tijdreeksen van areaalontwikkelingen niet. De correctie levert wel een verbetering op in de interpretatie van de tijdreeksen van areaalontwikkeling. De interpretatie van de resultaten wordt door de voorgestelde correctie eenduidiger, en is daarom een verbetering van de methode.

In welke mate sluiten de LiDAR metingen in het gebied ten zuiden van Ameland-oost aan op de spijkermetingen? Uit een vergelijking van de twee datasets kan worden geconcludeerd dat de spijkermetingen en de LiDAR data in het gebied goed met elkaar overeenkomen.

Wij bevelen aan om de referentievlakcorrectie toe te voegen aan de standaardprocedure. De peilmerkhoogtes waaraan de GCP hoogtes zijn gekoppeld komen goed overeen met de mediane InSAR tijdserie van het onderzoeksgebied, zoals aangetoond in Fig. C.22 tot C.26 in Van der Lugt et al. (2020a). Het advies is om de GCPs die niet in 2020 opnieuw zijn ingemeten alsnog een keer in te meten, ter controle van de relatieve hoogtes ten opzicht van naburige peilmerken. In de toekomst kunnen deze hoogtes vanuit de InSAR data afgeleid worden; alleen bij afwijkingen van de trend in de InSAR data dienen de betreffende GCPs opnieuw te worden ingemeten.

Verder adviseren we om in het volgende monitoringsrapport een kwantitatieve vergelijking te maken tussen de berekende bodemdaling in het gebied en de morfologische veranderingen van het systeem. Het doel is om te kwantificeren hoe bodemdaling zich verhoudt met de natuurlijke morfodynamiek. Er wordt nog veel onderzoek gedaan om het conceptuele model voor de morfologische ontwikkelingen in de Friesche zeegat te verfijnen. Het is dus van belang om bij iedere rapportage de nieuwste ontwikkelingen van deze conceptuele model(len) mee te nemen in de interpretatie.

8 Referenties

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

Krol, J. (2020). "Sedimentatie metingen op het wad van Ameland, Paesens, Piet Scheve plaat, Engelsmanplaat en Schiermonnikoog". Rapport Amelander Natuurmuseum, Nes, Nederland

NAM B.V. (2007). "Meet- en regelprotocol Winning Waddenzeegas vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen". EP Document Nummer: EP200612202112. Document Datum: 22 januari 2007.

NAM B.V. (2020). "Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2019". EP Document Nummer: EP202002200220 Owner: NAM-UPC/T/K Document Date: 1/5/2020 Security: Unrestricted

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

Terratec AS. (2020). "Project report Waddenzee - LiDAR acquisition for 2020". 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.

A Overzicht vluchtgegevens

LiDAR referentie	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
1010101110			opnanon	Start	Eind	1		
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
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

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

LiDAR	Meetdienst en	Merk en type Data van scanner opnamen	Data van	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
reference	reference	Souther	ophanien	Start	Eind			
2015 (zomer)	Fugro (Eurosense) Fugro Geospatial B.V. (2015)	Riegl Q680i	30-06-2015 1-7-2015	14:08 15:10	17:45 18:24	6-20; 34-38 18; 21-33	Heldere hemel Heldere hemel	Vlieghoogte 460 m AGL
2015 (najaar)	Eurosense <i>Eurosense</i> (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</i> 5	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 Figure 2	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 opnamen	Uren v	an 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

*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)

Samenvatting

In de 2021 LiDAR analyse zijn de surveys wederom gecorrigeerd met een lineair correctievlak ten opzichte van de referentie survey van voorjaar 2017. Door deze correctie zijn trends in wadplaathooges beter te interpreteren. De wijze van bepaling van de correctie parameters is geanalyseerd, maar dit levert geen verdere verbetering op ten opzichte van de 2020 analyse. De correcties liggen voor het grootste gedeelte binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR.

De correctieparameters zijn nu integraal geschat op basis van harde topografie, de sediment grids, en de Ground Control Point grids. Zowel de Ground Control Point grids als de sediment grids van 2020 passen zonder correctie naar de referentie survey 2017a al goed bij de hoogtes bepaald op basis van geodetische metingen. Indien de 2020 survey wordt gecorrigeerd naar de referentie survey 2017a, is de passing iets minder. Daarom kan overwogen worden in de volgende LiDAR analyse een andere referentie survey te kiezen. Om extra zekerheid in te bouwen, kunnen de relatieve hoogtes van de GCPs ten opzichte van naburige peilmerken worden gecontroleerd.

B.1 Introductie

In de 2020 LiDAR analyse (Van der Lugt et al., 2020) worden voor het eerst correctie parameters toegepast om residuele systematische effecten in de LiDAR hoogtes te minimaliseren. Dit is gedaan naar aanleiding van het advies van de Auditcommissie om te onderzoeken of de foutenmarge in de bepaling van de wadplaathoogtes door middel van LiDAR metingen kan worden verkleind, om de trends in de wadplaathoogtes beter te kunnen interpreteren. In 2020 zijn de correctie parameters door NAM berekend op basis van de LiDAR hoogtes op harde oppervlaktes (zoals wegen) en de hoogtemetingen (met GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS) en waterpassingen) die op wadplaten nabij peilmerkclusters worden uitgevoerd (sediment grids). De berekende correctie parameters zijn in 2020 geëvalueerd op de Ground Control Point grids (GCP grids), waarop de LiDAR meetdienst inpast. Ook is in appendix C in (Van der Lugt et al., 2020) getoond dat de tijdseries van bodemdaling op basis van InSAR meetpunten in een straal van 500 meter van de GCPs goed overeenkomen met de metingen uit waterpassingen van naburige peilmerken. Door de hoge temporele dichtheid kan InSAR gebruikt worden om de NAP hoogtes uit waterpassingen te corrigeren voor opgetreden bodemdaling.

In het advies van de Auditcommissie over de resultaten van het monitoringsjaar 2019 (nov 2020) wordt geconcludeerd dat door de toegepaste correctie, de interpretatie van de LiDAR data inderdaad eenduidiger is geworden en trends in het wadplaatareaal beter te interpreteren zijn. Echter in de mogelijkheden tot verdere verbetering wordt geadviseerd om de resterende systematische fouten in de LiDAR data verder te onderzoeken, en wordt aangeraden zowel de GCP grids, de harde oppervlakken en de sediment grids mee te nemen bij de bepaling van de parameters van de correctievlakken. Verder wordt verzocht de (on)nauwkeurigheid van de hoogte van harde topografie verder te onderzoeken.

Deze appendix adresseert de berekende correctie parameters voor de Meet- en Regelcyclus 2020, de evaluatie op de sediment en Ground Control Point grids, en de evaluatie van de hoogtes van de harde topografie.

B.2 Berekening correctieparameters

De correctieparameters zijn voor de Meet- en Regel cyclus 2020 integraal bepaald op basis van de volgende sets punten:

- 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.
- Harde topografie punten buiten de 2 cm contour van de bodemdaling door gaswinning, waarbij punten zijn geselecteerd op minimaal 1 meter afstand van de wegkant, met een standaardafwijking van de hoogte minder dan 5 centimeter (zie de uitleg in paragraaf B.4).

De LiDAR survey uit voorjaar 2017 ('2017a') wordt wederom als referentie in de tijd aangehouden. Deze survey bevat een groot aantal gemeten sediment grids. De correctie ϵ van een survey op tijdstip *t* wordt geformuleerd als:

• $\epsilon(t)=Y(t)-Y_{2017a}$

De constante verschuivingen ('shifts') en de kantelingen ('tilts') in Oost-West en Noord-Zuid richting worden integraal geschat als een linear vlak:

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

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

De correctie parameters (zie Tabel B-2) zijn bepaald op basis van de Deltares grids met 1 meter resolutie. Door middel van kleinste kwadraten schatting zijn de correctie parameters uit de hoogteverschillen van de harde oppervlaktes, sediment grids en de Ground Control Point grids berekend.

Survey	а	b	С
2010a	0.0002	0.0032	-1.9466
2011a	-0.0003	-0.0022	1.3793
2011b	0.0025	-0.0104	5.8244
2012b	0.0015	0.0010	-0.9064
2013b	0.0021	-0.0017	0.6228
2014a	0.0007	-0.0003	0.0920
2015a	0.0020	-0.0020	0.8107
2015b	0.0010	-0.0018	0.8992
2016a	0.0013	0.0000	-0.2209
2016b	0.0005	0.0017	-1.1579
2017a	0	0	0
2017b	0.0001	0.0008	-0.5231
2018a	0.0006	-0.0036	2.0716
2018b	0.0001	0.0030	-1.8097
2019a	-0.0001	-0.0003	0.2112
2019b	0.0006	-0.0019	1.0263
2020a	0.0010	0.0009	-0.7398

Tabel B-2: Berekende correctie parameters a, b en c ten opzichte van de referentie survey 2017a.

Deltares

61 van 69

De constante verschuivingen ('shifts') en de kantelingen ('tilts') in Oost-West en Noord-Zuid richting behorende bij de berekende correctie parameters ten zichte van de referentie survey 2017a worden getoond in Figuur.



Figuur B-1: Links: berekende constante verschuivingen ('shifts') ten opzichte van de referentie survey 2017a. 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 2017a.

Net zoals in de 2020 analyse, zijn de shifts allemaal positief (tussen 0 en 5 cm) ten opzichte van de referentie survey. De tilts laten een verdeling zien rondom 0, waarbij het merendeel tussen -4 en +4 cm zit, over 30 km in Oost-West richting, en 10 km in Noord-Zuid richting. De correcties vallen dus wederom binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR. Als naar de verdeling van hoogteverschillen in de histogrammen en de ruimtelijk visualisatie van de correcties wordt gekeken, is er een duidelijk effect. De histogrammen verschuiven richting een spreiding rondom 0, en zijn in een aantal gevallen ook smaller, zie de voorbeelden in Figuur , Figuur en Figuur .



Figuur B-2: Residuen hoogteverschillen survey 2011b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie



Figuur B-3: Residuen hoogteverschillen survey 2018b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie



Figuur B-4: Residuen hoogteverschillen survey 2020a ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.

Tabel B-3 geeft een overzicht van de parameters van de histogrammen van de gecorrigeerde hoogteverschillen ten opzichte van survey 2017a. Zowel de standaardafwijking, als de 16% en 84% percentielen (overeenkomend met 1 σ voor de normale verdeling) zijn aangegeven. De standaardafwijkingen van de hoogteverschillen liggen in de orde van 2-3 cm. De laatste twee kolommen geven de percentielen aan bij -3 en +3 cm.

Survey	σ(cm)	16% percentiel (cm)	84% percentiel (cm)	percentiel (%) -3 cm	percentiel (%) +3 cm
2010a	3.3	-3.3	3.4	19	80
2011a	3.2	-3.5	3.2	20	82
2011b	2.8	-2.3	2.8	10	87
2012b	5.2	-4.2	3.3	25	81
2013b	2.2	-1.8	1.7	6	95
2014a	2.2	-2	2.3	10	92

2015a	1.7	-1.4	1.5	4	98
2015b	3.6	-2	1.8	7	96
2016a	1.6	-1.3	1.3	3	98
2016b	2.4	-2.4	2.2	11	92
2017a	0	0	0	0	0
2017b	1.7	-1.5	1.4	4	97
2018a	2	-1.7	1.6	4	95
2018b	1.5	-1.4	1.3	2	98
2019a	1.6	-1.2	1.2	3	97
2019b	1.5	-1.3	1.2	2	98
2020a	2.5	-2.1	1.9	6	90

Tabel B-3: Overzicht parameters histogrammen gecorrigeerde hoogteverschillen ten opzichte van survey 2017a. 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.

B.3 Evaluatie op de sediment grids en de Ground Control Point grids

De toegepaste correctievlakken zijn relatief ten opzichte van referentie LiDAR survey 2017a. De correctie parameters zijn integraal berekend op basis van de harde topografie punten, de sediment grids, en de Ground Control Point grids. Figuur toont de residuen tussen de gecorrigeerde LiDAR grids en de geodetische metingen (waterpassen, InSAR, GNSS) voor alle LiDAR surveys tussen 2010 en 2020. Het histogram van de Ground Control Point grids is iets breder; de oorzaak hiervan ligt waarschijnlijk in het feit dat enkele GCP grids onder een lichte helling liggen en de punten vergeleken worden met LiDAR waarden in een 1x1 m grid. Het grootste deel van de residuen ligt tussen +/- 5 cm. De 16% en 84% percentielen liggen bij de sediment grids op -2.6 en +2.2 cm.



Figuur B-5: Hoogteverschillen (alle surveys van 2010 t/m 2020) LiDAR en geodetische metingen op sediment grids (links) en Ground Control Point grids (rechts). De LiDAR hoogtes zijn gecorrigeerd naar de referentie survey van 2017.

In Figuur B-5 is ook te zien dat de histogrammen van de verschillen tussen de gecorrigeerde LiDAR grids en de geodetische metingen niet geheel gecentreerd rond 0 liggen. De LiDAR hoogtes (gecorrigeerd naar de referentie survey 2017a) liggen gemiddeld 1-2 cm lager dan de hoogte berekend op basis van de geodetische metingen. Om verder inzicht te krijgen in de mogelijke oorzaken hiervan, zijn de histogrammen tevens berekend voor enkel de 2020 survey. De hoogtes berekend uit de geodetische metingen zijn vergeleken met zowel de ongecorrigeerde als de gecorrigeerde LiDAR survey, zie Figuur .



Figuur B-6: Verschillen (m) tussen LiDAR hoogtes en hoogtes op basis van geodetische metingen voor de Ground Control Point grids (boven) en de sediment grids (onder). Links: verschillen tussen de hoogtes op basis van geodetische metingen en de ongecorrigeerde 2020 LiDAR suvey. Rechts: verschillen met de gecorrigeerde 2020 LiDAR survey.

In Figuur is te zien zien dat zowel de Ground Control Point als de sediment grids zonder correctie van de LiDAR survey al goed passen bij de hoogtes berekend op basis van de geodetische metingen. De toepassing van de correctieparameters geeft een iets minder goede passing met de hoogtes op basis van de geodetische metingen.





De correctie van de LiDAR surveys geeft een verbetering van de relatieve nauwkeurigheid (ten opzichte van de referentie survey 2017a); echter dit leidt niet automatische tot een optimale passing met de hoogtes op basis van de geodetische metingen. In (Van der Lugt et al., 2020) is al opgemerkt dat de berekende constante verschuivingen met de referentie survey allemaal positief zijn (tussen 0 en 5 cm), zie ook Figuur in dit document. In de

volgende Meet- en Regelcyclus is het te overwegen om een andere referentie survey te kiezen. Om extra zekerheid in te bouwen, kunnen de relatieve hoogtes van de GCPs ten opzichte van naburige peilmerken worden gecontroleerd.

B.4 Evaluatie harde topografie hoogtes

De evaluatie van de hoogtes van de harde topografie is gebeurd door de correctie parameters tevens te berekenen na selectie van de topografie punten gelegen op minstens 1 meter afstand van de wegkant (minder kans op verstoring door vegetatie en andere objecten langs de weg) en met een hoogte standaardwijking minder dan 5 centimeter. Figuur en Figuur tonen dat deze selectie weinig effect heeft op de geschatte 'shifts' (constante verschuivingen) en de geschatte 'tilts' (verschillen in Oost-West en Noord-Zuid richting in de vorm van een kanteling) ten opzichte van de referentie survey (voorjaar 2017). De patronen zijn hetzelfde en de verschillen liggen in de orde van 0-2 cm; ruim binnen de nauwkeurigheid van LiDAR.



Figuur B-8: Berekende constante verschuiving ('shift') ten opzichte van de referentie survey 2017a, volgens de methode toegepast in 2020 (links) en na selectie van topografie punten (σ < 5 cm, en minstens 1 meter vanaf kant weg) (rechts).



Figuur B-9: 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 2017a, volgens de methode toegepast in 2020 (links) en na selectie van topografie punten (σ < 5 cm, en minstens 1 meter vanaf kant weg) (rechts).



Figuur B-10: In donker grijs de selectie harde topografie punten zoals gebruikt in 2020 (links), en een willekeurige nieuwe selectie op basis van punten op wegdelen uit de Basiskaart Grootschalige Topografie (rechts). In groen de locaties van de Ground Control Point grids. In bruin de locaties van de sediment grids.

Vervolgens is gekeken of het uit zou maken als er een andere selectie van topografie punten gekozen zou worden. Dit is gedaan door een nieuwe willekeurige selectie van punten op wegdelen uit de Basiskaart Grootschalige Topografie te selecteren buiten de 1 centimeter bodemdalingscontour 2006-2019 (zie Figuur). Figuur en Figuur tonen de berekende constante verschuivingen en de kantelingen in Oost-West en Noord-Zuid richting ten opzichte van de referentie survey van 2017. Ondanks dat de verschillen in de orde van enkele centimers zijn, vertonen de globale patronen gelijkenissen. Tevens is het effect op de areaal berekeningen niet groot, zie Figuur . Om de consistentie met de voorgaande Meet- en Regelcyclus te bewaren, is ervoor gekozen om voor de berekening van de correctie parameters dezelfde set harde topografie punten te gebruiken als in 2020, met de subselectie van punten met een hoogte standaardafwijking minder dan 5 centimeter die op minstens 1 meter van de wegkant liggen.



Figuur B-11: Berekende constante verschuiving ('shift') ten opzichte van de referentie survey 2017a, volgens de methode toegepast in 2020 (links) en met een andere selectie van topografie punten (rechts).



Figuur B-12: Geschatte tilt 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 2017a, volgens de methode toegepast in 2020 (links) en met een nieuwe selectie van topografie punten (rechts).



Figuur B-13: schatting droogvallend areaal Pinkegat voor (grijs) en na correctie (zwart), voor het NAP 0 m hoogte niveau. Links: areaal berekening uit gecorrigeerde LiDAR grids na correctie zoals toegepast in 2020. Rechts: areaal berekening uit gecorrigeerde LiDAR grids na correctie op basis van een nieuwe set topografie punten.

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