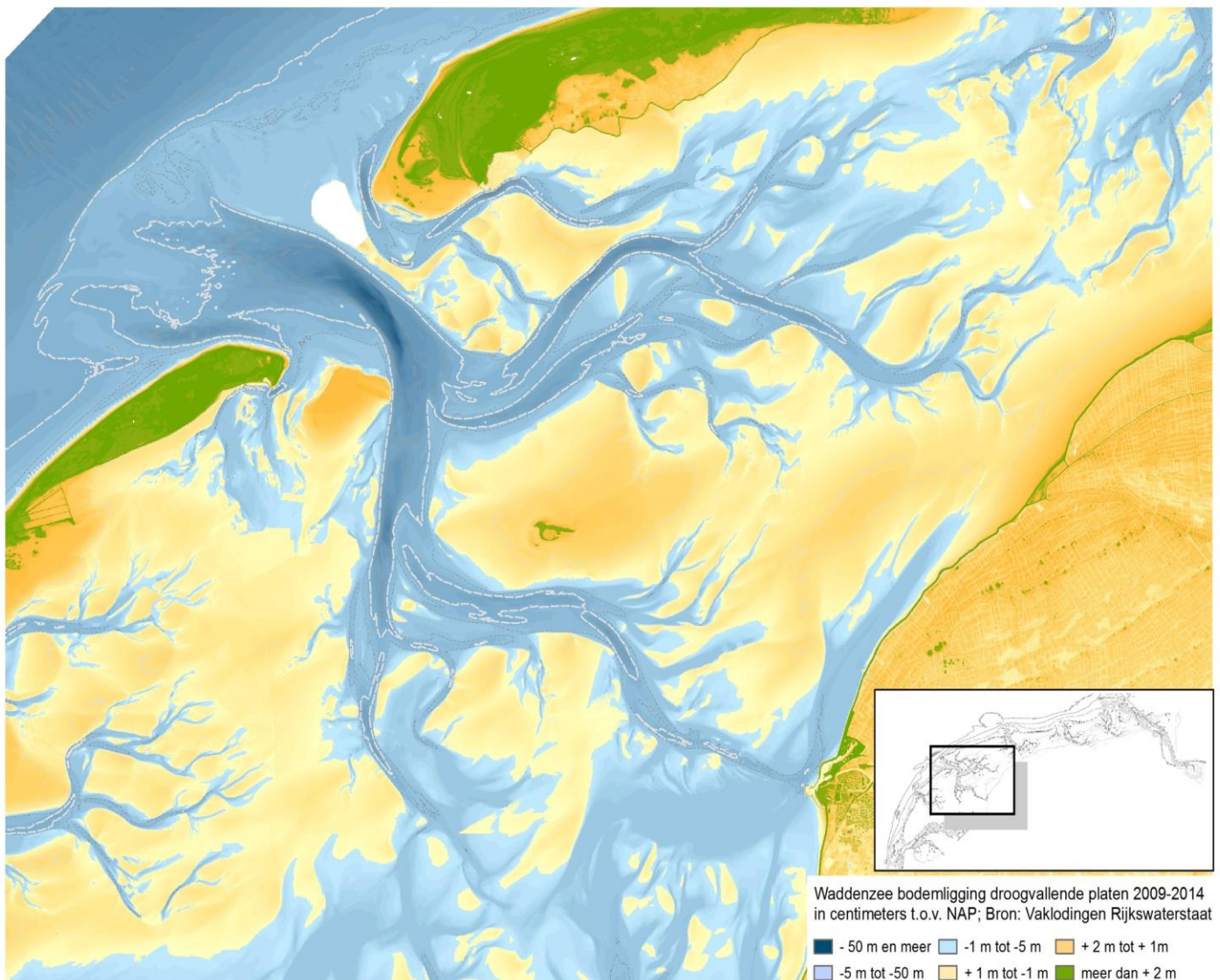


MONITORING T0-SITUATIE 2020 BODEMLIGGING STUDIEGEBIED ZOUTWINNING WADDENZEE

Frisia Zout B.V.

28 APRIL 2021



Contactpersoon



JESSICA BERGSMA
Specialist Coastal Morphology

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	5
1.1	Doel van de monitoring	5
1.2	Metingen morfologie	5
1.3	Doel van dit document	6
2	INTRODUCTIE VAN DE MEET- EN ANALYSE METHODE HOOGTE/DIEPTE RAAIEN	7
2.1	Meetmethode	7
2.2	Verwerkings- en analyse methode	8
3	GEMETEN HOOGTE/DIEPTE IN DE RAAIEN	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Metingen uit 2016	13
3.3	Metingen uit 2017	17
3.4	Metingen uit 2018	20
3.5	Metingen uit januari 2019	24
3.6	Metingen uit mei 2019	27
3.7	Metingen uit 2020	30
4	VERSCHILLEN IN HOOGTE/DIEPTE IN DE RAAIEN	35
4.1	Inleiding	35
4.2	Vergelijking tussen metingen uit 2016 en 2017	35
4.3	Vergelijking tussen metingen uit 2017 en 2018	41
4.4	Vergelijking tussen metingen uit 2018 en 2019	47
4.5	Vergelijking tussen metingen uit januari 2019 en mei 2019	53
4.6	Vergelijking tussen metingen uit 2019 en 2020	59
4.7	Gemiddelde diepte per raai 2016-2020	65
5	OBSERVATIES 2016-2020 HOOGTE/DIEPTE RAAIEN	67
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	75

6.1	Ten aanzien van de toegepaste methoden	75
6.2	Ten aanzien van de morfologische ontwikkelingen	76
7	REFERENTIES	79
	BIJLAGE A HOOGTE WADPLATEN LIDAR	81
7.1	Introductie meetmethode	81
7.2	Gemeten hoogte wadplaten LiDAR	81
7.3	Vershil hoogte/diepte raaimetingen en LiDAR-data	85
7.3.1	Vershil 2016 raaihoogte en 2016 LiDAR	85
7.3.2	Vershil 2019 raaihoogte en 2019 LiDAR	91
7.4	Hoogteverschil wadplaten	97
7.4.1	2010 - 2016	97
7.4.2	2016 – 2019	97
7.5	Observaties 2016 en 2019 LiDAR-hoogte metingen van de droogvallende platen	98
	BIJLAGE B VAKLODINGEN	100
7.1	Introductie van de meetmethode	100
7.2	Vaklodingen 2010 en 2016	100
7.3	Analyse vaklodingen	101
	COLOFON	80

1 INLEIDING

1.1 Doel van de monitoring

De Staatssecretaris van Economische Zaken heeft aan Frisia Zout BV een Natuurbeschermingswetvergunning verleend voor het winnen van zout onder de Waddenzee. In Figuur 1-1 is het kombergingsgebied van het Vlie weergegeven, met daarbij het gebied waar de zoutwinning zal leiden tot daling van de Pleistocene ondergrond, dat wil zeggen de ondergrond onder de Waddenzee. Het uitvoeren van de zoutwinning zal plaatsvinden volgens het Hand-aan-de-Kraan-principe. Indien de bodemdaling van de Pleistocene ondergrond groter is dan verwacht, dan wel effecten in de Waddenzee optreden die het gevolg zijn van de bodemdaling door zoutwinning, dan is het mogelijk om de winningsstrategie aan te passen op een zodanige wijze dat de effecten binnen de gestelde grenzen blijven.

De monitoring heeft als doel om de gegevens in te winnen om het Hand-aan-de-Kraan principe in te kunnen vullen. Het monitoringsprogramma omvat de metingen en de cyclus van meten en evalueren. Voorafgaand aan de monitoring tijdens de zoutwinning zal de nulsituatie worden vastgelegd. De nulsituatie bestaat niet sec uit de situatie in dat ene jaar van opname, maar uit de plaats die deze in een eventuele trend inneemt.

1.2 Metingen morfologie

De onderstaande tabel 1 geeft een beknopt overzicht van de morfologische monitoring van Frisia Zout BV. Naast de metingen aan de bodemligging worden zogenaamde Spijkermetingen uitgevoerd, waarmee de lokale sedimentatie en erosie worden opgemeten en wordt de samenstelling van het sediment (korrelgrootteverdeling, met inbegrip van de slibfractie) bepaald. De resultaten van de spijkermetingen en de sediment-samenstellingen worden in separate eigenstandige rapporten vastgelegd. De voorliggende rapportage heeft betrekking op de bodemligging. De integratie van de resultaten van de morfologische monitoring met de andere monitoringsresultaten wordt uitgevoerd met alle betrokkenen en is beschreven in het rapport "Monitoring T0-situatie studiegebied zoutwinning Waddenzee (Cleveringa, 2021)".

Tabel 1 Beknopt overzicht van het morfologische deel van het monitoringsprogramma zoutwinning Waddenzee.

Metingen	Wordt gerapporteerd in	Frequentie	Gebied
Hoogte/diepte raaien	Voorliggende rapportage	1 x per jaar	Drie raaien in invloedsgebied
Spijkermetingen	Eigenstandige rapportage	4 x per jaar	Ballastplaat
Hoogte wadplaten LiDAR	Voorliggende rapportage	1 x per 3 jaar	Invloedsgebied
Vaklodingen	Voorliggende rapportage	1 x per 6 jaar	Kombergingsgebieden
Sedimentsamenstelling	Eigenstandige rapportage	1 x per jaar	Punten benthosbemonstering

Van de drie soorten metingen die in de voorliggende rapportage worden vastgelegd zijn in 2020 alleen de Hoogte/diepteraaien uitgevoerd. De opbouw van deze rapportage is daarom aangepast ten opzichte van de rapportage over 2019, zodat de nadruk komt te liggen op de nieuwe meetresultaten van de Hoogte/diepteraaien. De resultaten, beschrijving en analyse van de hoogtemetingen van de wadplaten met LiDAR en van de vaklodingen zijn identiek aan die in de rapportage over 2019 en deze zijn als bijlage opgenomen bij de rapportage.

2 INTRODUCTIE VAN DE MEET- EN ANALYSE METHODE HOOGTE/DIEPTE RAAIEN

2.1 Meetmethode

De metingen van de hoogte/diepte raaien worden uitgevoerd met een (singlebeam) echolood, gemonteerd op een ondiep stekend vaartuig, dat is uitgevoerd met nauwkeurige plaatsbepaling- en registratieapparatuur (Figuur 2-1). Tijdens hoogwater wordt varend de diepte onder het schip gemeten. Omdat in het interessegebied de hoogte van de droogvallende platen beperkt is, kan op deze wijze zowel de hoogte van de platen, als de diepte van de geulen worden gemeten.

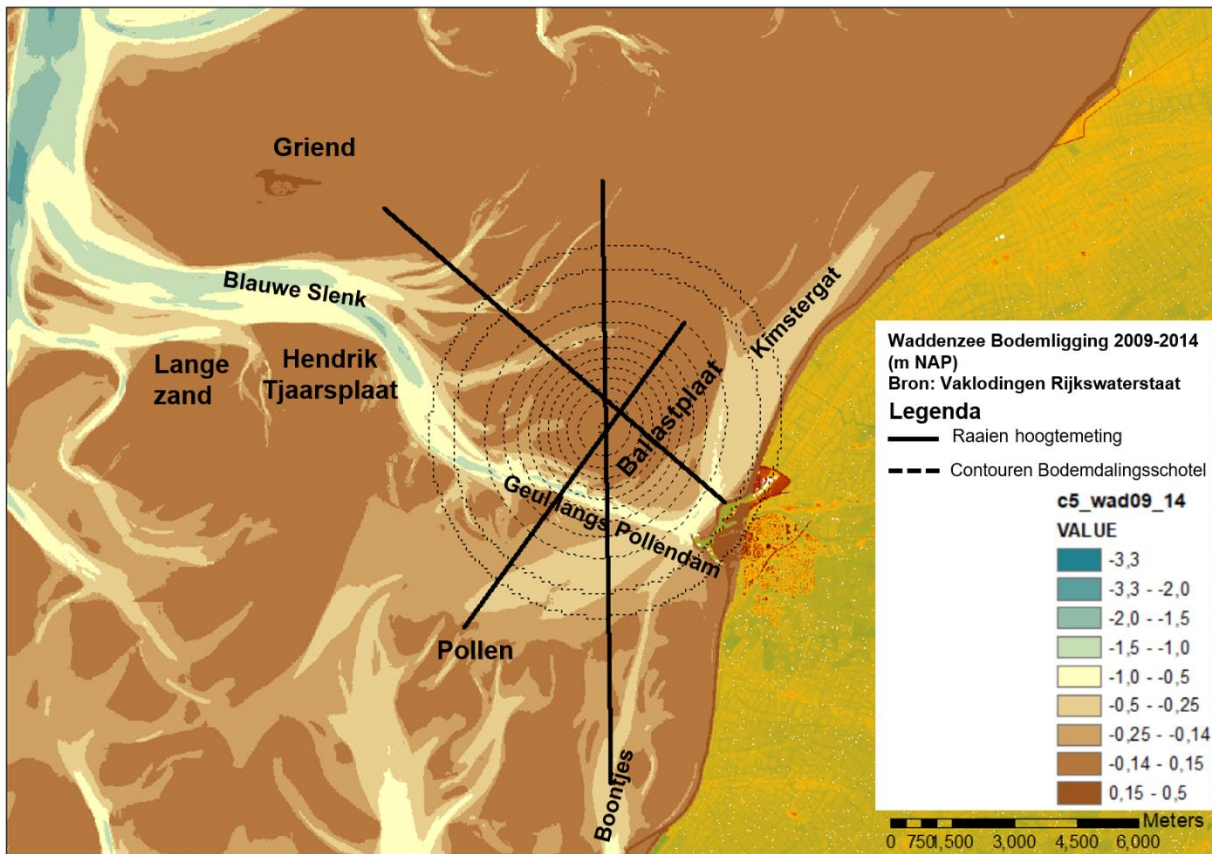


Figuur 2-1 Foto van het soort meetvaartuig dat door de surveyor (Deep B.V.) wordt ingezet voor het uitvoeren van de hoogte/dieptemetingen.

Het doel van deze metingen is om vast te stellen welke veranderingen optreden in de hoogte/diepte van de geulen en wadplaten. De ruimtelijke resolutie van de metingen sluit aan bij de omvang van de bodemdaling. De frequentie van de aanvullende metingen is relatief hoog, dat wil zeggen dat er vaak wordt gemeten in verhouding tot de omvang van de bodemdaling. Doordat de meetraaien doorlopen tot buiten het gebied met bodemdaling worden referentiegebieden ingemeten.

De frequentie van deze metingen is 1 keer per jaar in drie raaien binnen het invloedsgebied. De uitvoeringsperiode voor de metingen is mei¹, zodat deze in de tijd overeenkomen met ecologische metingen aan het benthos. In de onderstaande kaart (Figuur 2-2) is aangegeven hoe deze raaien lopen. De meetraaien lopen niet in de directe nabijheid van de meetlocatie van de pleistocene ondergrond (permanente meetpalen), zodat eventuele lokale effecten rond deze locaties de metingen niet beïnvloeden. Door de raaien op drie locaties te laten kruisen worden drie punten verkregen waar een onderlinge vergelijking van de metingen kan plaatsvinden.

¹ In 2019 heeft de uitvoerder van de metingen deze al in januari uitgevoerd, vanwege planning-technische redenen. Omdat dit beduidend eerder is dan mei en omdat in 2019 ook een LiDAR hoogtemetingen van de droogvallende platen is uitgevoerd in mei is besloten om alsnog in mei een raaimeting uit te voeren.

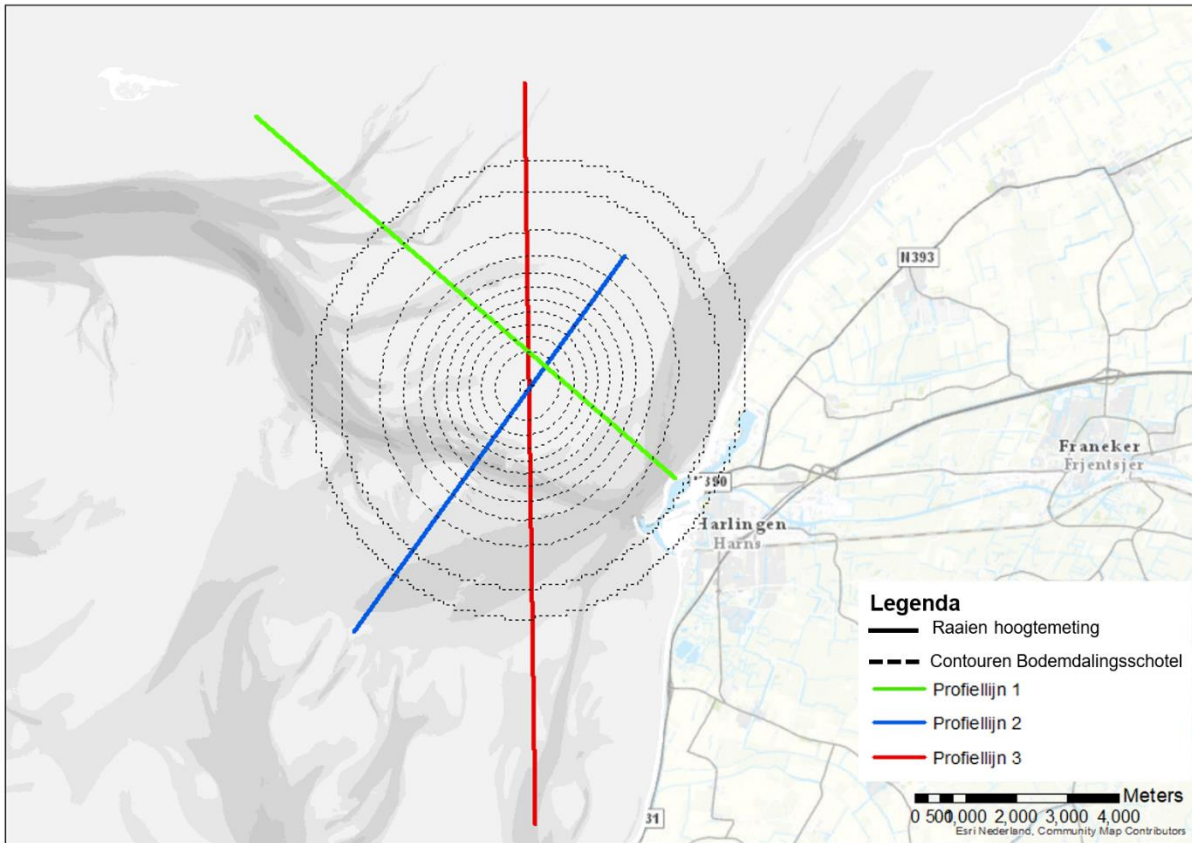


Figuur 2-2 Plaathoogte en raaien voor de hoogtemetingen ten opzichte van NAP.

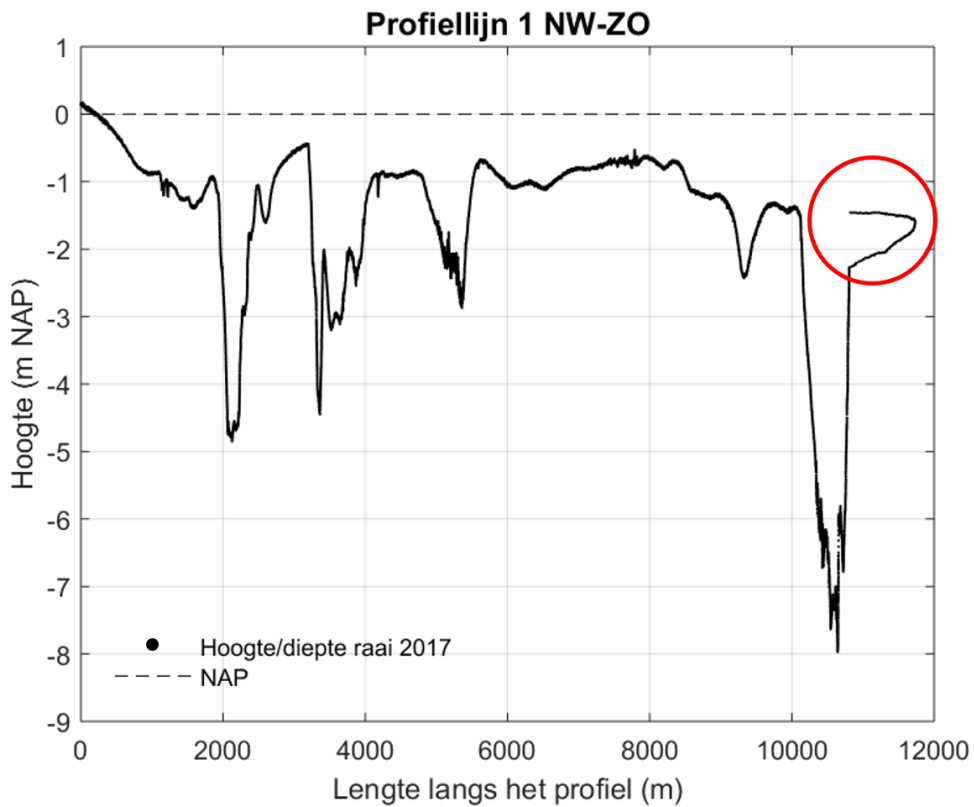
Frisia Zout B.V. is de opdrachtgever voor het uitvoeren van deze meting. In 2016-2020 zijn de metingen uitgevoerd door Deep B.V.

2.2 Verwerkings- en analyse methode

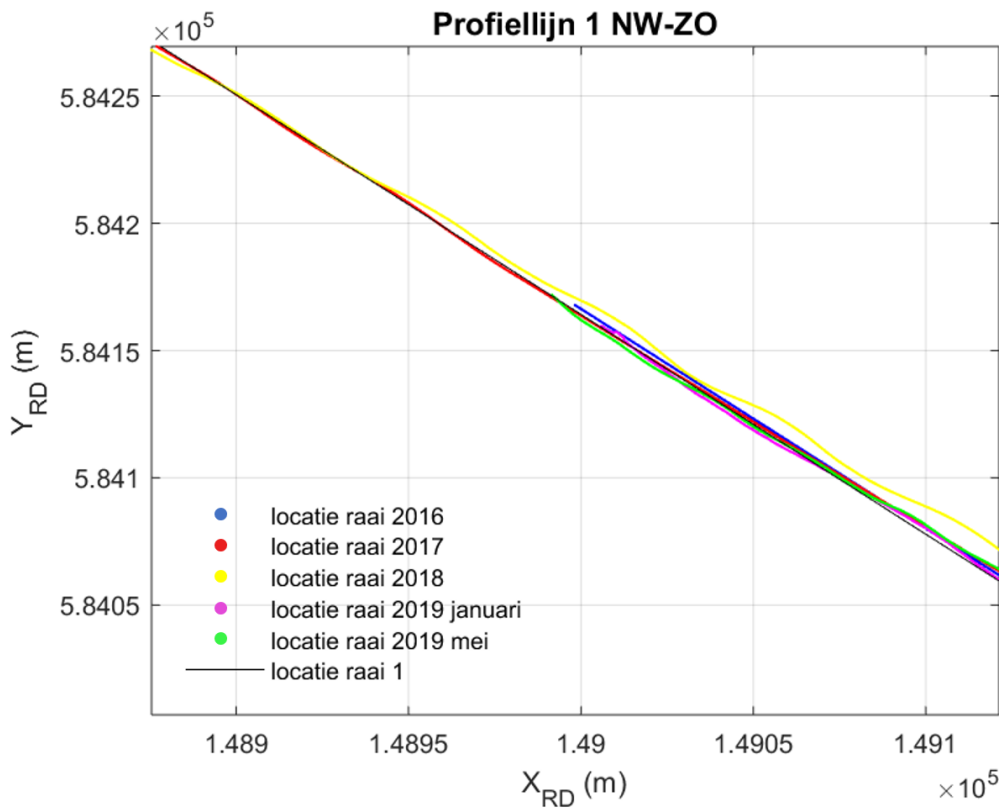
Jaarlijks worden drie dezelfde raaien ingemeten zoals aangegeven in Figuur 2-3. Elke ingemeten raai wordt geanalyseerd en gecontroleerd op overlappende data. Daar waar dubbele of verspringende metingen in eenzelfde gebied Figuur 2-4) aanwezig zijn, wordt de deze data verwijderd omdat niet duidelijk is welke gegevens gebruikt kunnen worden. Na controle of de gemeten raaidata in de buurt van de vooraf gedefinieerde profiellijn liggen (zie Figuur 2-5), wordt de raaidata op de vooraf gedefinieerde profiellijn geprojecteerd (Figuur 2-6). Hierdoor krijgen de datapunten dezelfde x- en y-coördinaten en kunnen de metingen van de verschillende jaren onderling worden vergeleken. Op basis hiervan wordt een gedetailleerde analyse gemaakt van de veranderingen in de bodemligging per profiellijnen door de tijd (zie Figuur 2-7).



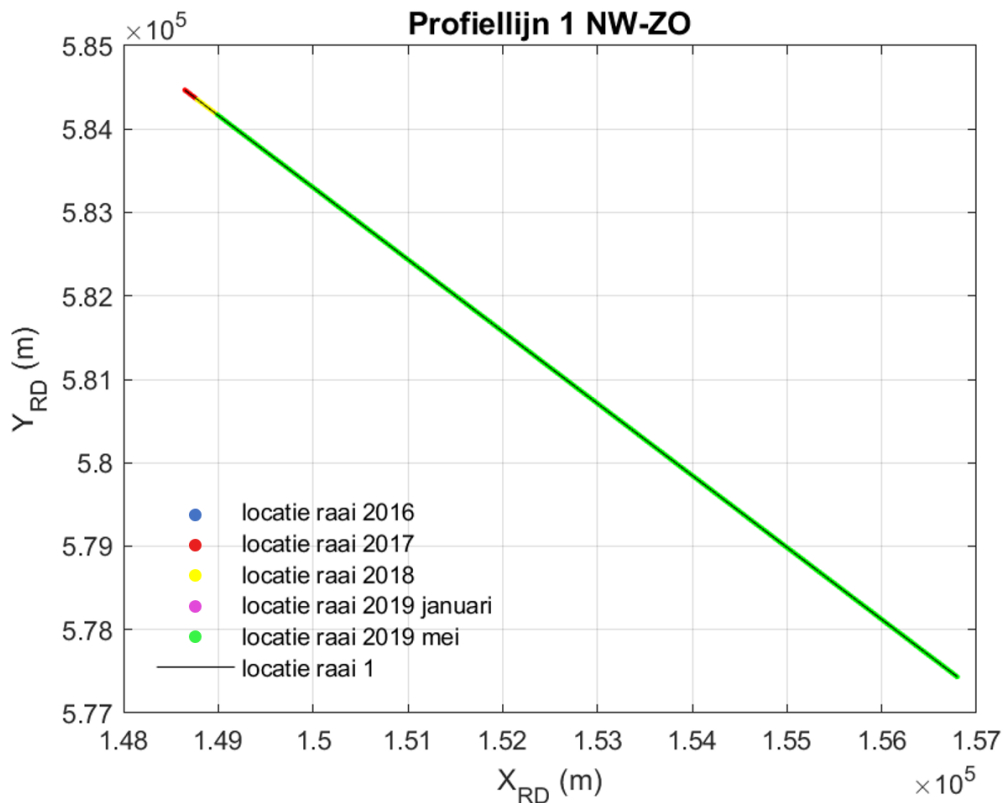
Figuur 2-3 Kaart van de hoogte/diepte raaien die jaarlijks worden gemeten.



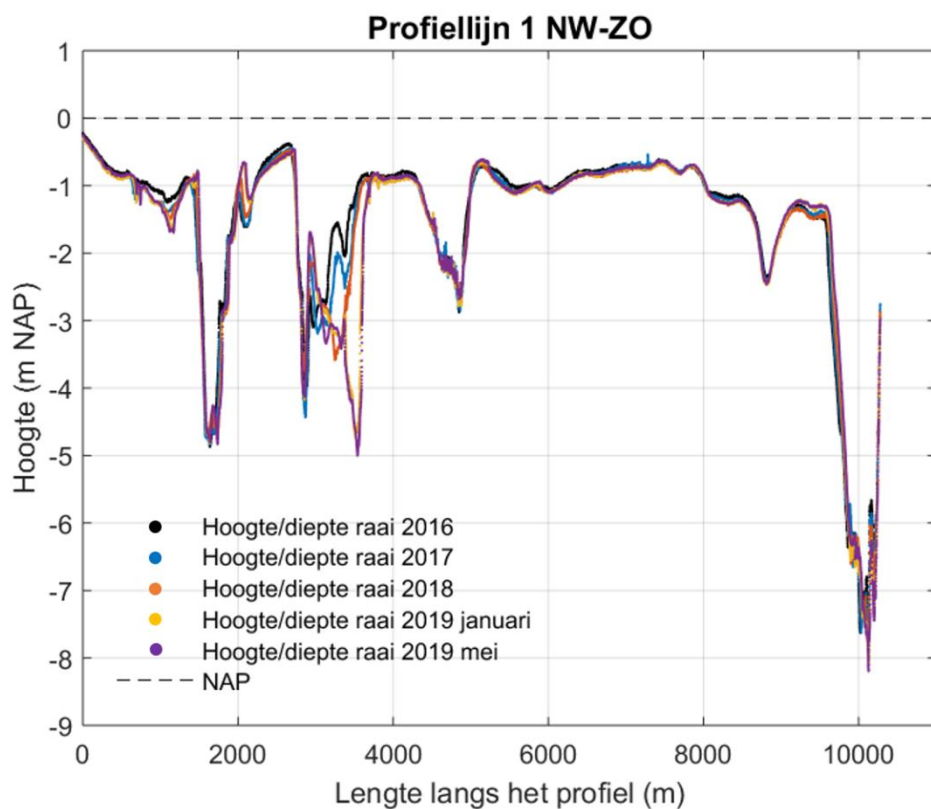
Figuur 2-4: Inzicht in dubbel gemeten data, waarna de dubbele data wordt verwijderd (voorbeeld ruwe data Hoogte/diepte raai 1 2017).



Figuur 2-5: Overzicht (ingezoomd) van gemeten raaidata en de vooraf gedefinieerde profiellijn raai 1. De vooraf gedefinieerde profiellijn is soms in lengte langer dan de beschikbare gemeten data.



Figuur 2-6: Overzicht van geprojecteerde gemeten raaidata en de vooraf gedefinieerde profiellijn raai 1. De vooraf gedefinieerde profiellijn is soms in lengte langer dan de beschikbare gemeten data.

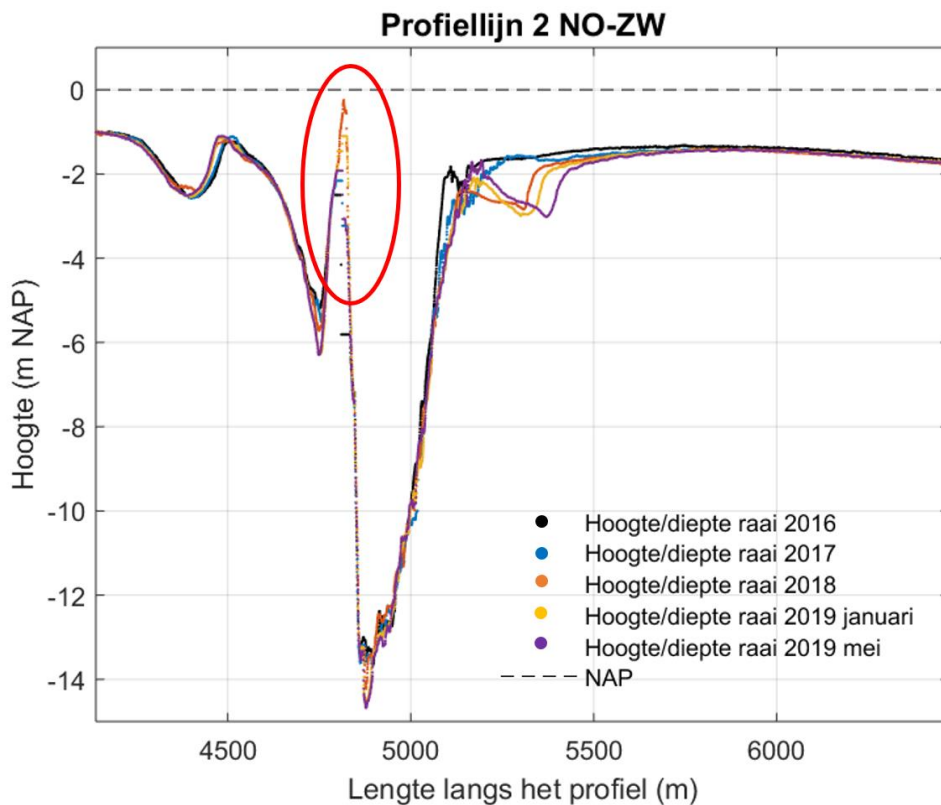


Figuur 2-7: Overzicht van alle bewerkte raaidata van verschillende jaren voor profiellijn 1 (in de periode van 2016 tot 2019).

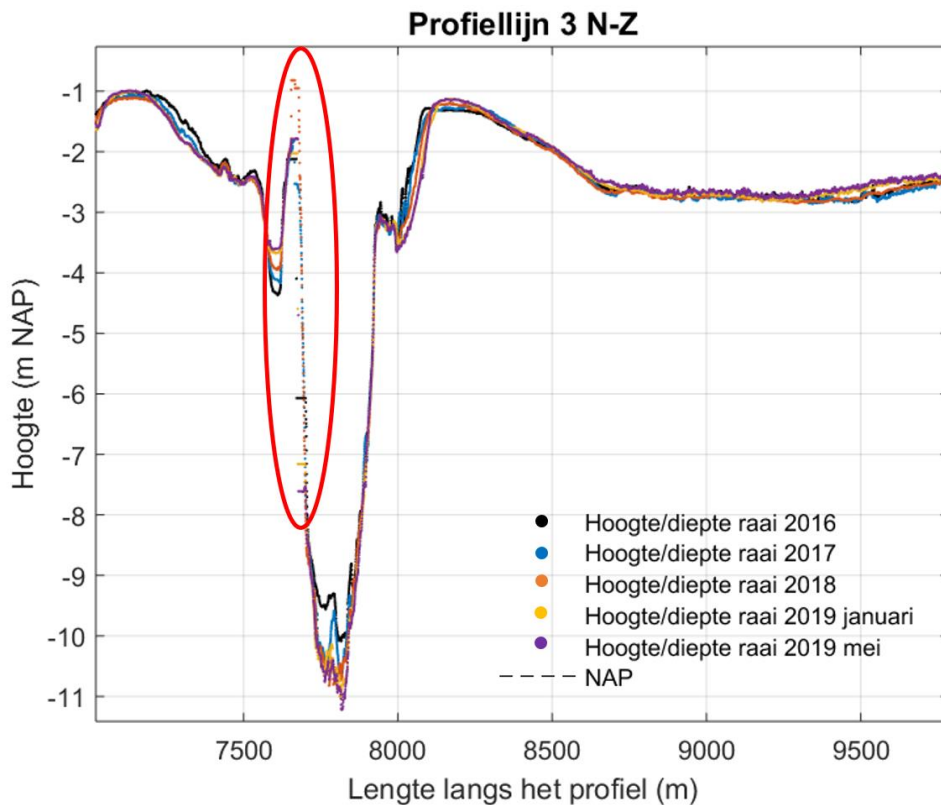
3 GEMETEN HOOGTE/DIEPTE IN DE RAAIEN

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden zijn de hoogtes getoond voor de 3 profielen die jaarlijks gemeten worden. In de raaien 2 en 3 zit een kleine onderbreking in de gegevens ter plaatse van de Pollendam. De Pollendam is de stenen stroomgeleidingsdam ten noordoosten van de vaargeul vanuit Harlingen. De Pollendam is dermate hoog dat deze niet varend kan worden ingemeten.



Figuur 3-1 Locatie ontbrekende raaidata ter plaatse van de Pollendam in profiellijn 2 - ingezoomd (in de periode van 2016 tot 2019).



Figuur 3-2 Locatie ontbrekende raaidata ter plaatste van de Pollendam in profiellijn 3 - ingezoomd (in de periode van 2016 tot 2019).

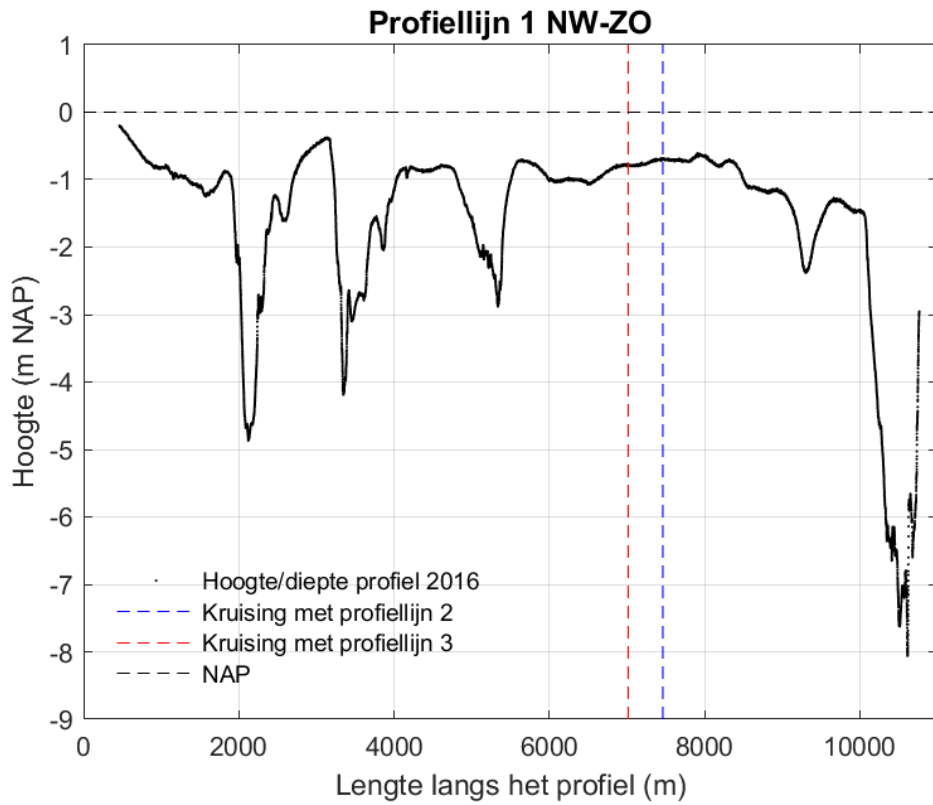
3.2 Metingen uit 2016

In de drie figuren hieronder (Figuur 3-3, Figuur 3-4 en Figuur 3-5) zijn de drie hoogte/diepte raaien getoond die zijn ingemeten in 2016. De raaien zijn ingemeten op 30 mei en 31 mei 2016.

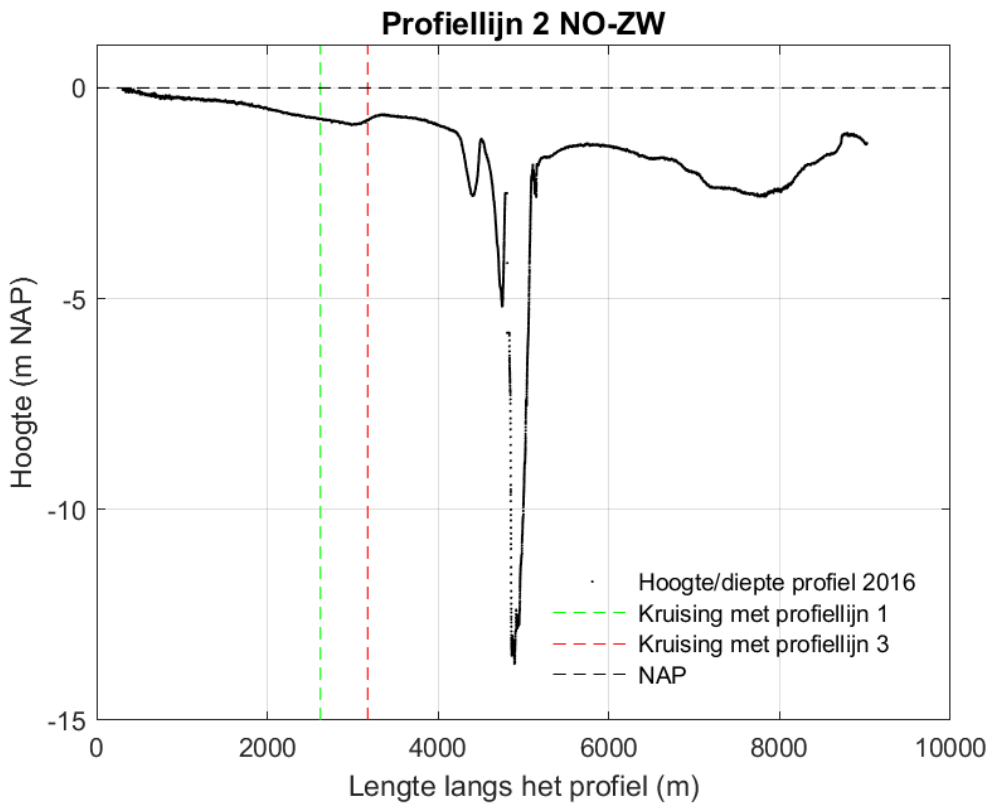
Om te kijken of de hoogte/diepteraaien onderling met elkaar overeen komen zijn er 3 controlepunten vergeleken (zie Figuur 3-6, Figuur 3-7 en Figuur 3-8, let daarbij op de schaal van deze detailkaarten). Deze controlepunten bestaan uit de kruispunten van de raaien. De dichtstbijzijnde punten van elke raai liggen enkele decimeters van elkaar af. Deze punten worden met elkaar vergeleken. Uit onderstaande meetgegevens blijkt dat er een hoogte/diepte verschil van enkele centimeters kan zitten tussen de kruisende raaien.

- Verschil van 4 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 2.
- Verschil van 2 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 3.
- Verschil van 6 centimeter tussen profiellijn 2 en profiellijn 3.

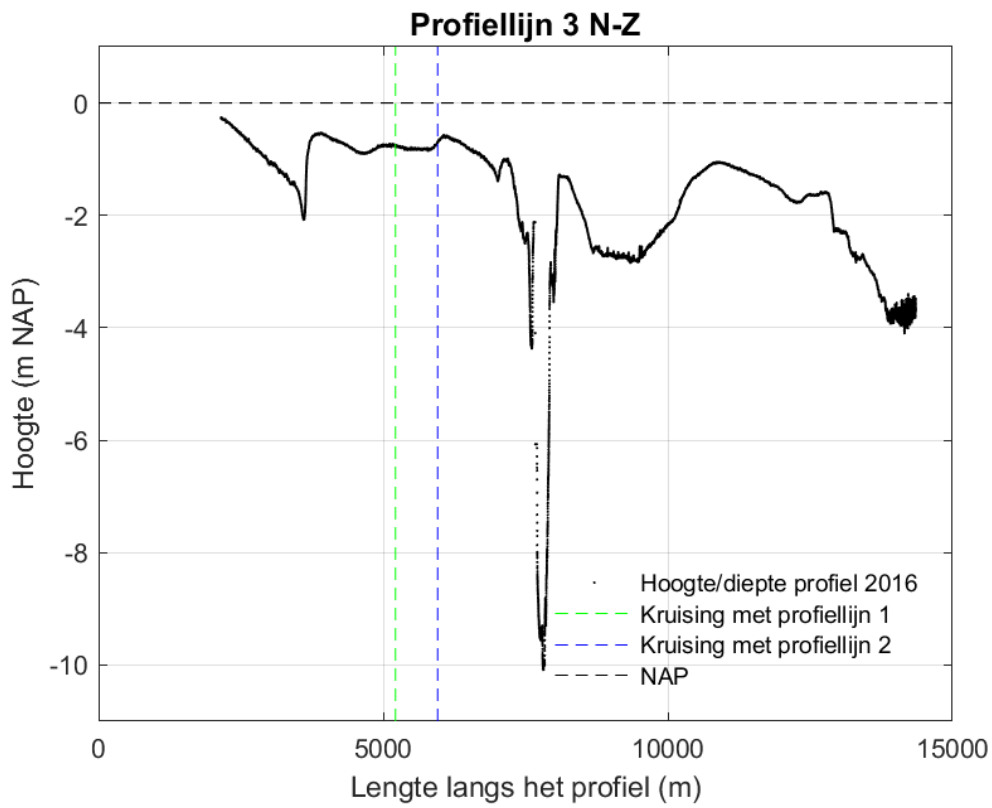
Hieruit blijkt dat hoogte/diepte raaien die op een volgende dag gemeten zijn enkele centimeters kunnen verschillen. Ten opzichte van profiellijn 1 ligt profiellijn 3 waarschijnlijk structureel iets hoger en profiellijn 2 structureel iets lager. Deze verschillen komen overeen met de nauwkeurigheid van dit type metingen. De nauwkeurigheid is ruime voldoende om te kijken naar bodemveranderingen binnen het studiegebied.



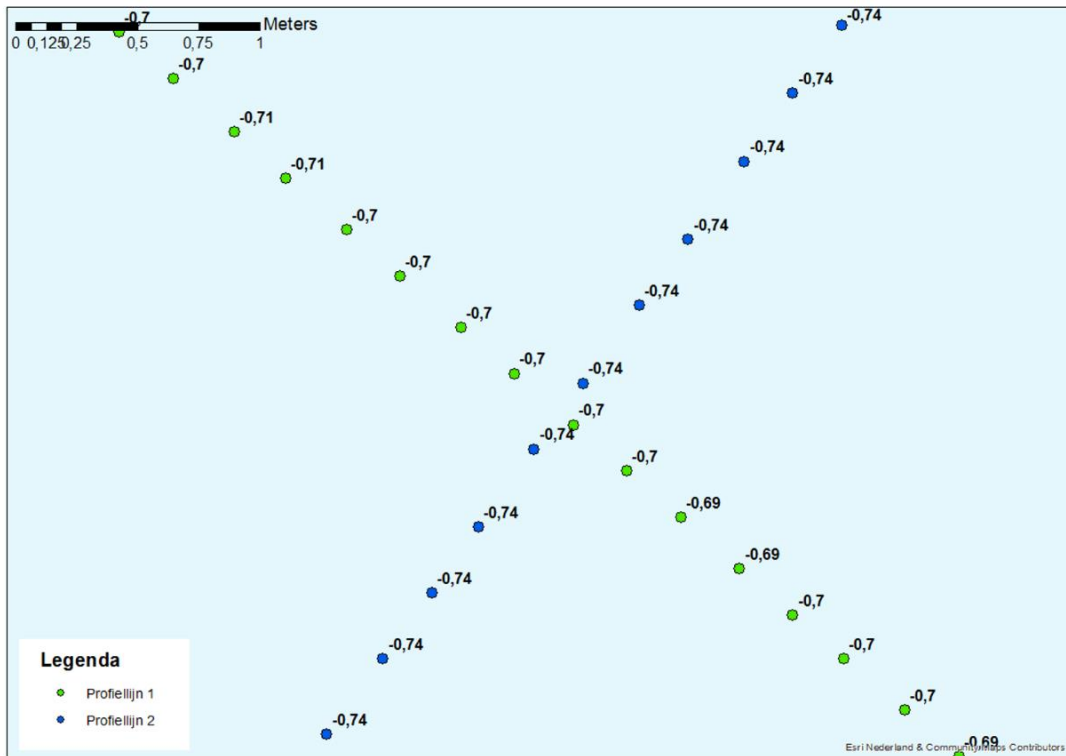
Figuur 3-3 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost in 2016.



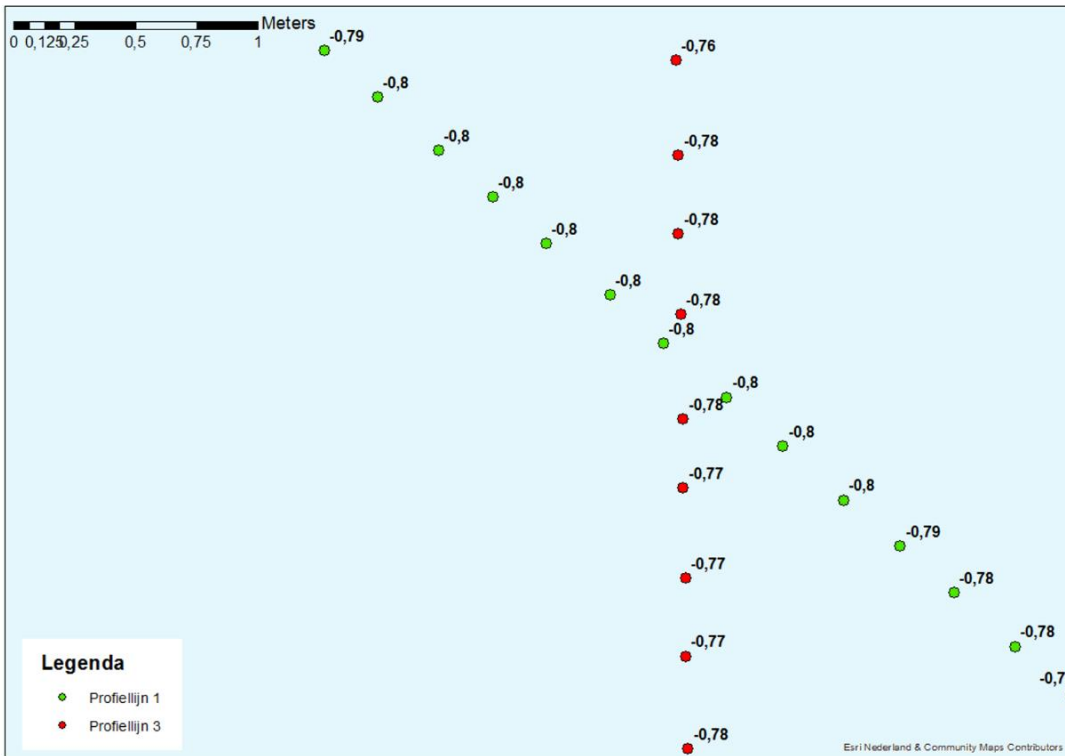
Figuur 3-4 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest in 2016.



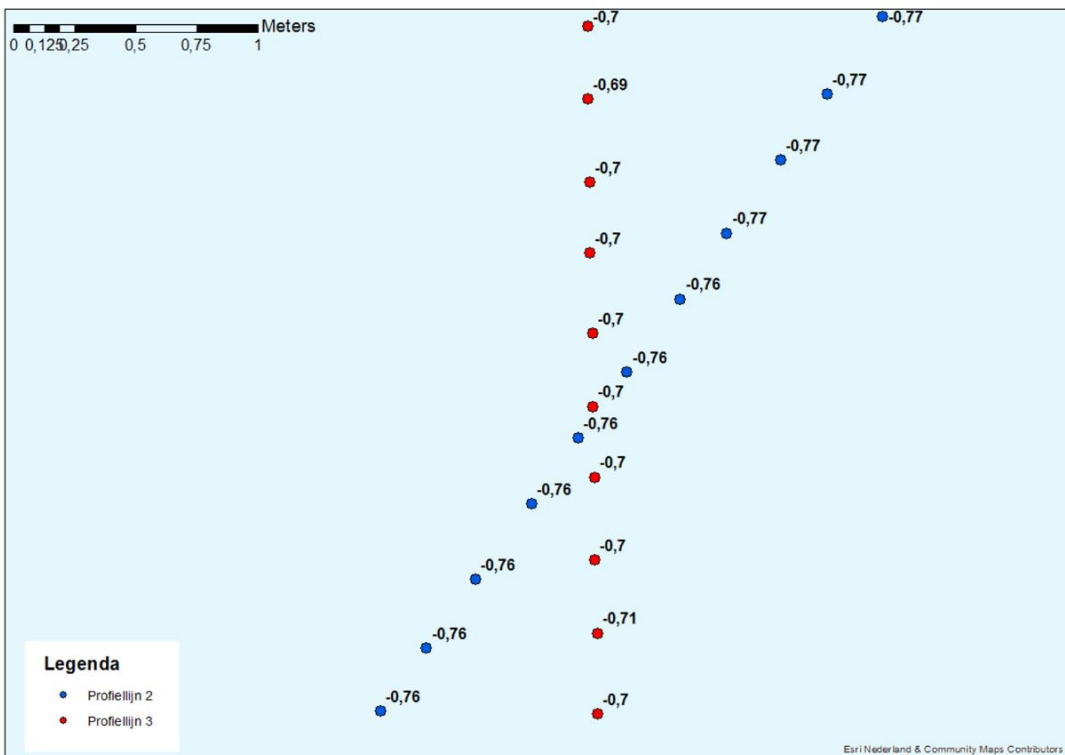
Figuur 3-5 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 3 van noord naar zuid in 2016.



Figuur 3-6 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 2 voor de hoogte/diepte raaien 2016, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-7 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2016, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-8 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 2 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2016, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.

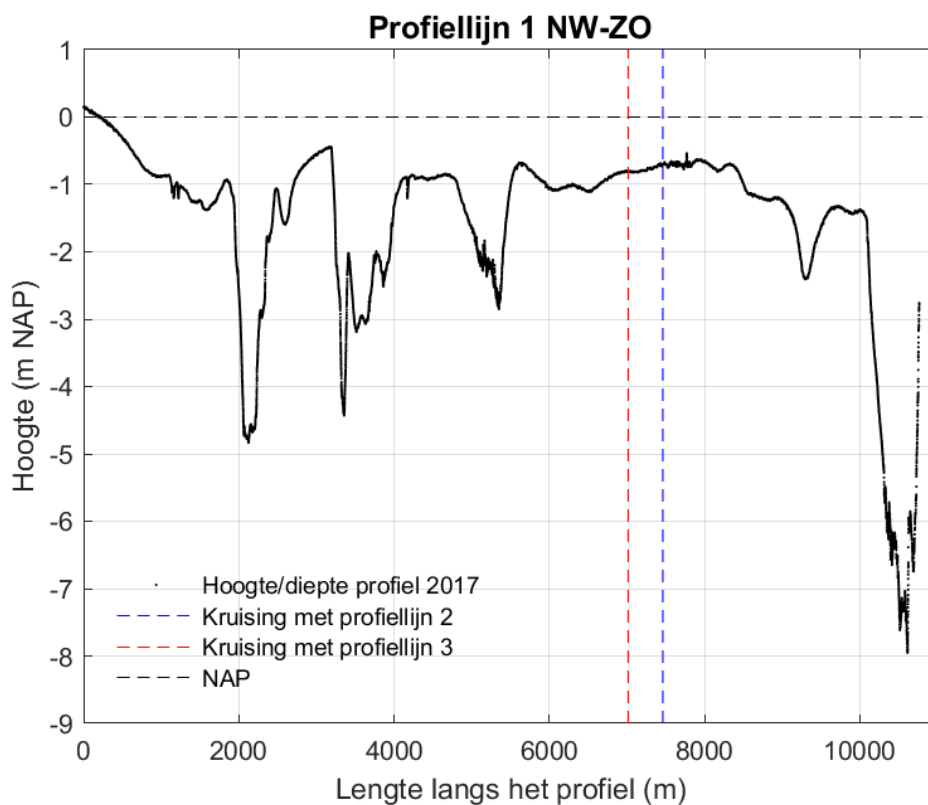
3.3 Metingen uit 2017

In onderstaande figuren (zie Figuur 3-9, Figuur 3-10 en Figuur 3-11) is de bodemligging in de drie hoogte/diepte raaien getoond, zoals gemeten op 18 mei 2017.

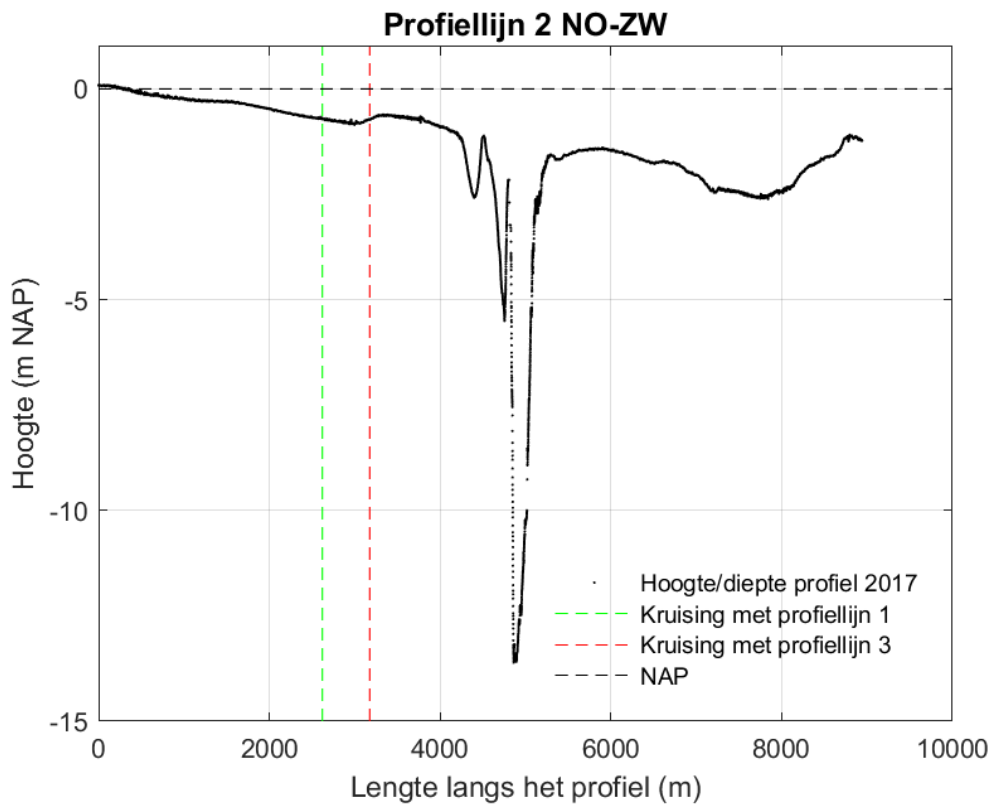
Om te kijken of de metingen van de drie hoogte/diepte raaien met elkaar overeenkomen, zijn er 3 controlepunten vergeleken (zie Figuur 3-12, Figuur 3-13 en Figuur 3-14). Uit de meetgegevens blijkt dat er een verschil van enkele centimeters kan zitten tussen de kruisende raaien:

- Verschil van 1 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 2.
- Verschil van 1 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 3.
- Geen verschil in hoogte/diepte tussen profiellijn 2 en profiellijn 3.

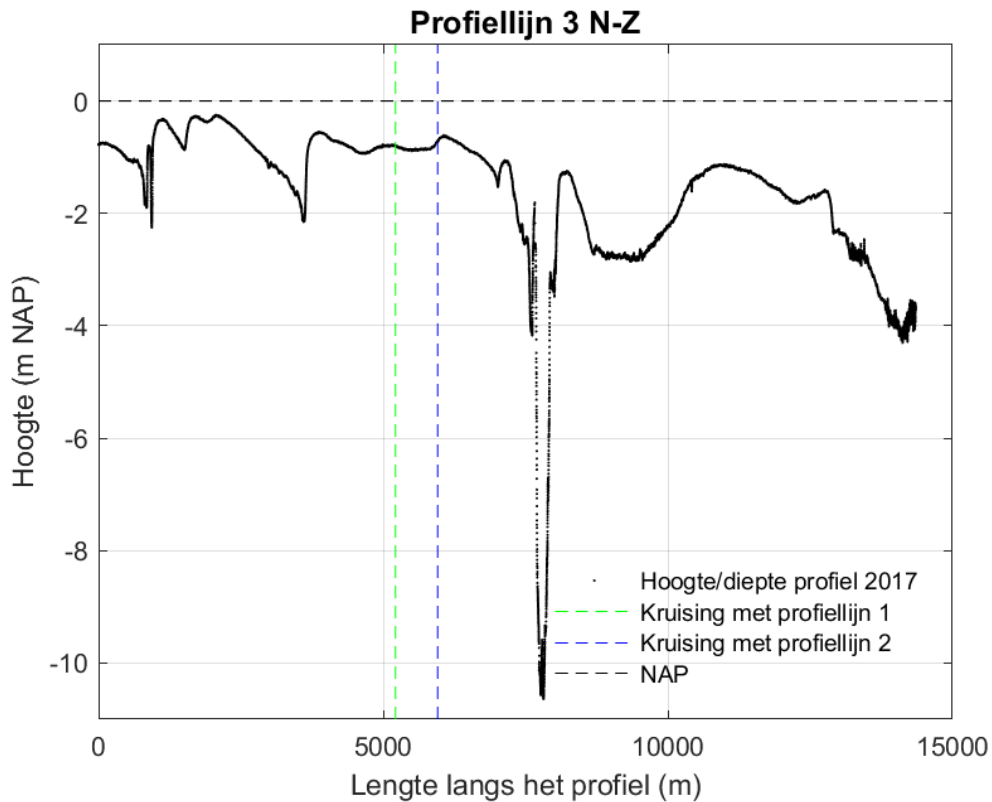
Hieruit blijkt dat de data van de verschillende profiellijnen qua hoogte/diepte raaien zeer goed met elkaar overeenkomen. De nauwkeurigheid van de opnamen valt ruim binnen de nauwkeurigheid voor dit type metingen. De nauwkeurigheid van de metingen is ruime voldoende in vergelijking met de maximale bodemdaling van de Pleistocene ondergrond van enkele centimeters die per jaar kan optreden.



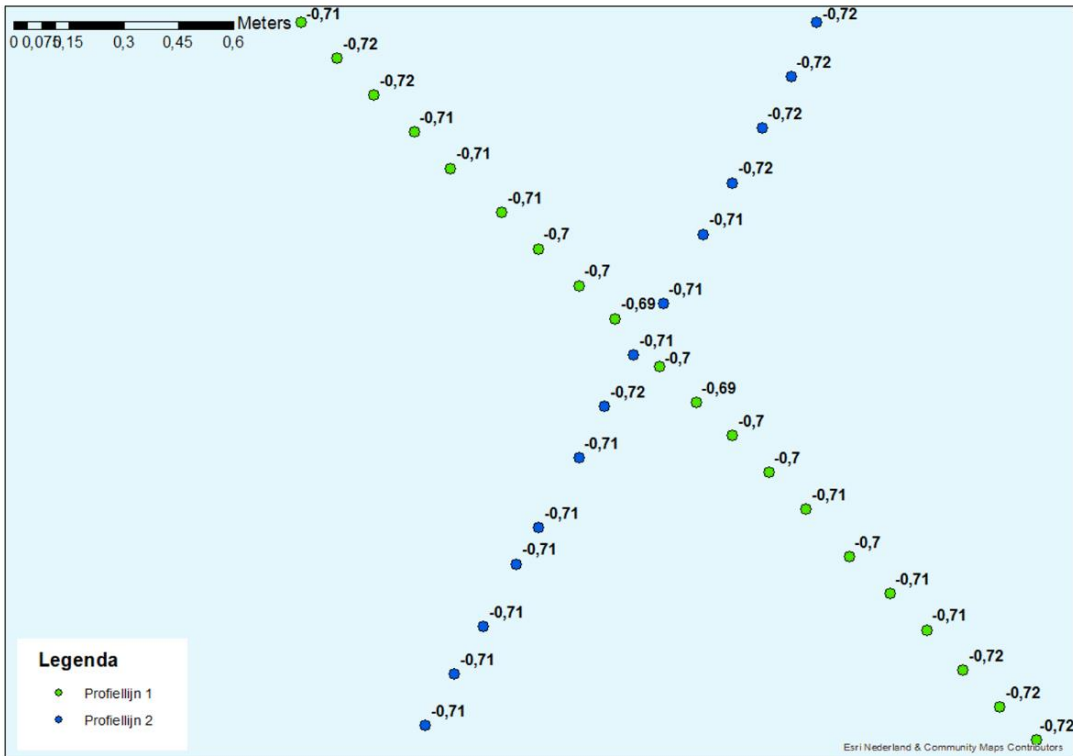
Figuur 3-9 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost in 2017.



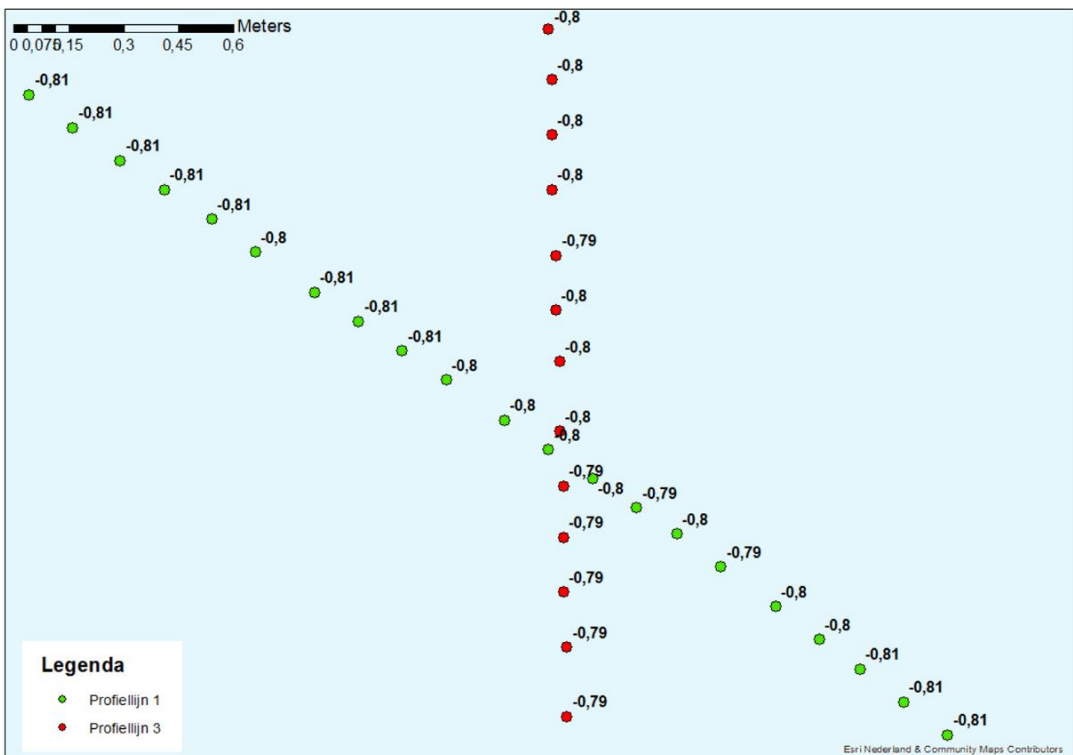
Figuur 3-10 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest in 2017.



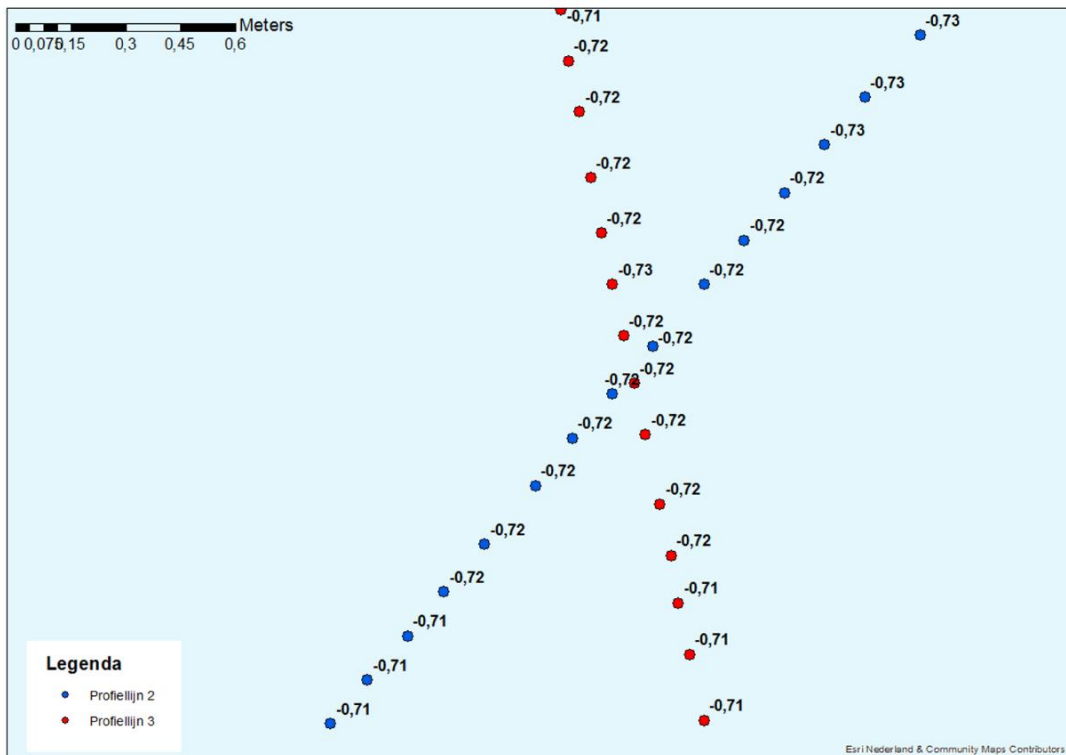
Figuur 3-11 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 3 van noord naar zuid in 2017.



Figuur 3-12 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 2 voor de hoogte/diepte raaien 2017, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-13 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2017, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-14 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 2 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2017, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.

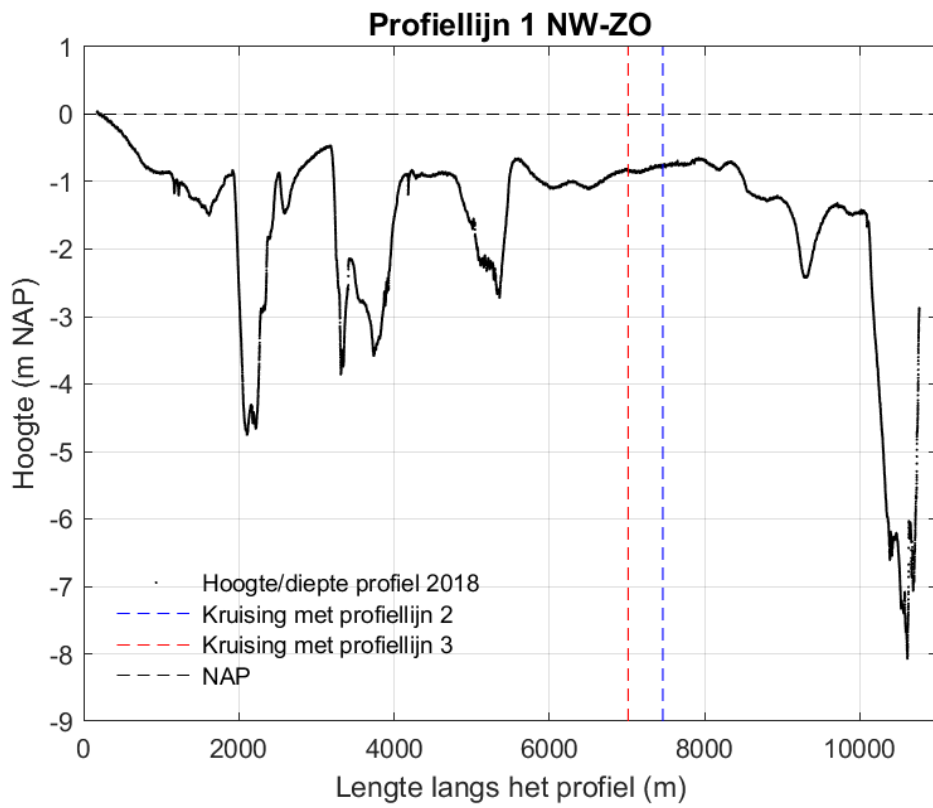
3.4 Metingen uit 2018

In onderstaande figuren (zie Figuur 3-15, Figuur 3-16 en Figuur 3-17) wordt de bodemligging getoond in de drie hoogte/diepte raaien die zijn gemeten op 20 maart 2018.

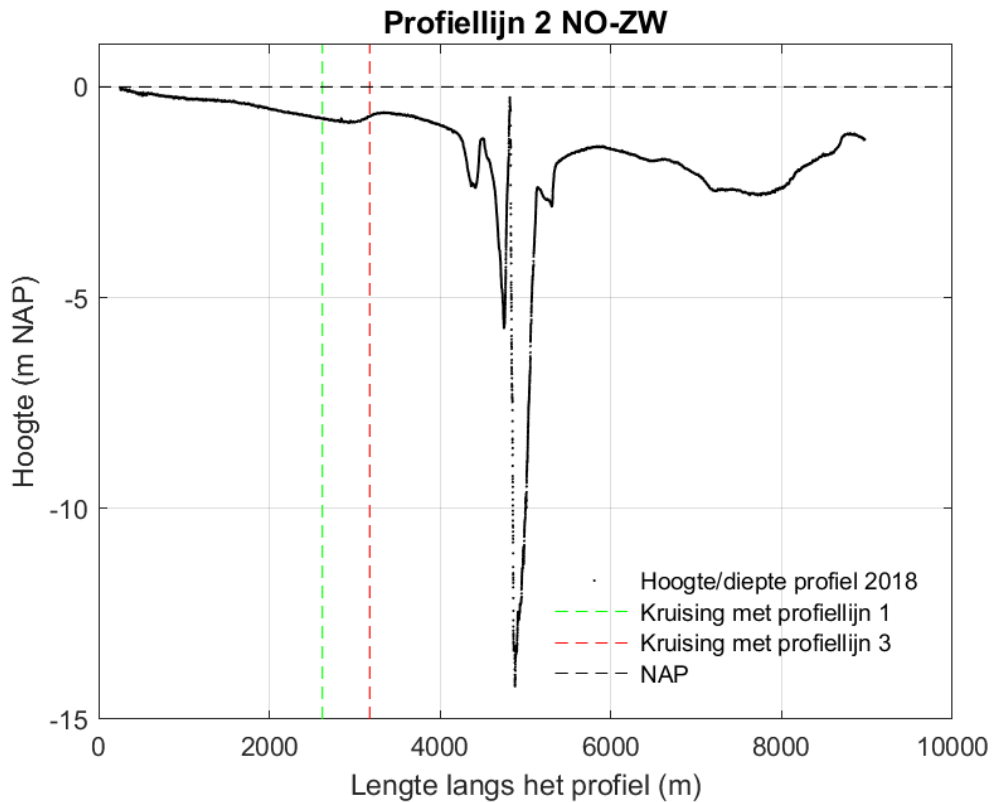
Om te kijken of de hoogte/diepte raaien met elkaar overeen komen zijn er 3 controlepunten vergeleken (zie Figuur 3-18, Figuur 3-19 en Figuur 3-20). Uit de meetgegevens blijkt dat er een hoogte/diepte verschil van enkele centimeters kan zitten tussen de kruisende raaien:

- Geen verschil in hoogte/diepte tussen profiellijn 1 en profiellijn 2.
- Verschil van 2 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 3.
- Verschil van 2 centimeter tussen profiellijn 2 en profiellijn 3.

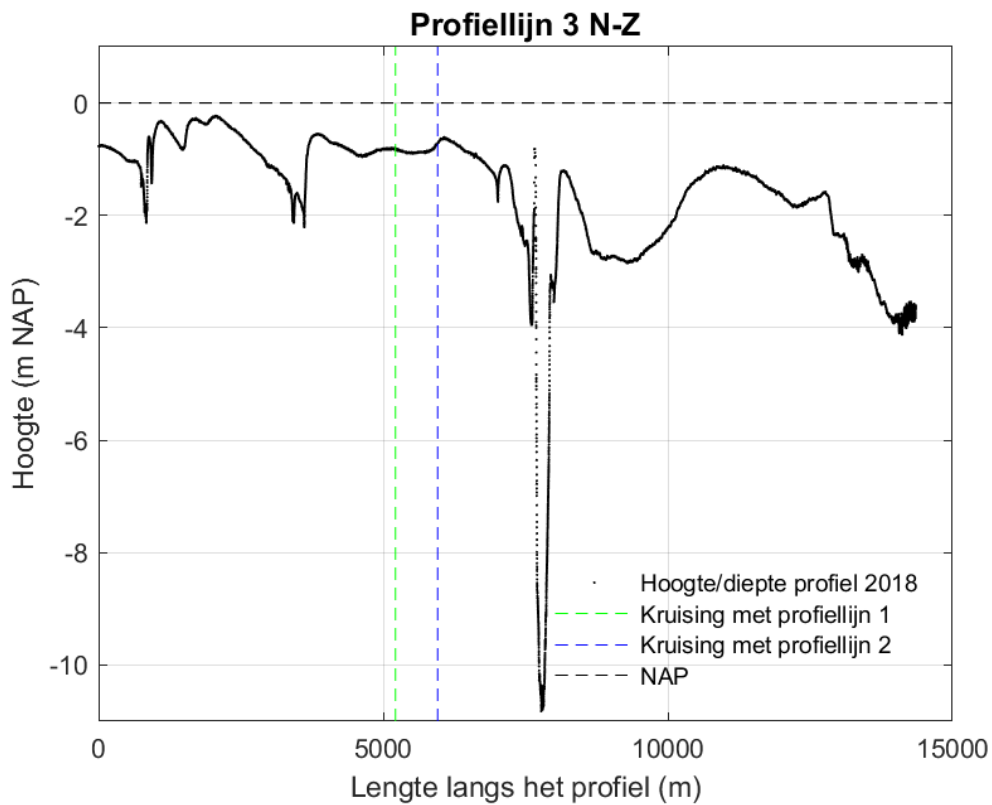
Uit deze controle blijkt dat de data van de verschillende profiellijnen qua hoogte/diepte raaien zeer goed met elkaar overeenkomen. De nauwkeurigheid van de opnamen valt ruim binnen de nauwkeurigheid voor dit type metingen.



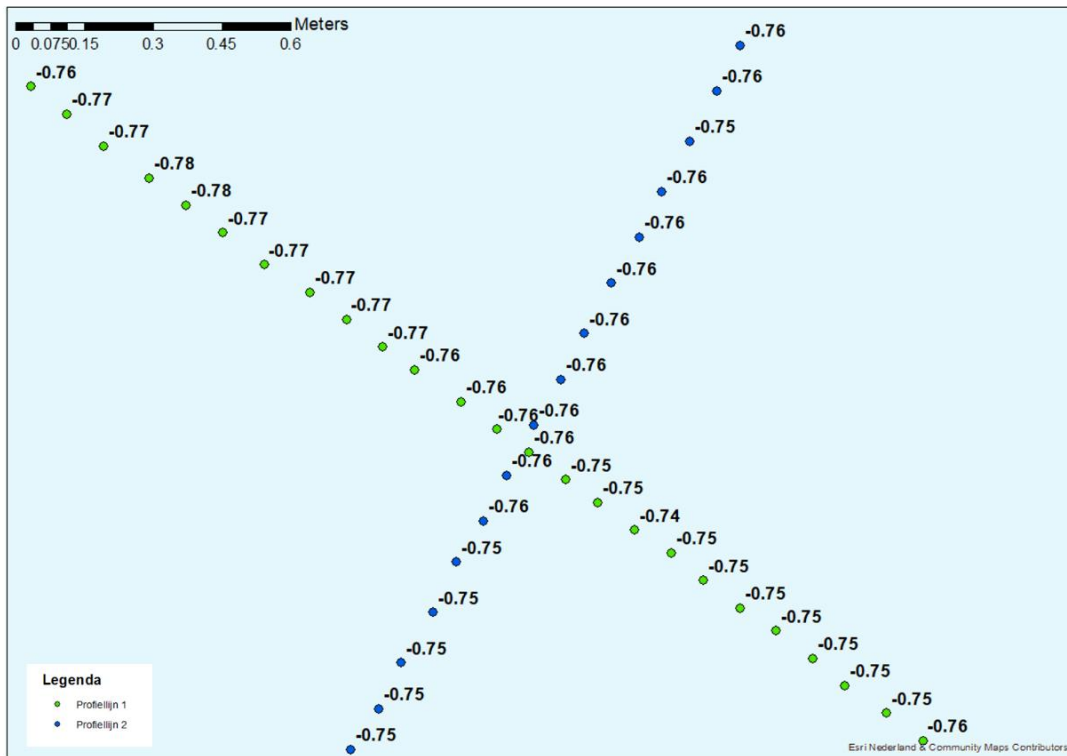
Figuur 3-15 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost in 2018.



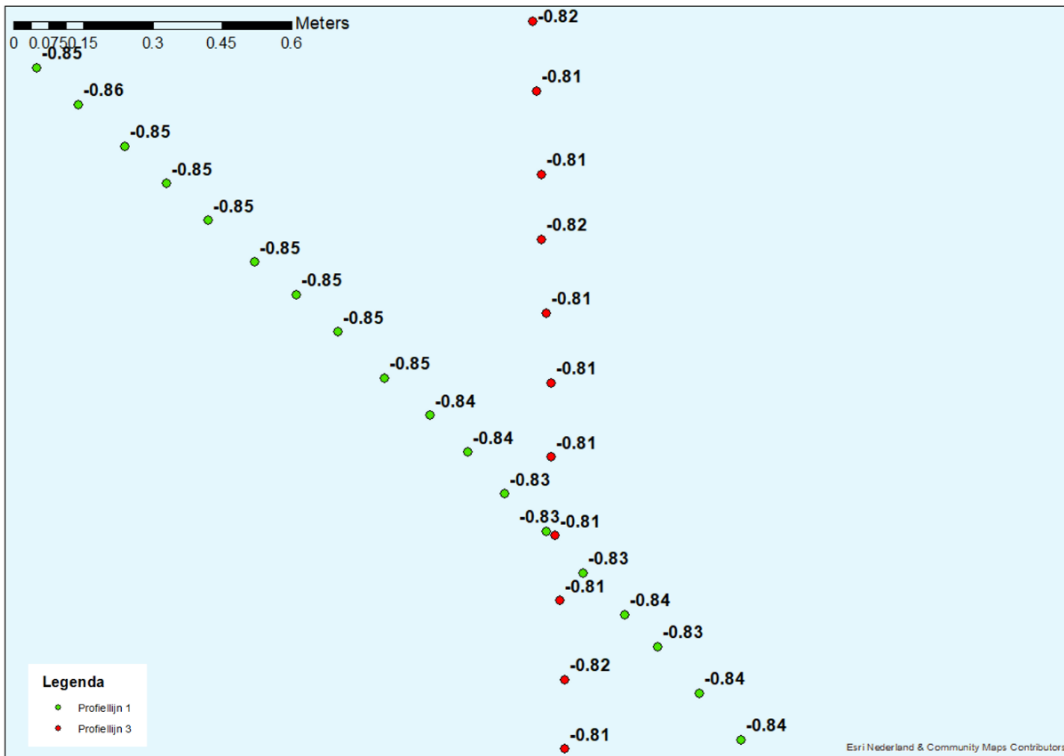
Figuur 3-16 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest in 2018.



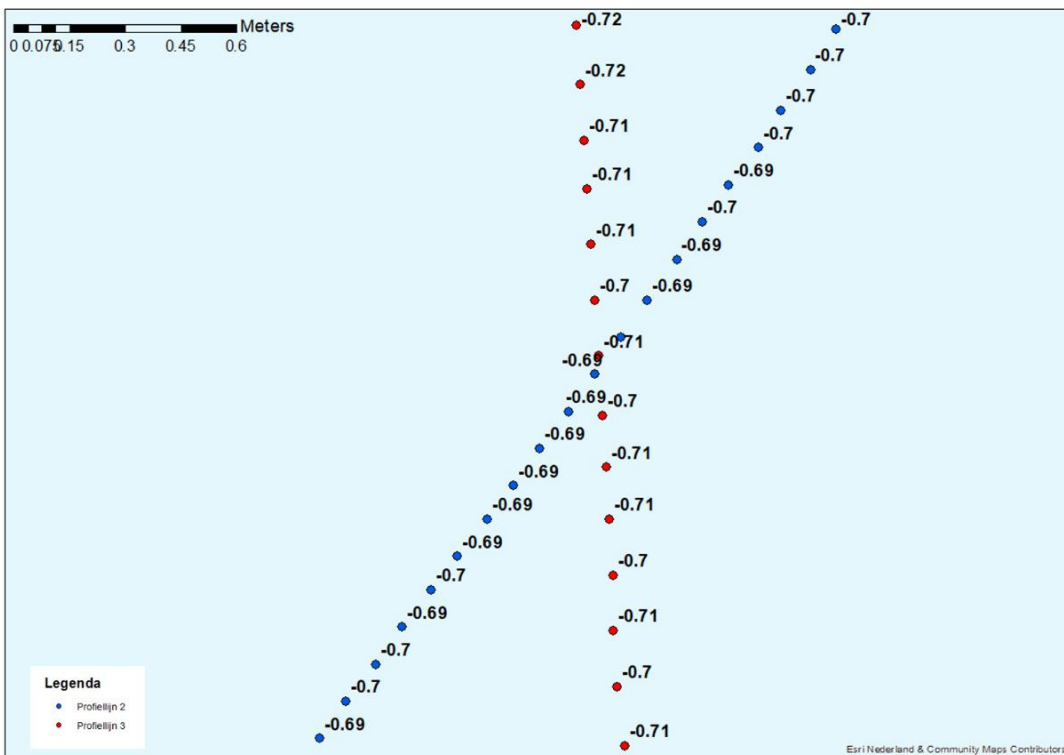
Figuur 3-17 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 3 van noord naar zuid in 2018.



Figuur 3-18 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 2 voor de hoogte/diepte raaien 2018, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-19 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2018, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-20 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 2 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2018, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.

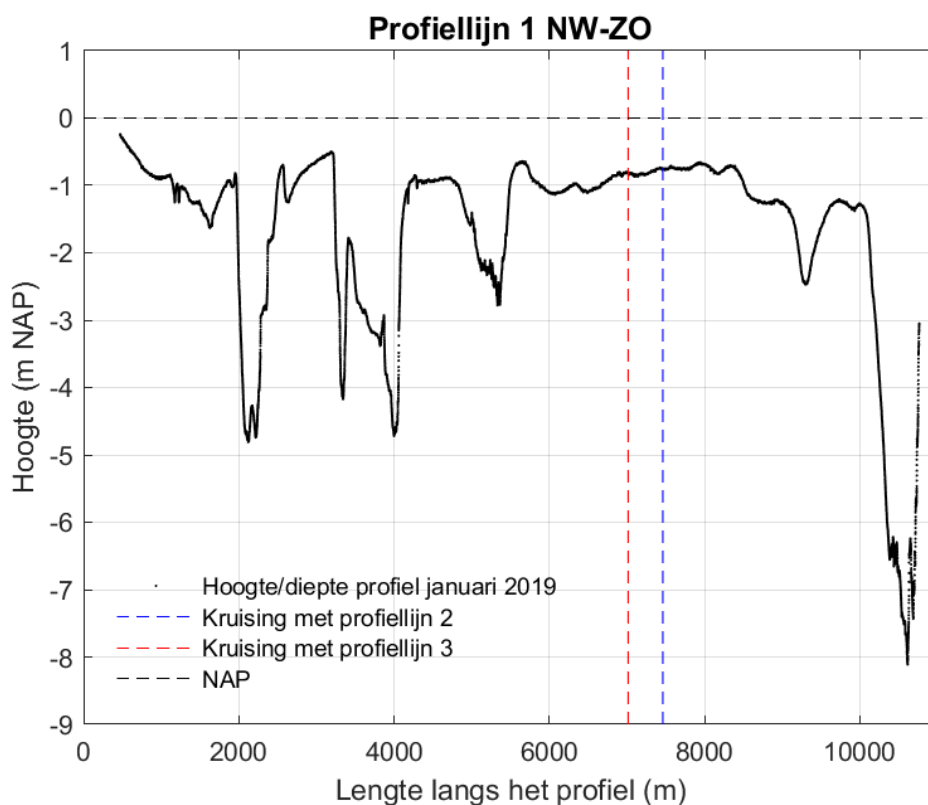
3.5 Metingen uit januari 2019

In onderstaande figuren (zie Figuur 3-21, Figuur 3-22 en Figuur 3-23) tonen de hoogte/diepte in de drie raaien, die zijn ingemeten in op 25 januari 2019.

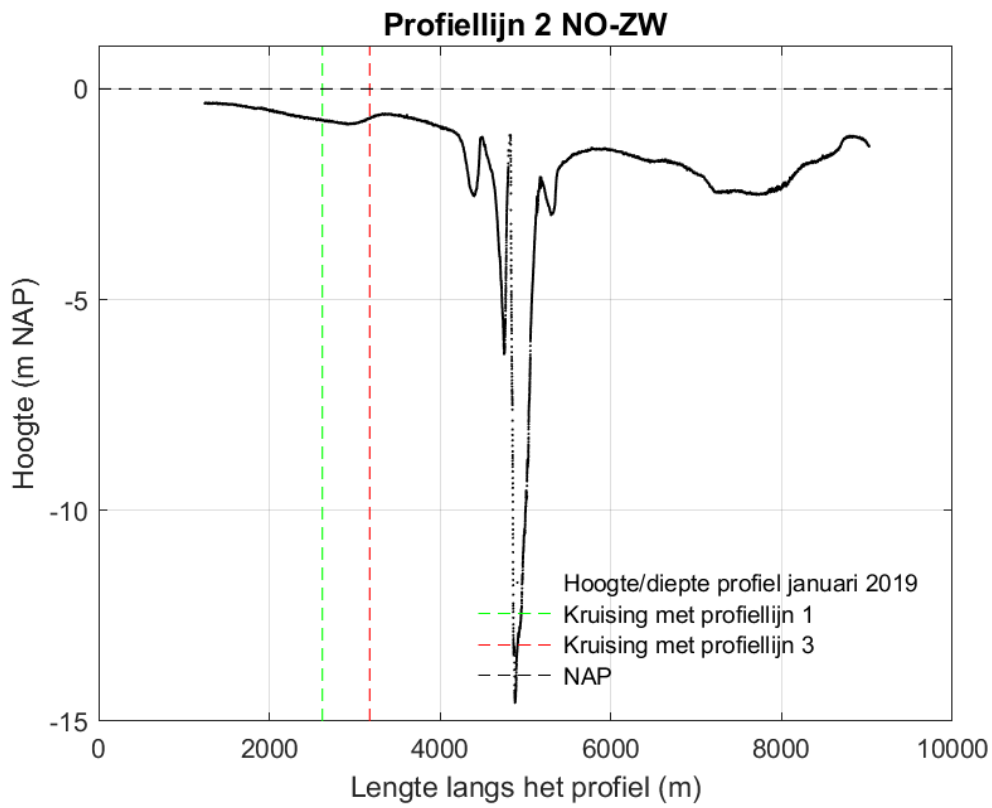
Om te kijken of de hoogte/diepte raaien met elkaar overeen komen zijn er 3 controlepunten vergeleken (zie Figuur 3-24, Figuur 3-25 en Figuur 3-26). Uit de meetgegevens blijkt dat er een hoogte/diepte verschil van enkele centimeters kan zitten tussen de kruisende raaien:

- Verschil van 1 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 2.
- Verschil van 2 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 3.
- Verschil van 3 centimeter tussen profiellijn 2 en profiellijn 3.

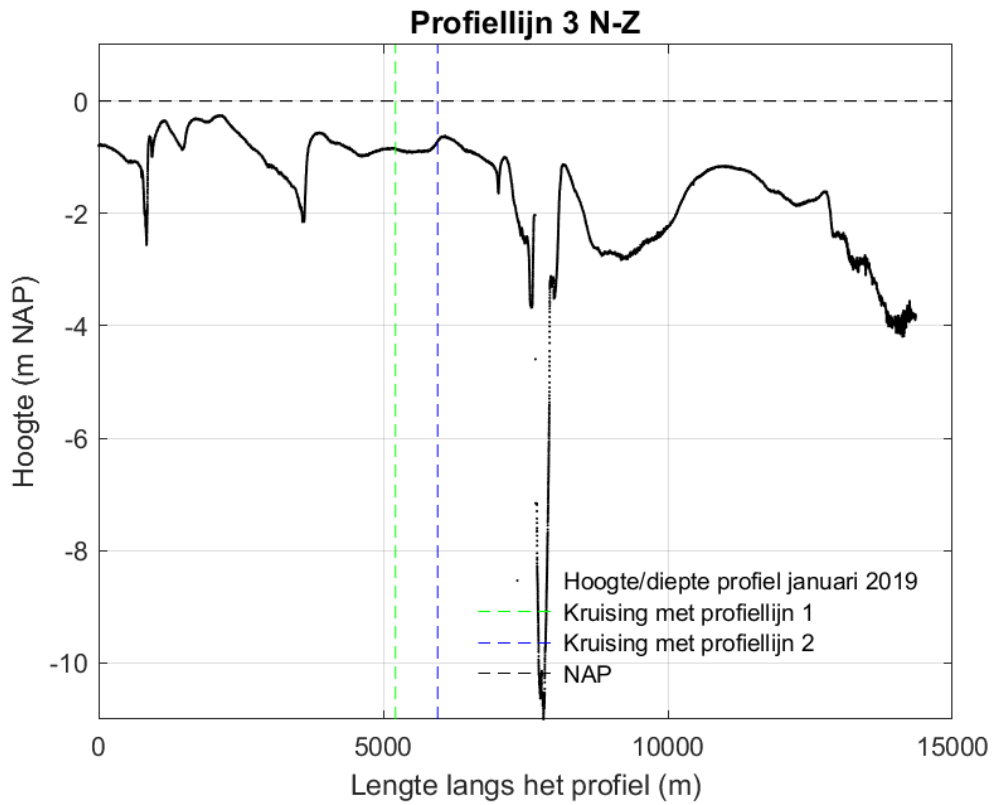
Uit deze controle blijkt dat de data van de verschillende profiellijnen qua hoogte raaien goed met elkaar overeenkomen. De nauwkeurigheid van de opnamen valt binnen de nauwkeurigheid voor dit type metingen.



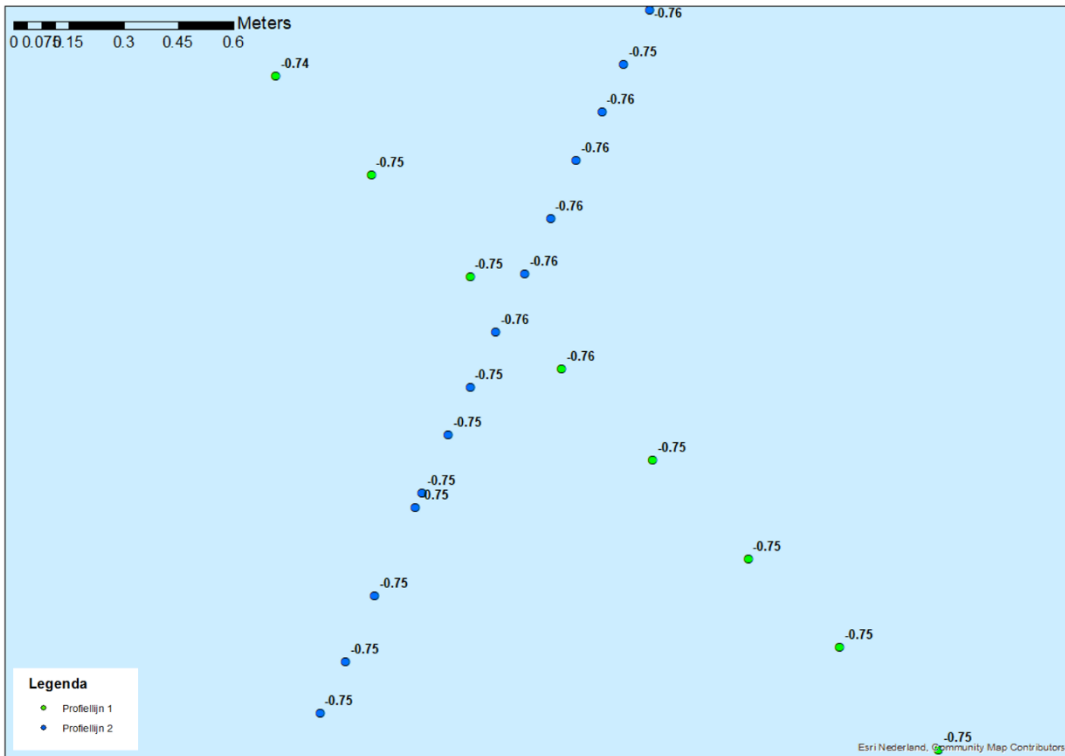
Figuur 3-21 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost in januari 2019.



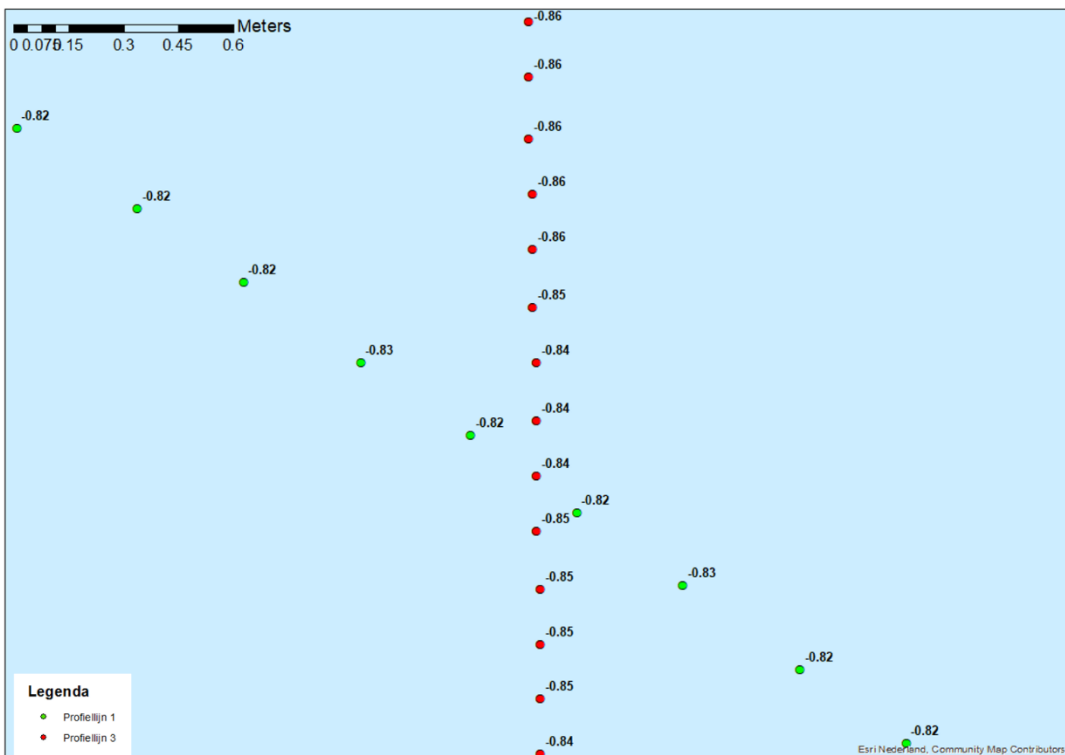
Figuur 3-22 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest in januari 2019.



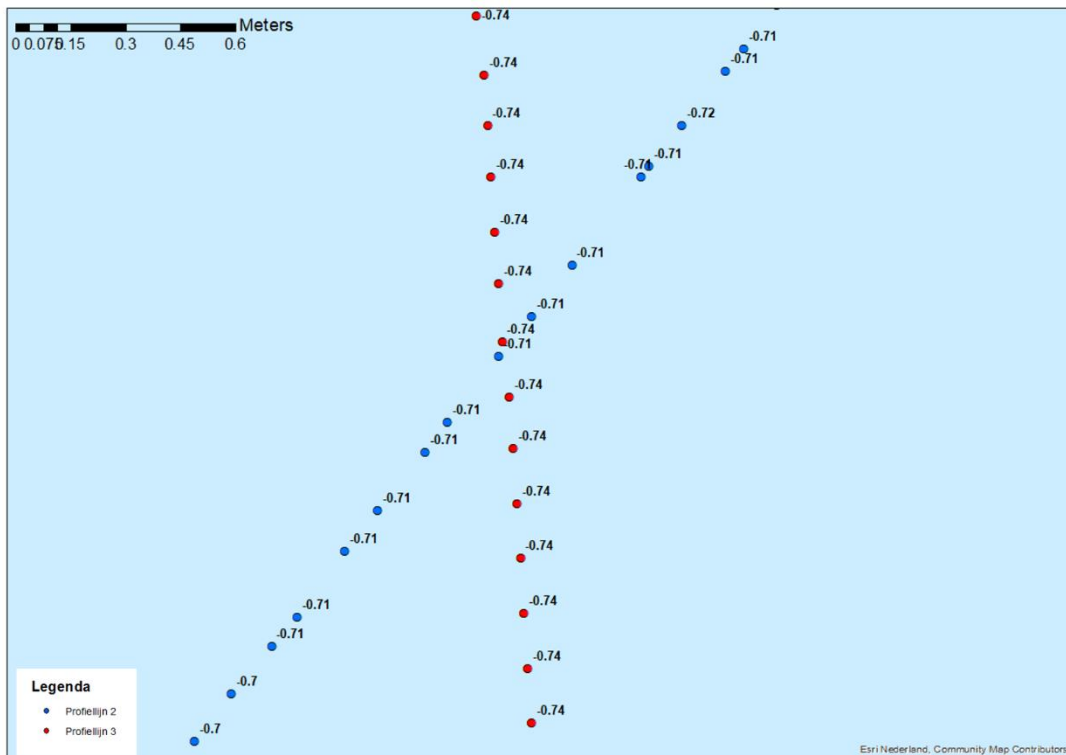
Figuur 3-23 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 3 van noord naar zuid in januari 2019.



Figuur 3-24 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 2 voor de hoogte/diepte raaien januari 2019, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-25 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien januari 2019, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-26 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 2 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien januari 2019, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.

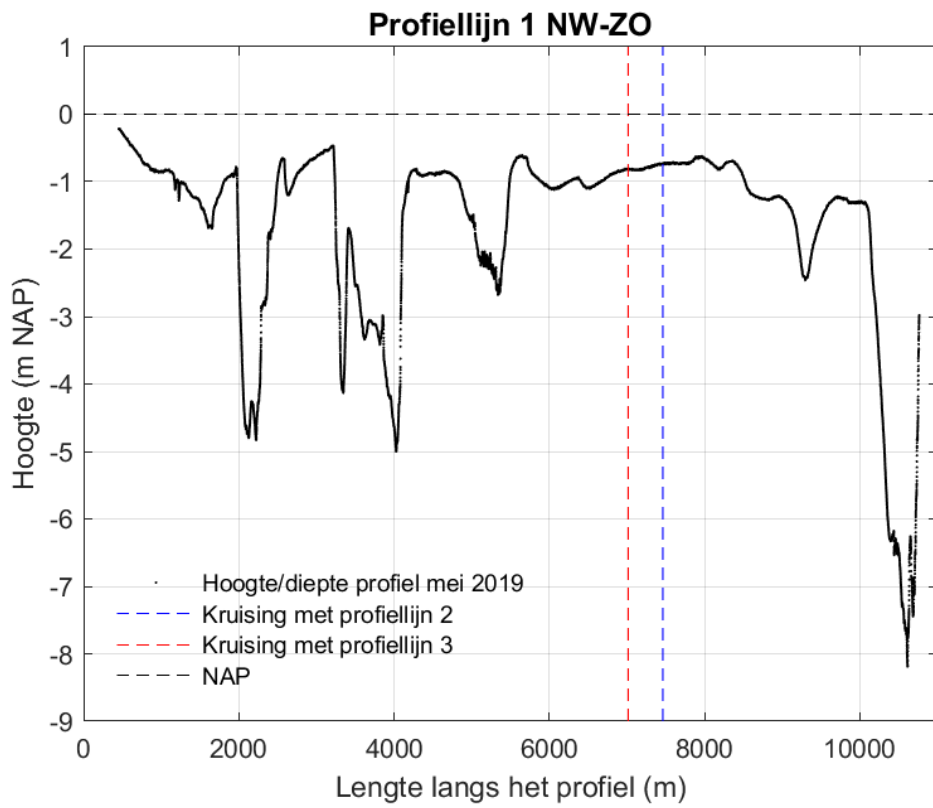
3.6 Metingen uit mei 2019

In onderstaande figuren (zie Figuur 3-27, Figuur 3-28 en Figuur 3-29) laten de hoogte/diepte zien in de drie raaien, zoals gemeten op 10 mei 2019.

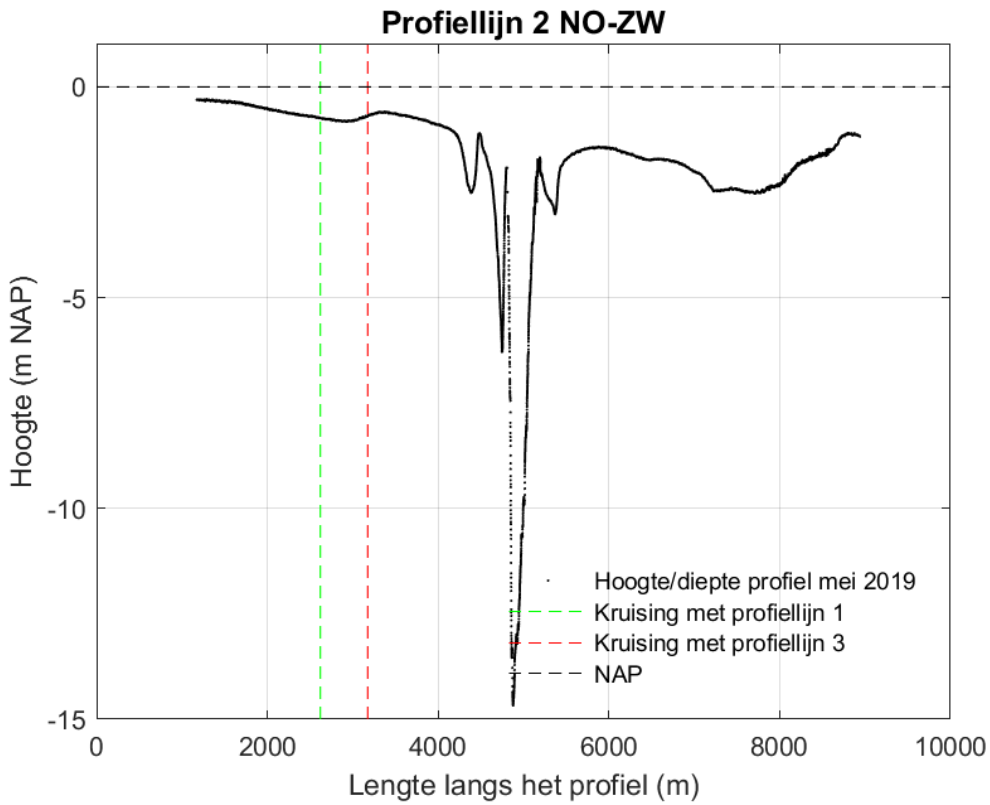
Om te kijken of de hoogte/diepte raaien met elkaar overeen komen zijn er 3 controlepunten vergeleken (zie Figuur 3-30, Figuur 3-31 en Figuur 3-32). Uit de meetgegevens blijkt dat er een hoogte/diepte verschil van enkele centimeters kan zitten tussen de kruisende raaien:

- Verschil van 1 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 2.
- Verschil van 1 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 3.
- Verschil van 3 centimeter tussen profiellijn 2 en profiellijn 3.

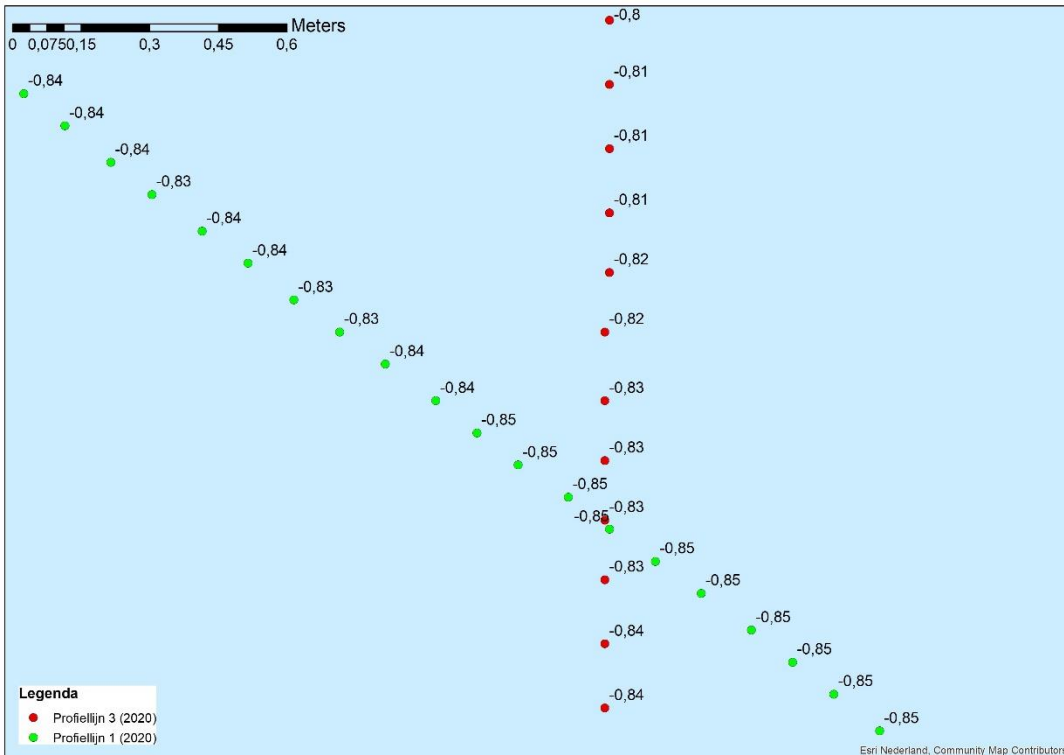
Uit deze controle blijkt dat de data van de verschillende profiellijnen qua hoogte/diepte raaien goed met elkaar overeenkomen. De nauwkeurigheid van de opnamen valt binnen de nauwkeurigheid voor dit type metingen.



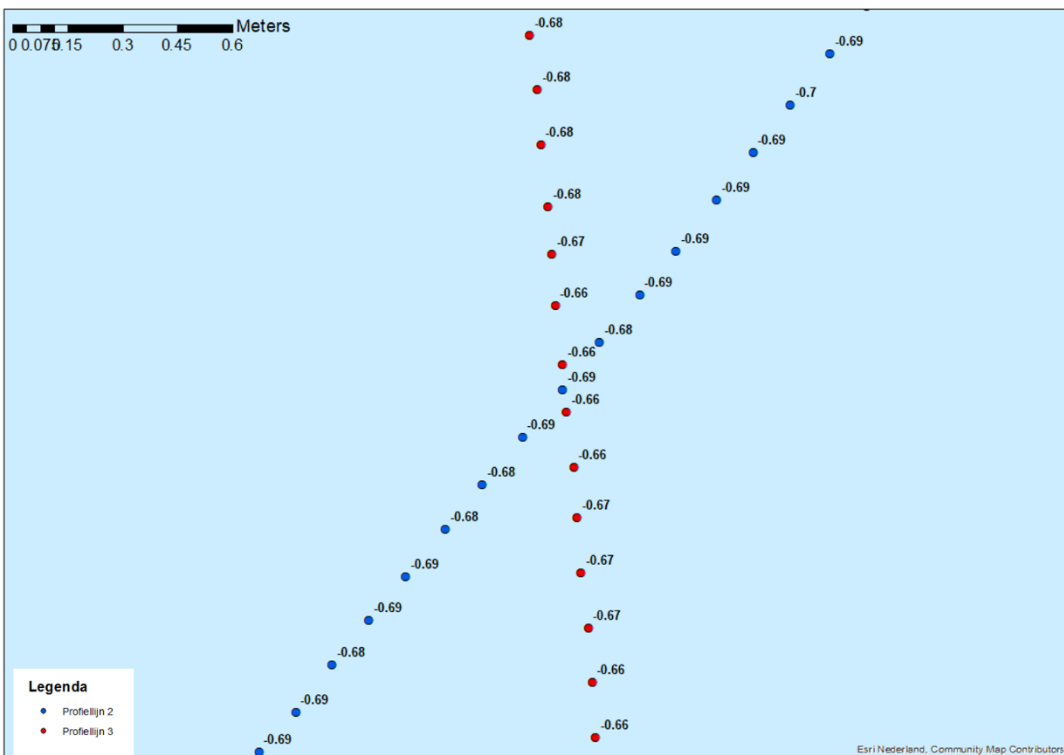
Figuur 3-27 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost in mei 2019.



Figuur 3-28 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest in mei 2019.



Figuur 3-31 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien mei 2019, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-32 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 2 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien mei 2019, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.

3.7 Metingen uit 2020

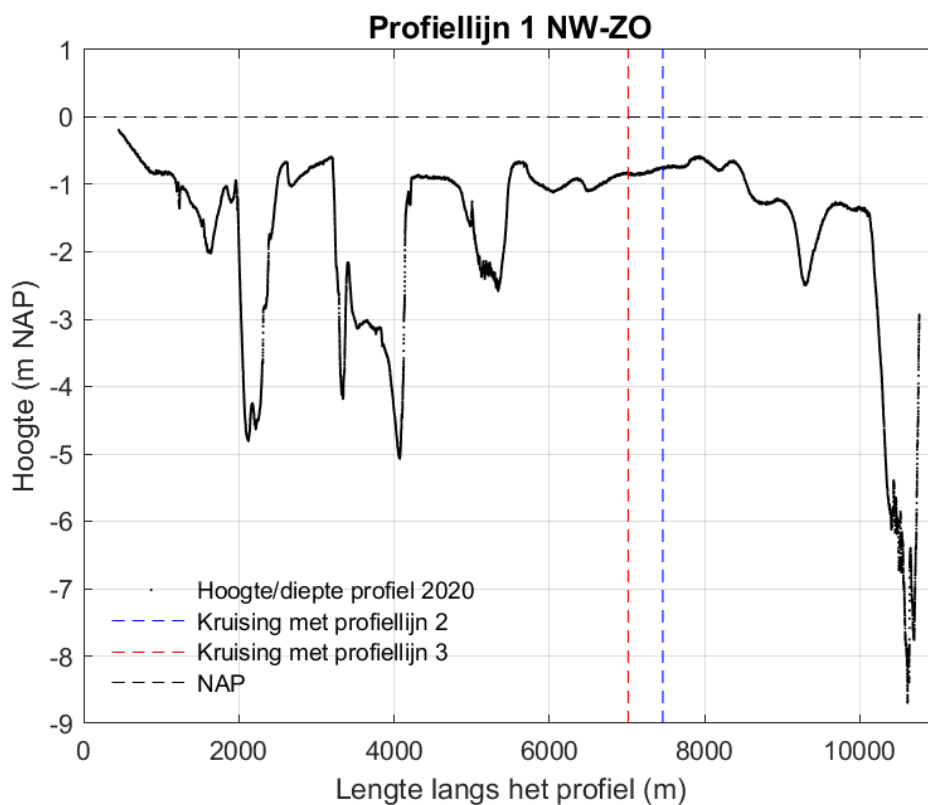
In onderstaande figuren (zie Figuur 3-33 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost in 2020., Figuur 3-34 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest in 2020. Figuur 3-35

Dwarsdoorsnede langs profiellijn 3 van noord naar zuid in 2020.) laten de hoogte/diepte zien in de drie raaien, zoals gemeten in 2020.

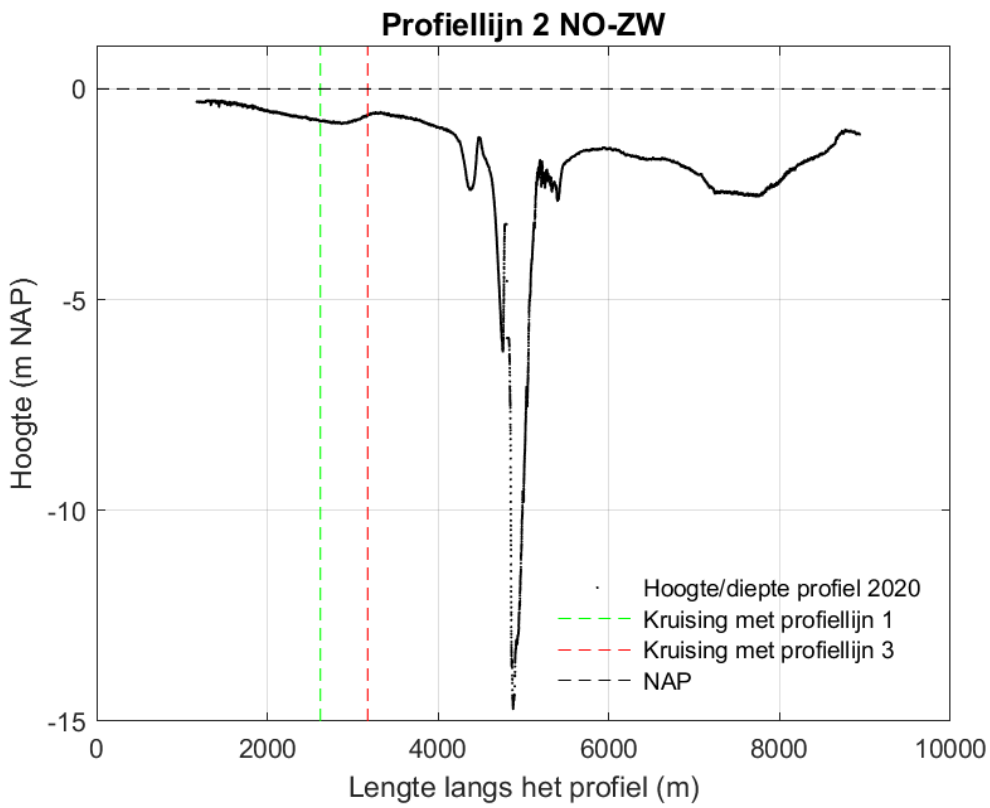
Om te kijken of de hoogte/diepte raaien met elkaar overeen komen zijn er 3 controlepunten vergeleken (zie Figuur 3-36 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 2 voor de hoogte/diepte raaien 2020, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP., Figuur 3-37 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2020, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.en Figuur 3-38). Uit de meetgegevens blijkt dat er een hoogte/diepte verschil van enkele centimeters kan zitten tussen de kruisende raaien:

- Verschil van 1 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 2.
- Verschil van 1 centimeter tussen profiellijn 1 en profiellijn 3.
- Verschil van 3 centimeter tussen profiellijn 2 en profiellijn 3.

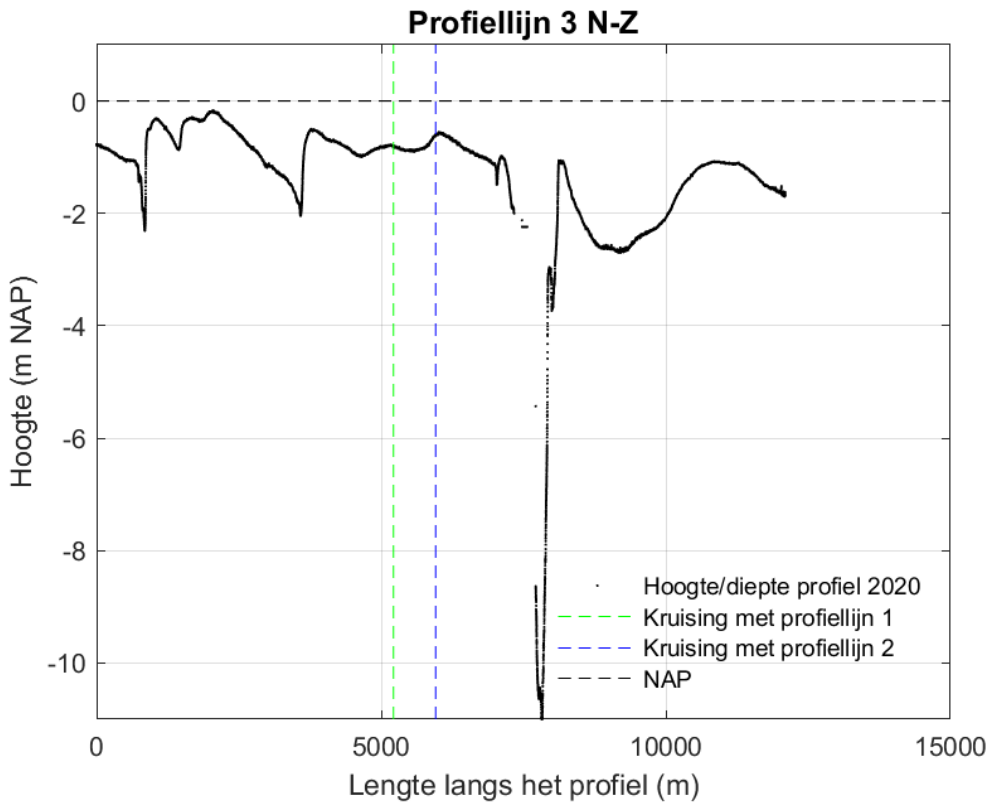
Uit deze controle blijkt dat de data van de verschillende profiellijnen qua hoogte/diepte raaien goed met elkaar overeenkomen. De nauwkeurigheid van de opnamen valt binnen de nauwkeurigheid voor dit type metingen.



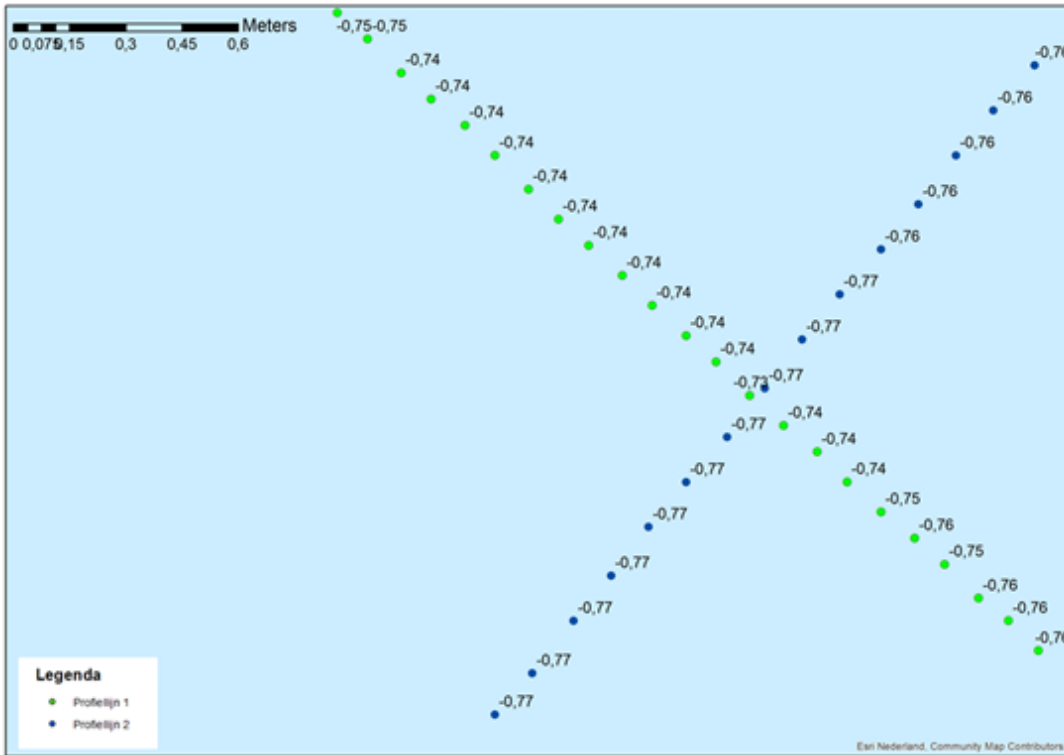
Figuur 3-33 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost in 2020.



Figuur 3-34 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest in 2020.



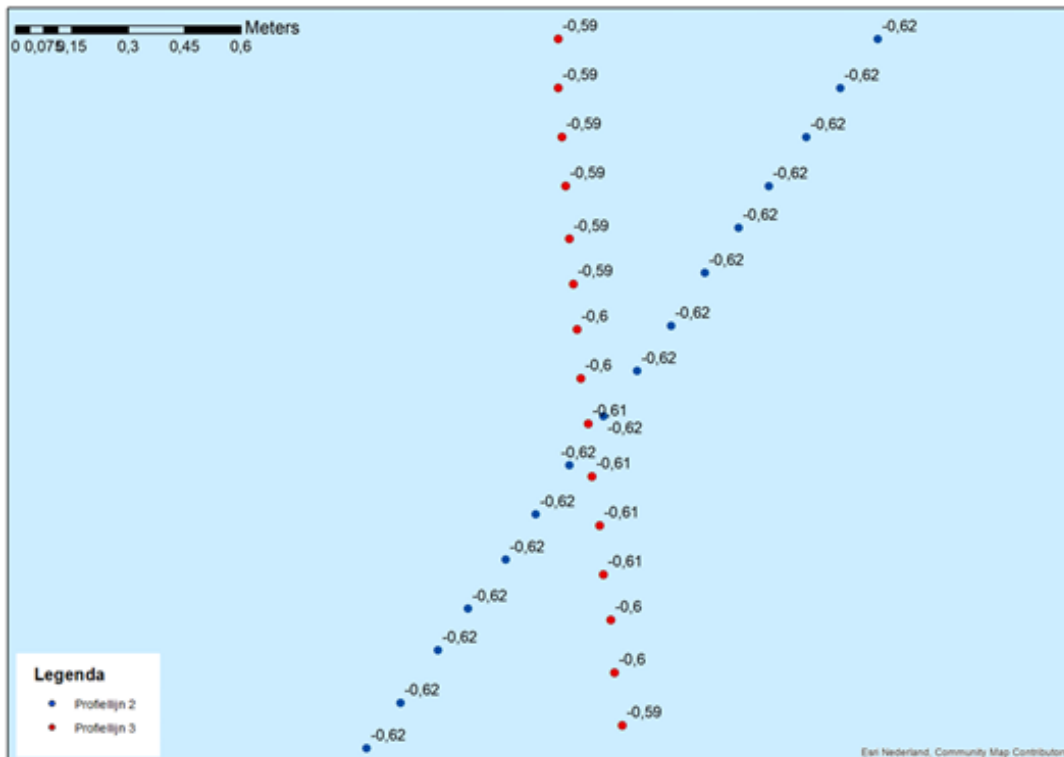
Figuur 3-35 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 3 van noord naar zuid in 2020.



Figuur 3-36 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 2 voor de hoogte/diepte raaien 2020, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-37 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 1 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2020, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.



Figuur 3-38 Detailkaart controlepunt tussen profiellijn 2 en profiellijn 3 voor de hoogte/diepte raaien 2020, hoogtemetingen zijn weergegeven in m NAP.

4 VERSCHILLEN IN HOOGTE/DIEPTE IN DE RAAIEN

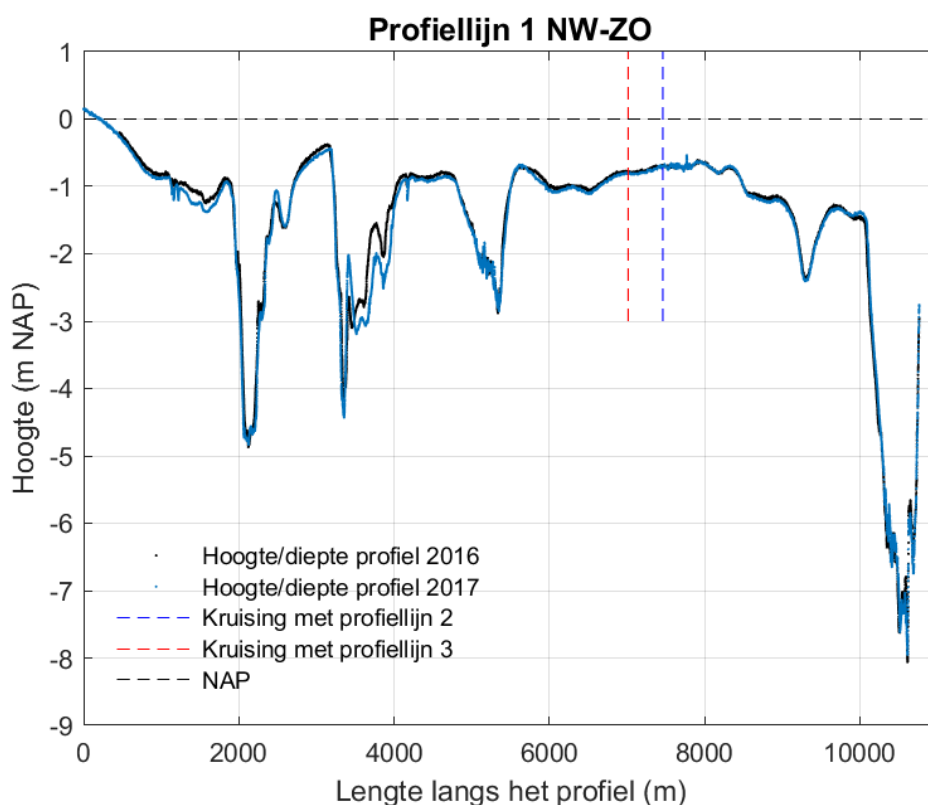
4.1 Inleiding

In de volgende paragrafen worden steeds de opeenvolgende metingen vergeleken, zodat duidelijk wordt welke veranderingen van jaar op jaar (en van januari tot mei 2019) zijn opgetreden). De observaties over de veranderingen over de gehele periode (2016-2020) staan in paragraaf 4.7.

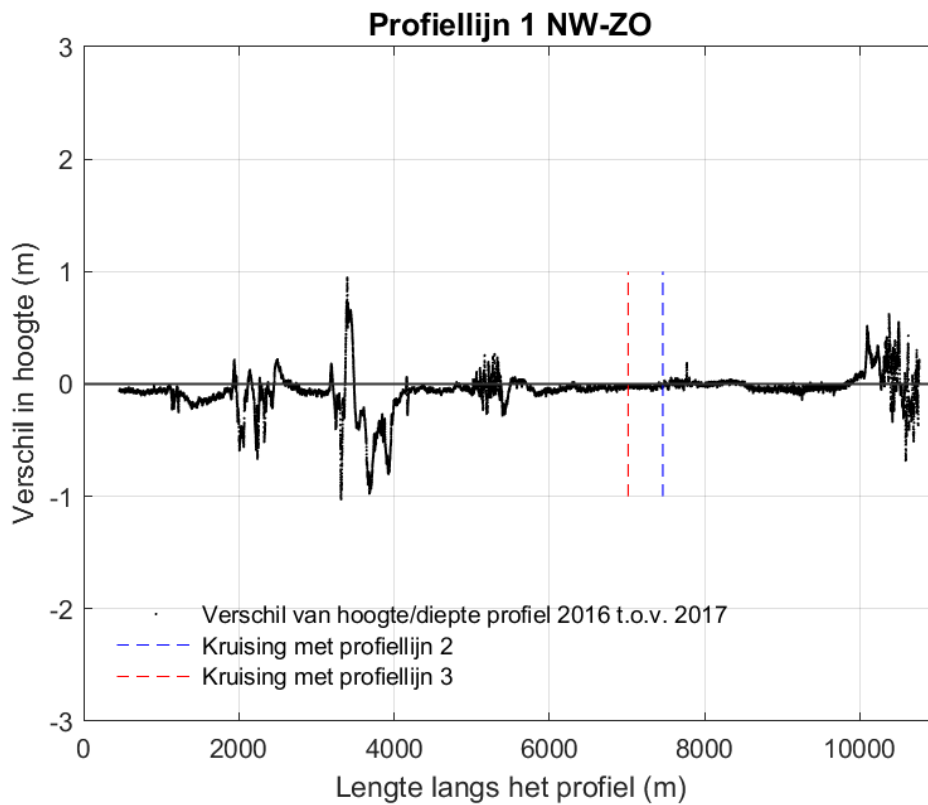
4.2 Vergelijking tussen metingen uit 2016 en 2017

In deze sectie worden de hoogte/diepte raaidata van 2016 met 2017 vergeleken (zie Figuur 4-1, Figuur 4-4 en Figuur 4-7). De figuren laten zien dat in de periode van één jaar wel morfologische veranderingen zijn opgetreden, maar dat de ligging van de geul en platen (locatie van het begin of einde van de geul/plaat) bijna gelijk is gebleven.

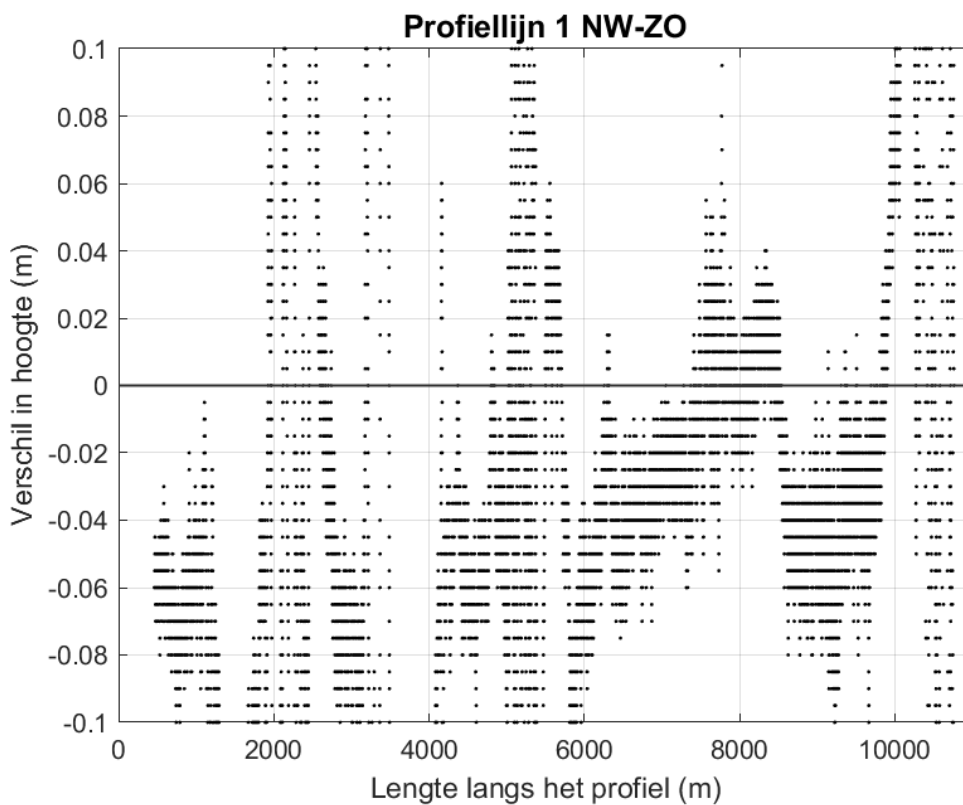
Bij profiellijn 1 is de grootste morfologische verandering te zien rondom de sublitorale geulen, waarbij er 1 meter hoogteverschil is opgetreden (zie Figuur 4-2, tussen 3000 tot 4000 meter). Dit verschil in diepte is te verklaren door de hoge dynamiek die kan plaats vinden in en rond de geulen in de Waddenzee. Inzoomend op de morfologische verandering op de intergetijde platen van profiellijn 1, is te zien dat ook op de platen zowel verhoging als verlaging van enkele centimeters plaats vindt (zie Figuur 4-3, tussen 7000 tot 8000 meter).



Figuur 4-1 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017.

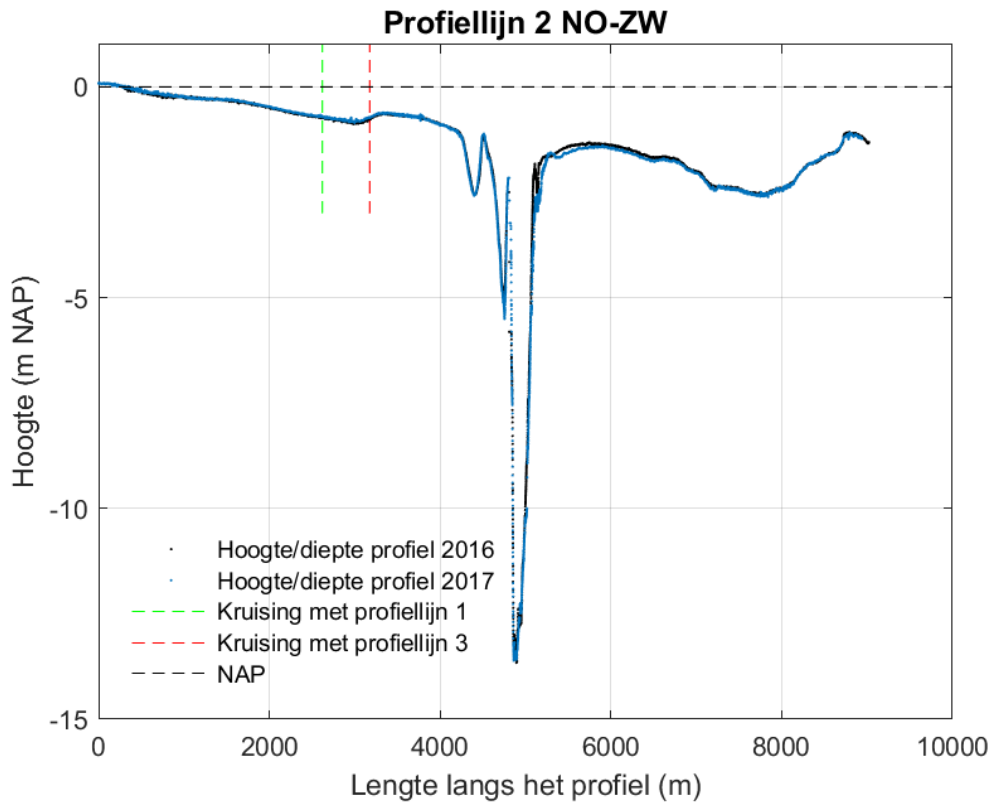


Figuur 4-2 Verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2017 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2016.

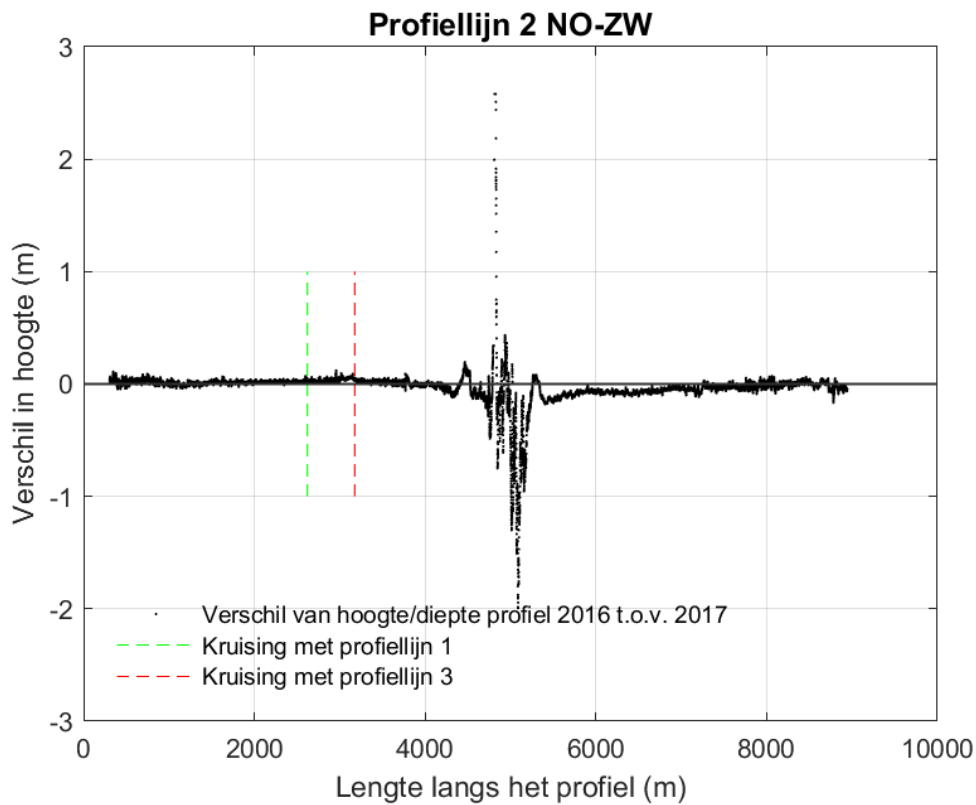


Figuur 4-3 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2017 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2016.

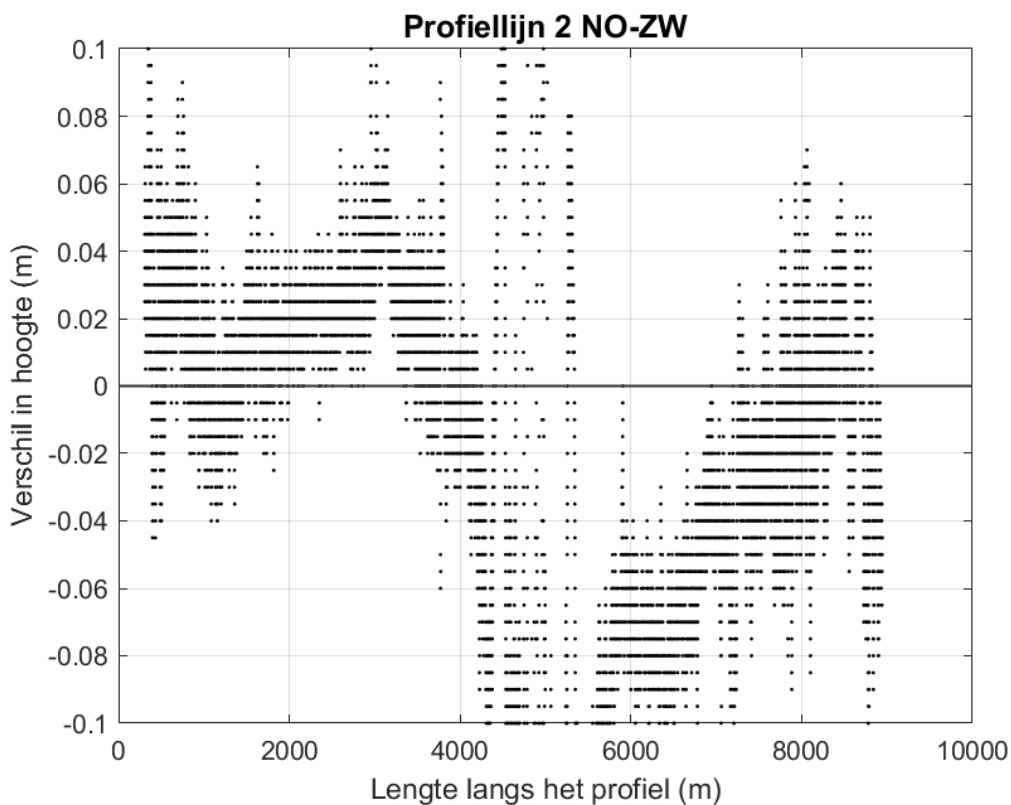
Een morfologische verandering in profiellijn 2 is te zien rondom de sublitorale geul, waarbij er op een enkele plek tot 2 meter hoogteverschil is opgetreden rondom de geul (Figuur 4-5 tussen de 4000 en 6000 meter). Rondom de hogere wadplaten in de noordoostelijke zijde van deze profiellijn is er vooral een verhoging van enkele centimeters te zien, terwijl er in het zuidwestelijke intergetijde gebied van noordoost naar zuidwest eerst een verlaging van enkele centimeters optreedt in de intergetijde geul en daarna weer een verhoging richting de intergetijde platen (Figuur 4-6 van 6000 tot 9000 m).



Figuur 4-4 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017.



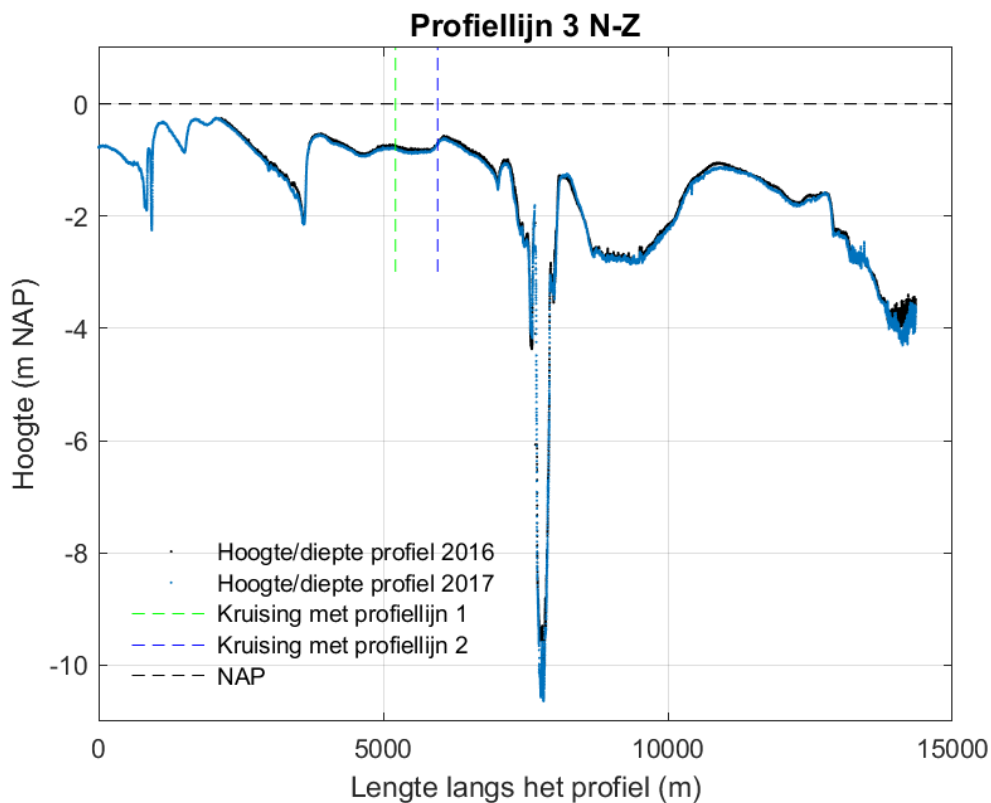
Figuur 4-5 Verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2017 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2016.



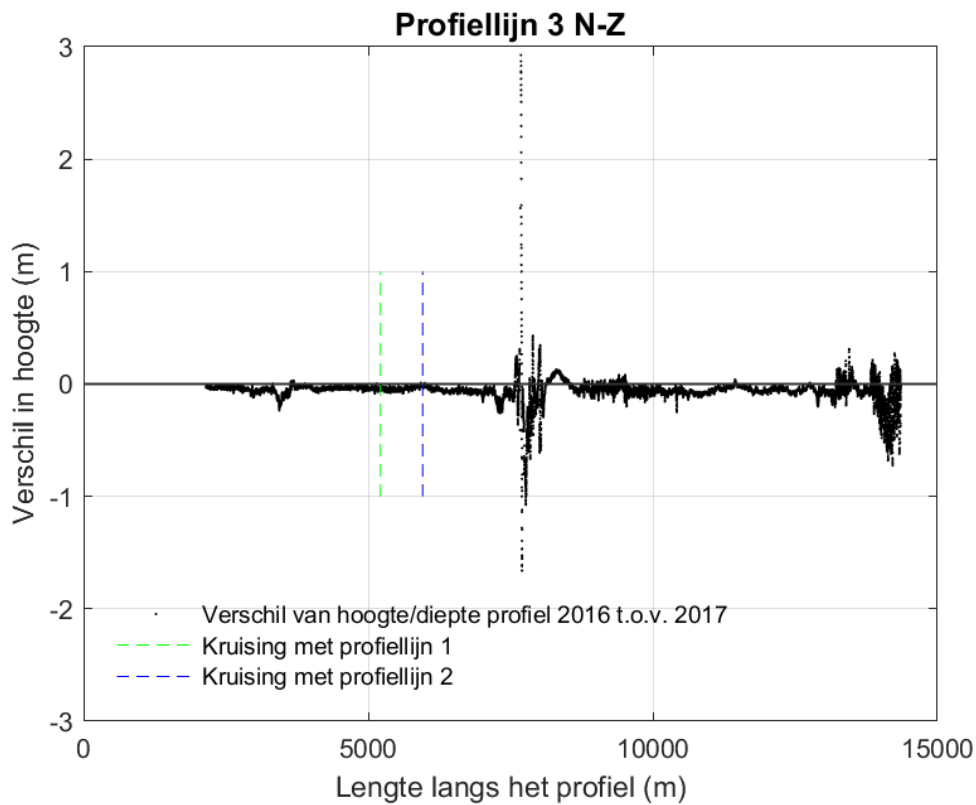
Figuur 4-6: Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2017 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2016.

Profiellijn 3 laat rondom de intergetijde geulen en de sublitorale geulen een grote morfologische verandering zien, waarbij op enkele plekken tussen 2 à 3 meter hoogteverschil is opgetreden (Figuur 4-8 in het midden). In het algemeen laten de intergetijde platen en geulen een verlaging van enkele centimeters zien (zie Figuur 4-9, tussen de 3000 tot 6000 meter en tussen 9000 tot 12000 meter).

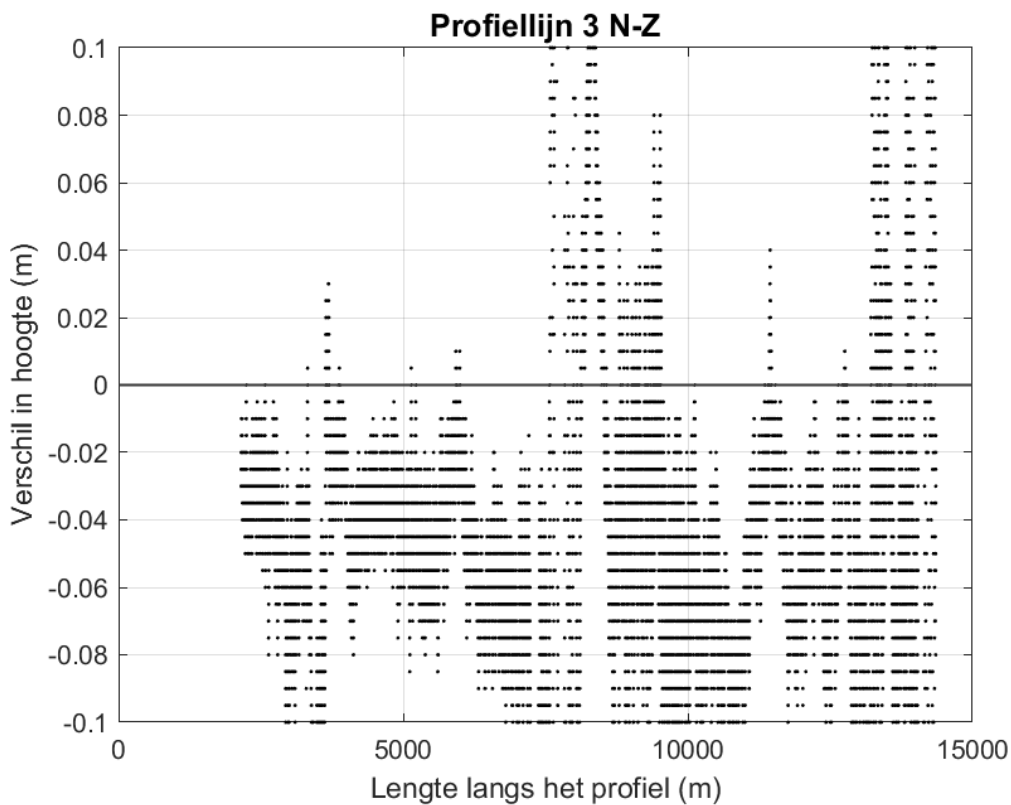
Geconcludeerd kan worden dat de metingen tussen 2016 en 2017 goed met elkaar te vergelijken zijn. In een groot deel van de meettraaien is te zien dat in 2017 (t.o.v. 2016) de hoogte van de meettraaien lager lijkt te zijn. De wadplaten boven -1 meter NAP laten een verhoging zien in 2017 ten opzichte van 2016. De sublitorale geulen laten in het algemeen de grootste morfologische dynamiek zien.



Figuur 4-7 Dwarsprofiel langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017.



Figuur 4-8 Verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2017 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2016.

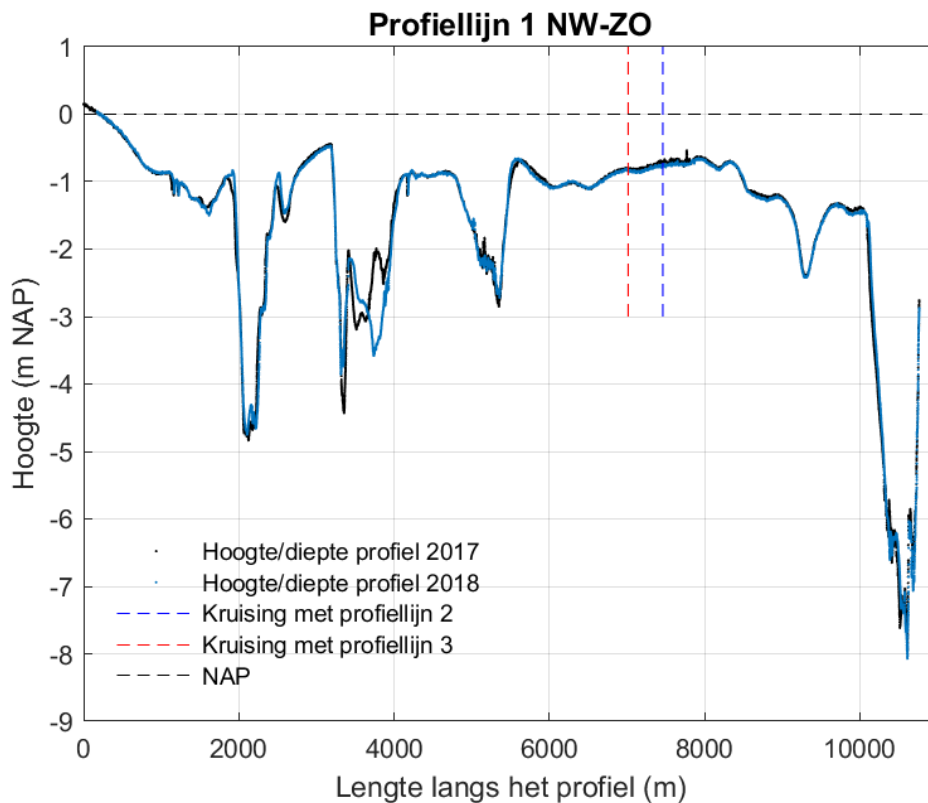


Figuur 4-9 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en 2017. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2017 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2016.

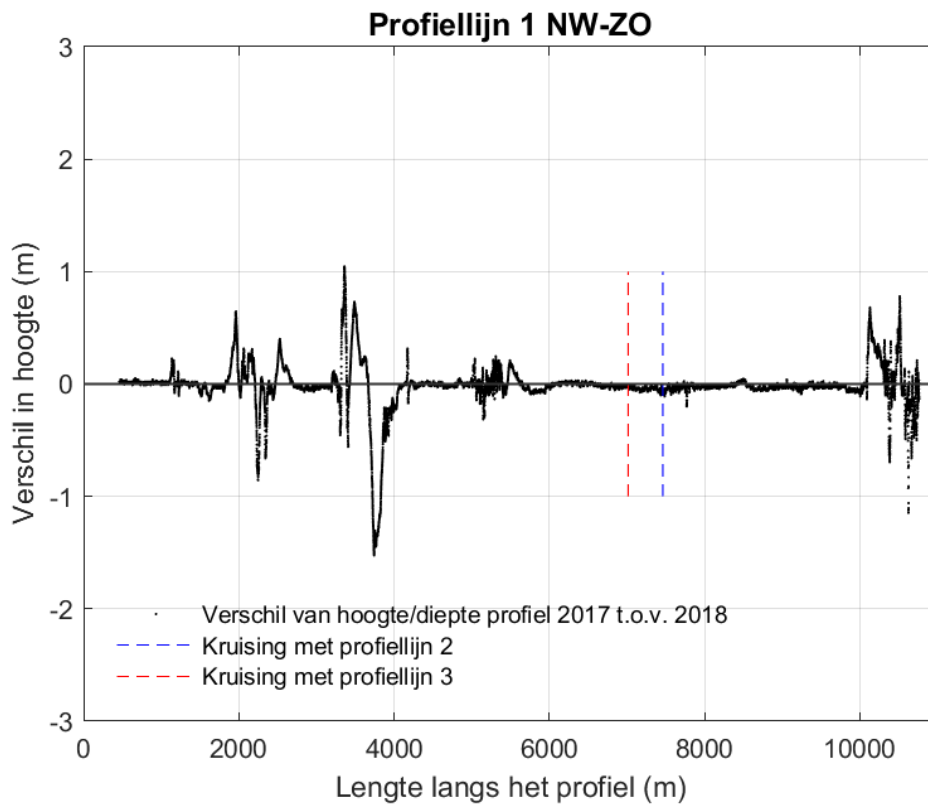
4.3 Vergelijking tussen metingen uit 2017 en 2018

In deze sectie worden de hoogtes van 2017 met 2018 vergeleken (zie Figuur 4-10, Figuur 4-13 en Figuur 4-16). De figuren laten de morfologische veranderingen zien die zijn opgetreden binnen dit jaar. De veranderingen betreffen voornamelijk de intergetijde geulen (profiellijn 1 en 3) en in het profiel van noordoost naar zuidwest (profiellijn 2) is te zien dat de bovenzijde van de geul breder is geworden.

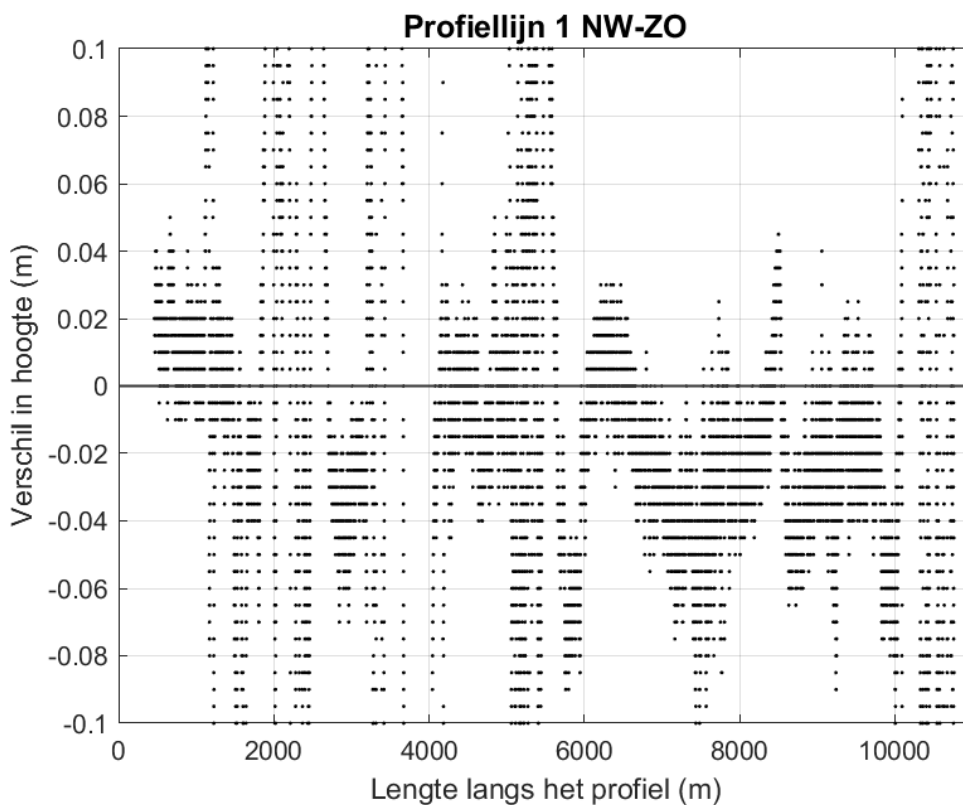
Bij profiellijn 1 zijn de grootste morfologische verandering te zien rondom de sublitorale geulen, waarbij er 1 à 1,5 meter hoogteverschil is opgetreden (zie Figuur 4-11, tussen 3000 tot 4000 meter). Dit past bij de dynamiek van de geulen in de Waddenzee en was ook in de voorgaande opnamen te zien (sectie 4.2). Inzoomend op de morfologische verandering op de intergetijde platen van profiellijn 1 is te zien dat ook op de platen een veranderingen van de hoogte plaats vindt met voornamelijk een verlaging van enkele centimeters (zie Figuur 4-12, tussen 6000 tot 8000 meter).



Figuur 4-10 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018.

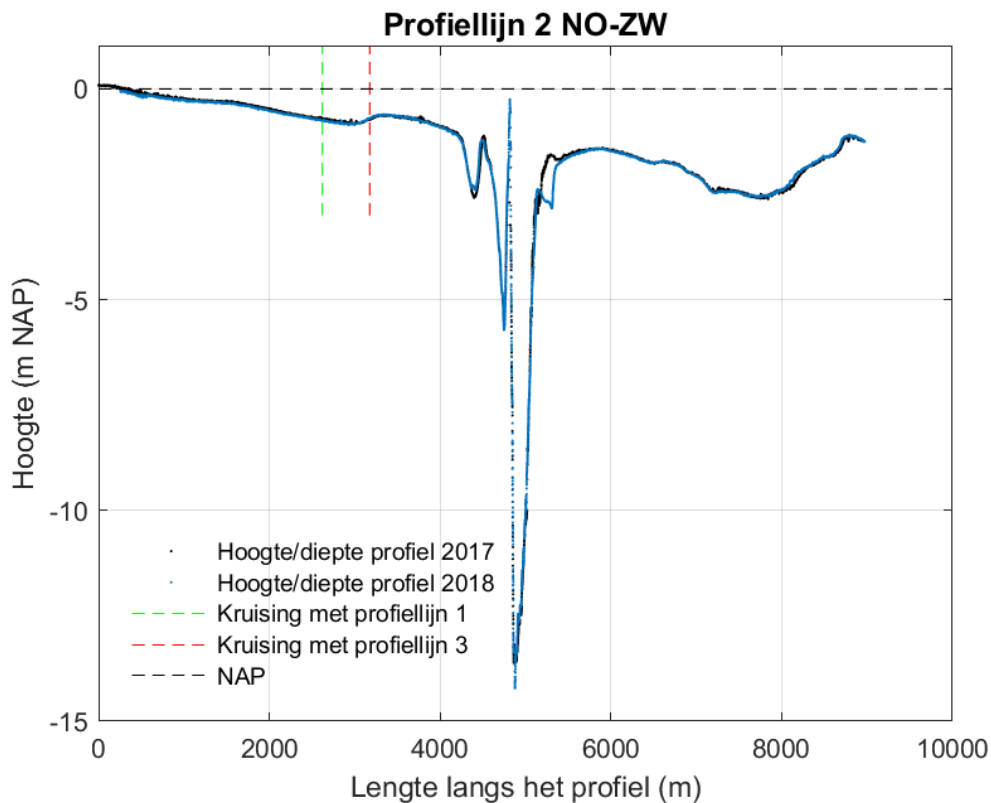


Figuur 4-11 Verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2018 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2017.

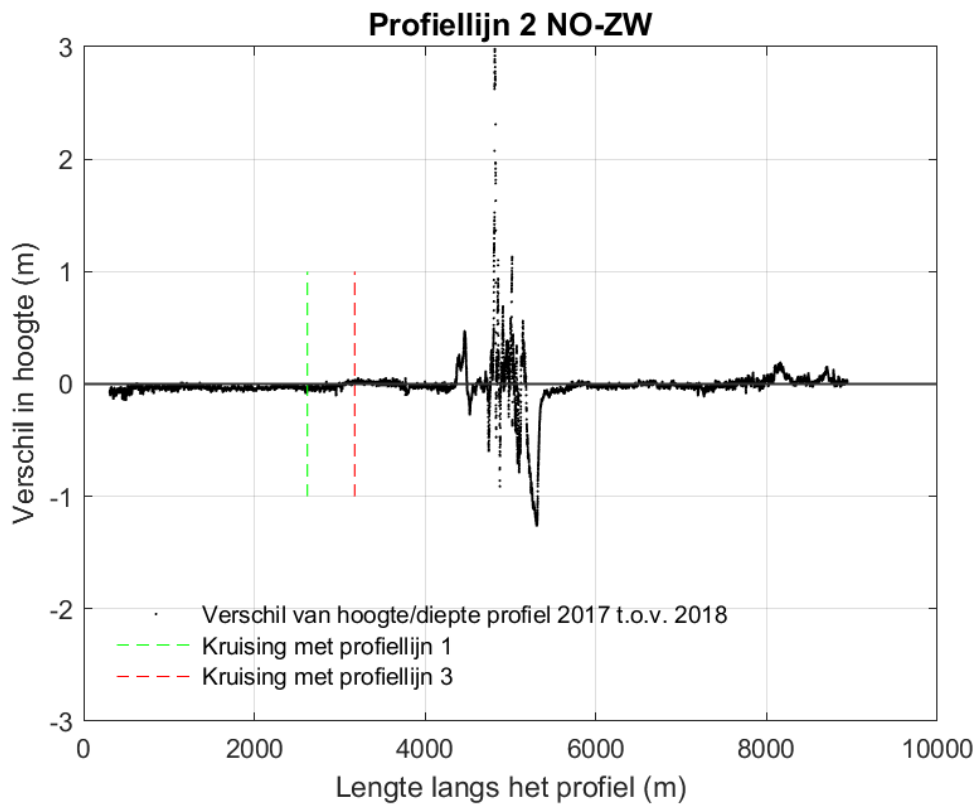


Figuur 4-12 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2018 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2017.

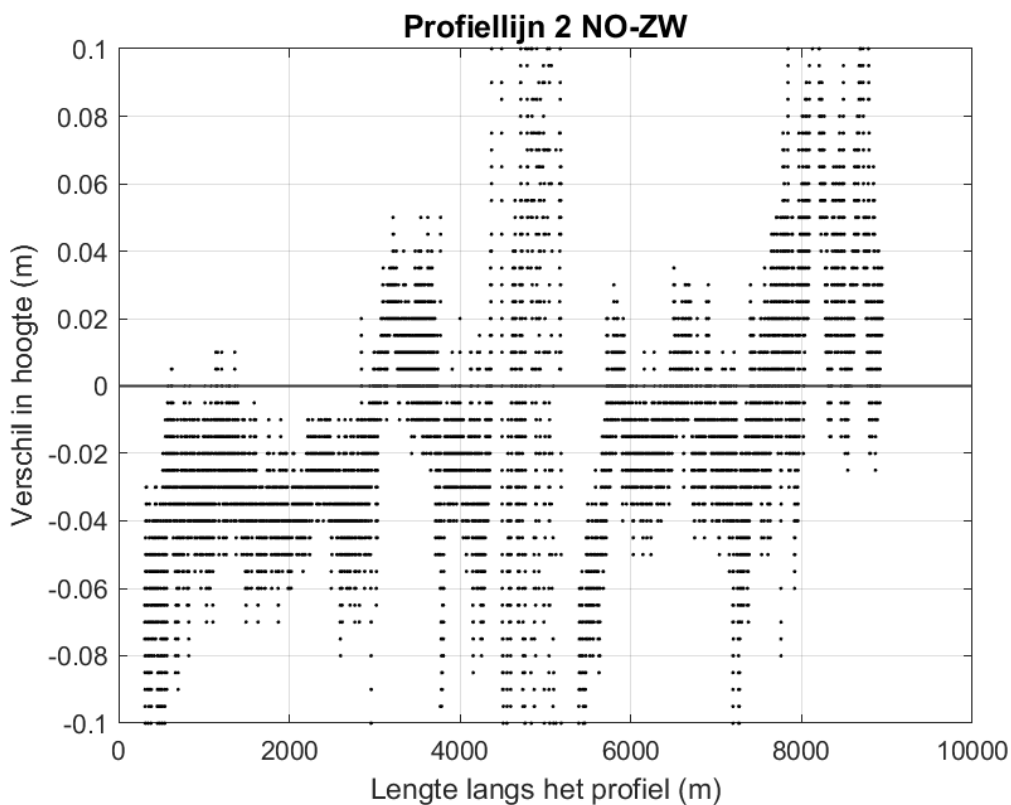
Een morfologische verandering in profiellijn 2 is te zien rondom de sublitorale geul, waarbij er op een enkele plek tot 1 à 3 meter hoogteverschil is opgetreden (Figuur 4-14, midden van de profiellijn). Inzoomend op de morfologische verandering op de intergetijde platen in profiellijn 2 in Figuur 4-15, tussen 500 tot 3000 meter en tussen 6000 tot 8000 meter, is te zien dat ook op de platen de hoogte verandert, met voornamelijk een verlaging van enkele centimeters.



Figuur 4-13 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018.



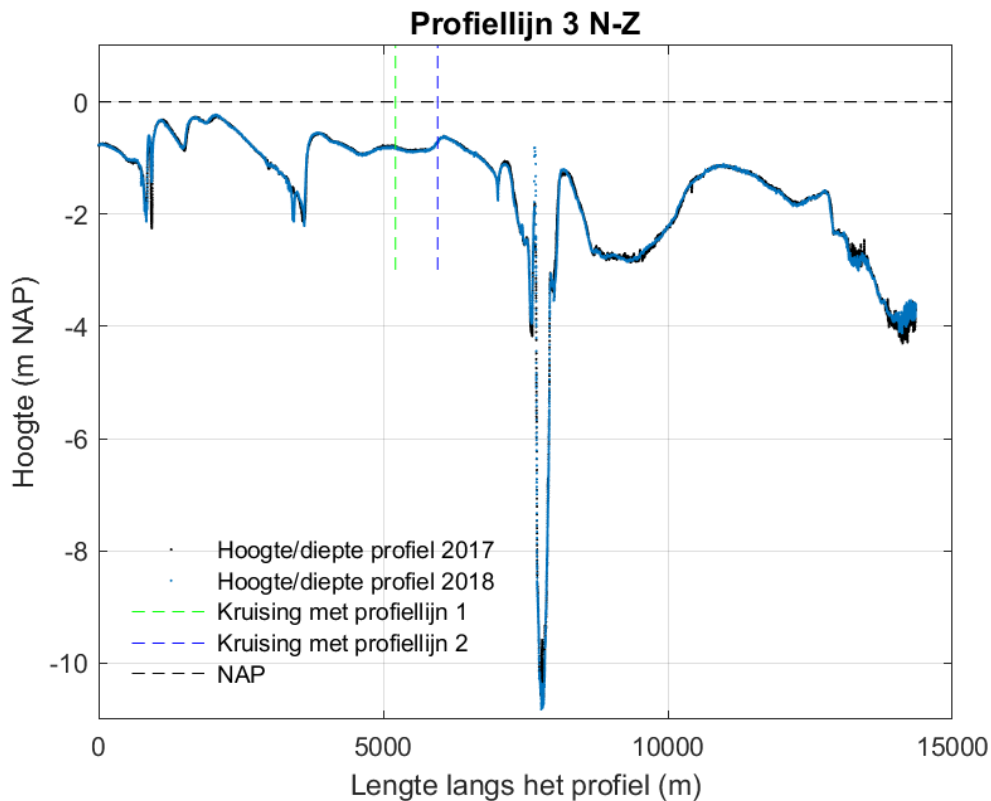
Figuur 4-14 Verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2018 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2017.



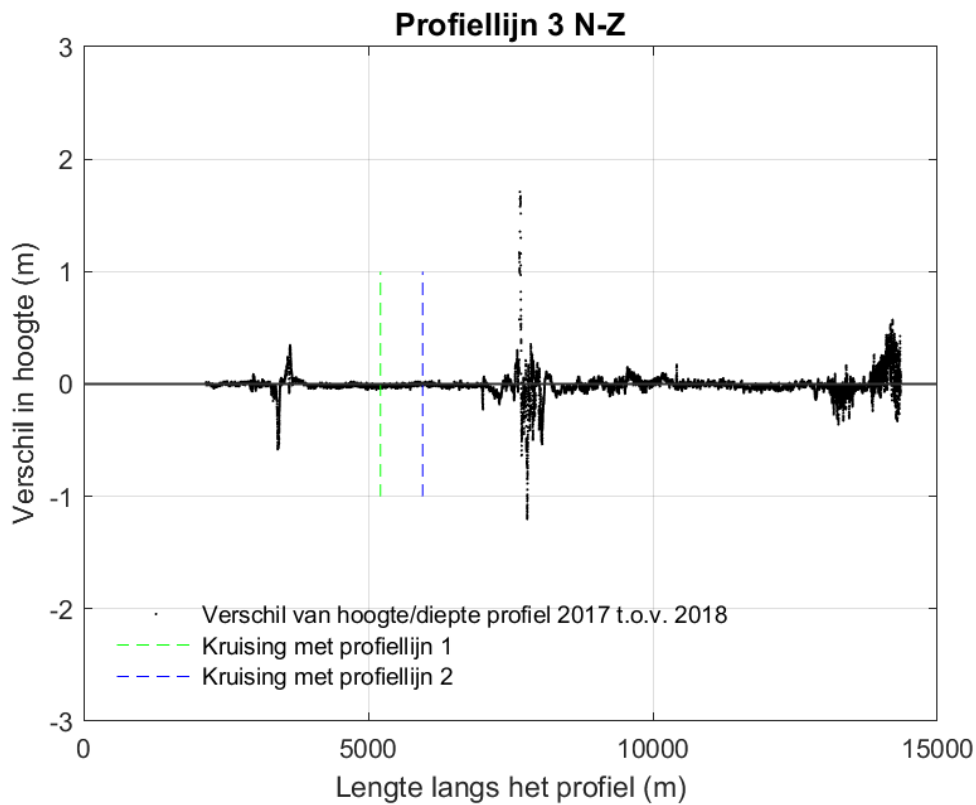
Figuur 4-15 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2018 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2017.

Profiellijn 3 laat rondom de intergetijde geulen en de sublitorale geulen relatief kleine morfologische veranderingen zien, met ongeveer 0,5 meter hoogteverschil (Figuur 4-17, beide uiteinden en het midden van de profiellijn). Net als in profiellijn 1 en profiellijn 2, is in profiellijn 3 een verlaging van enkele centimeters te zien van de intergetijde platen (zie Figuur 4-18, tussen de 3000 tot 6000 meter en tussen 9000 tot 12000 meter).

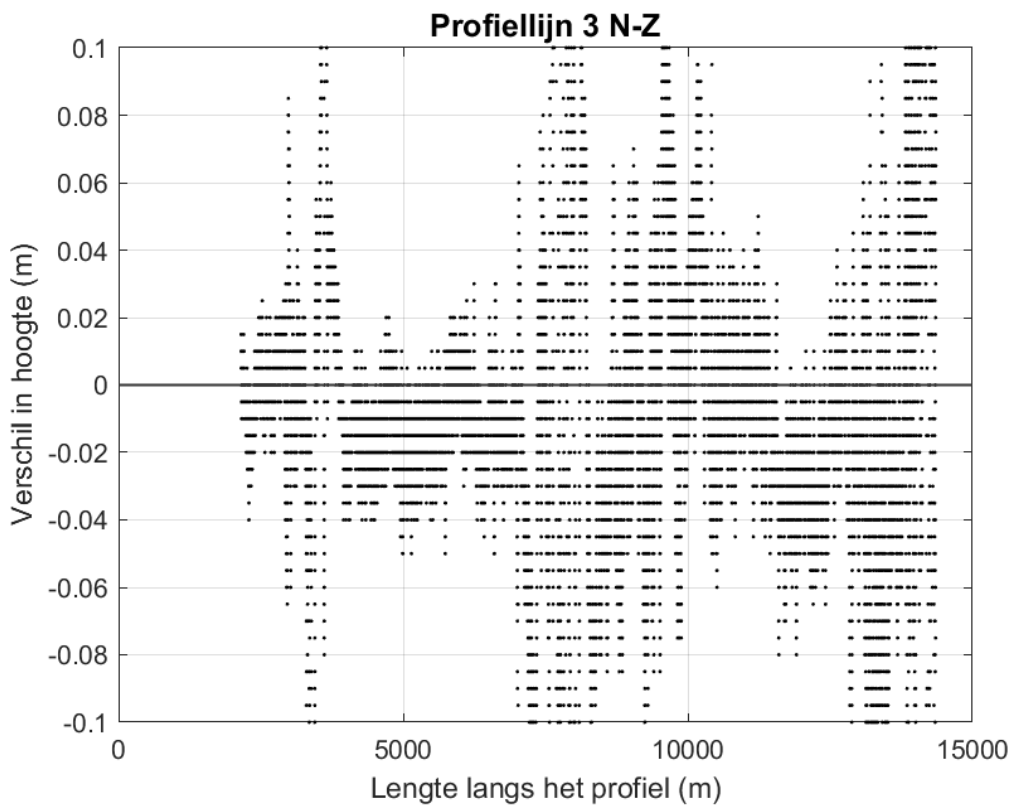
Geconcludeerd kan worden dat de metingen tussen 2017 en 2018 goed met elkaar te vergelijken zijn. In het algemeen is te zien dat er in 2018 (t.o.v. 2017) een verlaging van de intergetijde platen heeft plaats gevonden. In geulen zijn de meest dynamische delen.



Figuur 4-16 Dwarsprofiel langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018.



Figuur 4-17 Verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2018 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2017.

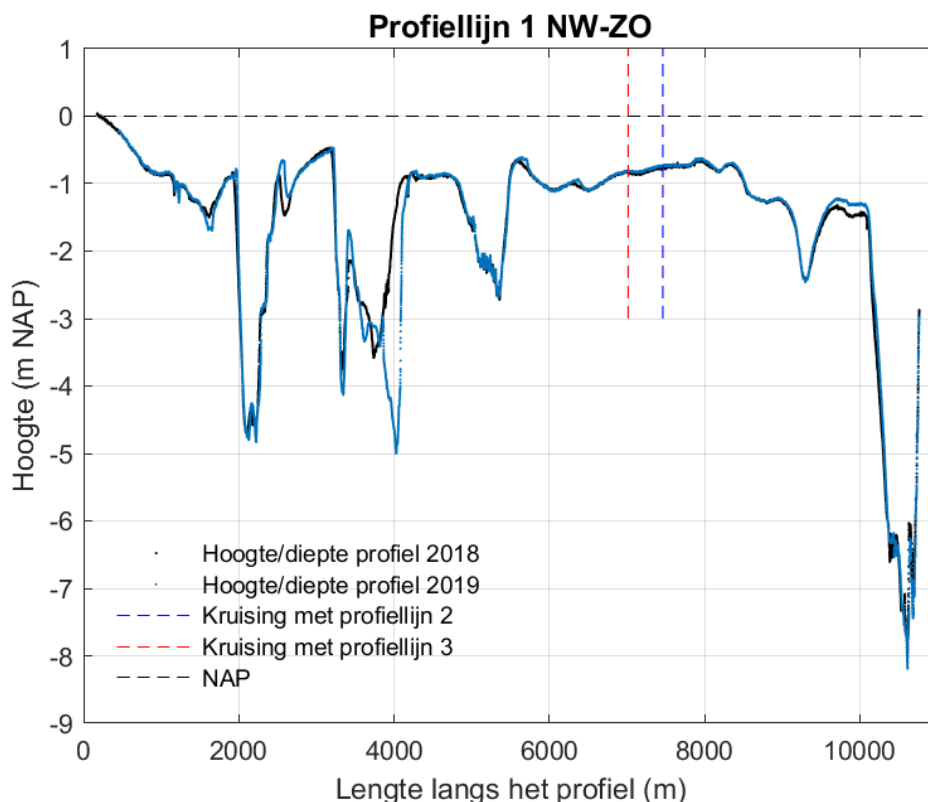


Figuur 4-18 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2017 en 2018. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2018 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van 2017.

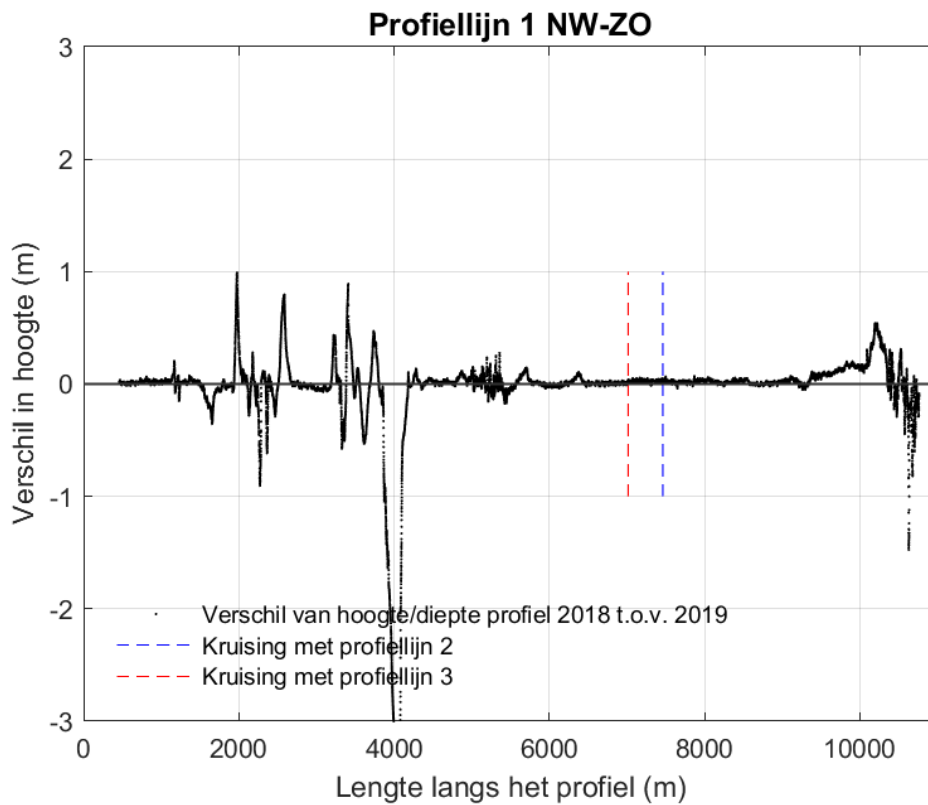
4.4 Vergelijking tussen metingen uit 2018 en 2019

In deze sectie wordt de hoogte van de raaien in 2018 met die in mei 2019 vergeleken (zie Figuur 4-19, Figuur 4-22 en Figuur 4-25). De figuren laten de morfologische veranderingen in deze periode van één jaar zien, waarbij de grootste veranderingen wederom optreden in de sublitorale geulen van de drie profiellijnen.

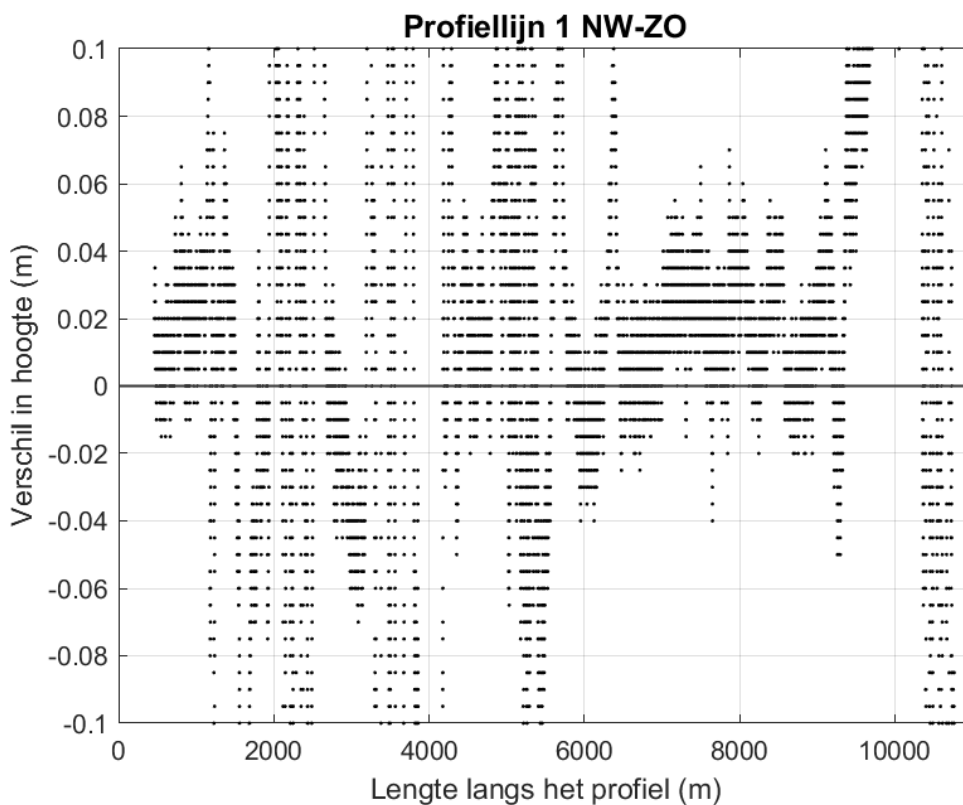
Bij profiellijn 1 is vooral een grote morfologische verandering te zien rondom een van de sublitorale geulen, waarbij er tussen de 1 à 3,5 meter hoogteverschil is opgetreden (zie Figuur 4-20, tussen 3000 tot 4500 meter). Deze dynamiek was ook zichtbaar in de voorgaande vergelijkingen van metingen in paragrafen 4.2 en 4.3. Inzoomend op de hoogteverandering op de intergetijdse platen van profiellijn 1 is te zien dat op de platen voornamelijk een verhoging van enkele centimeters heeft plaatsgevonden (zie Figuur 4-21, tussen 6000 tot 8000 meter).



Figuur 4-19 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019.

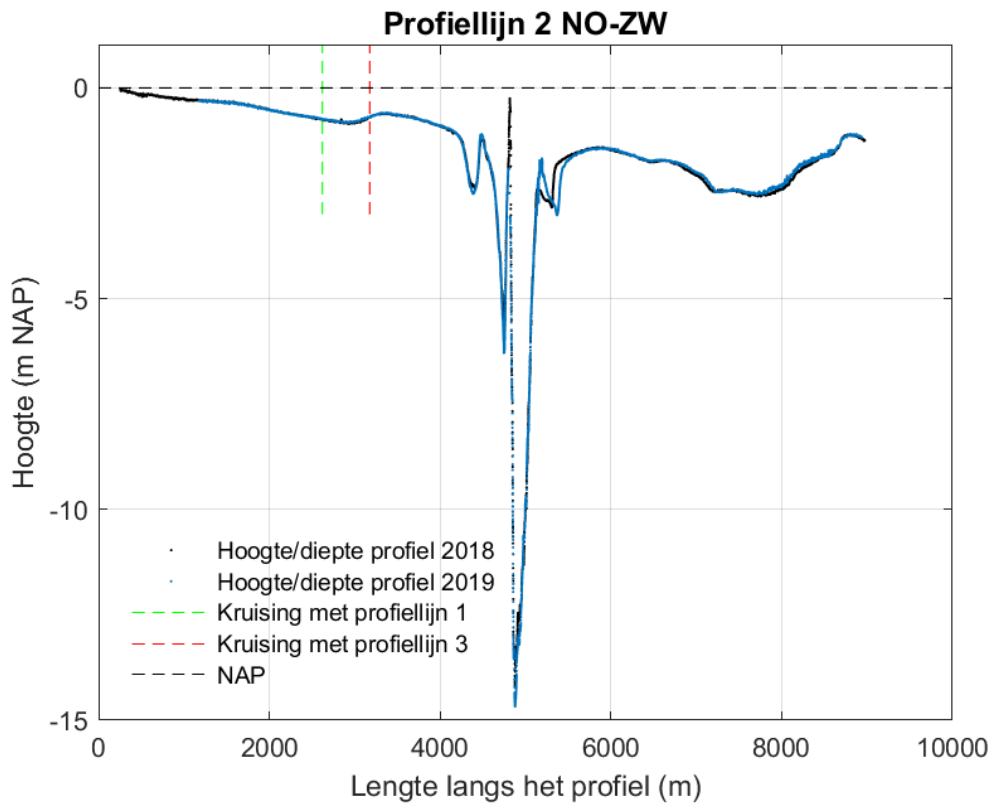


Figuur 4-20 Verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2018.

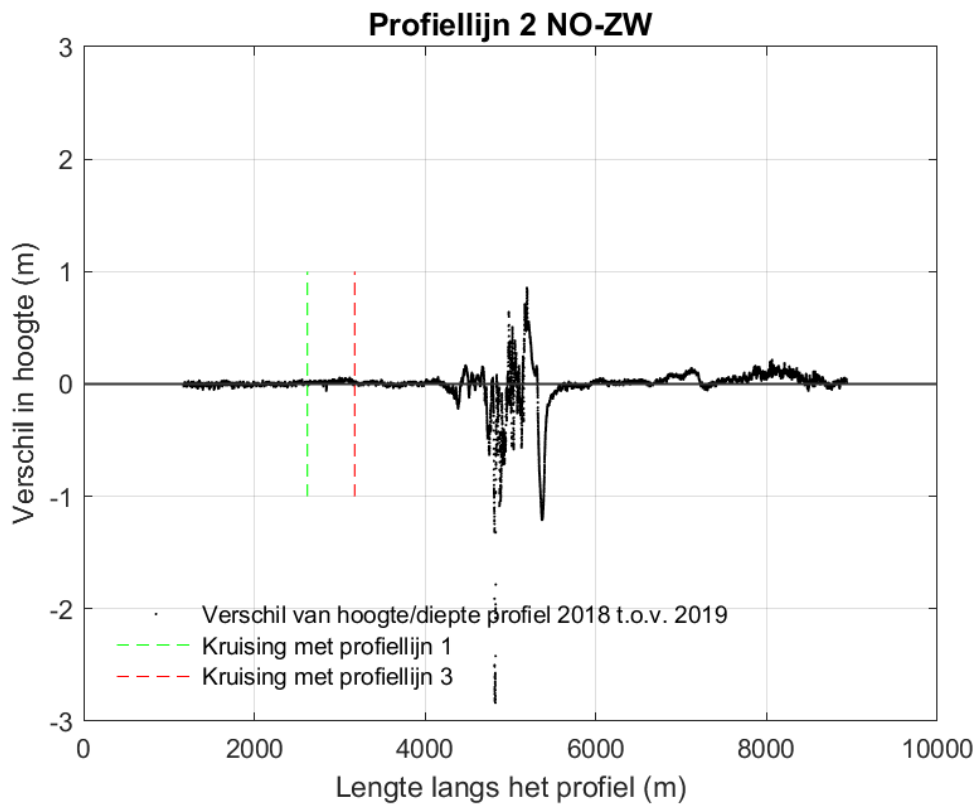


Figuur 4-21 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2018.

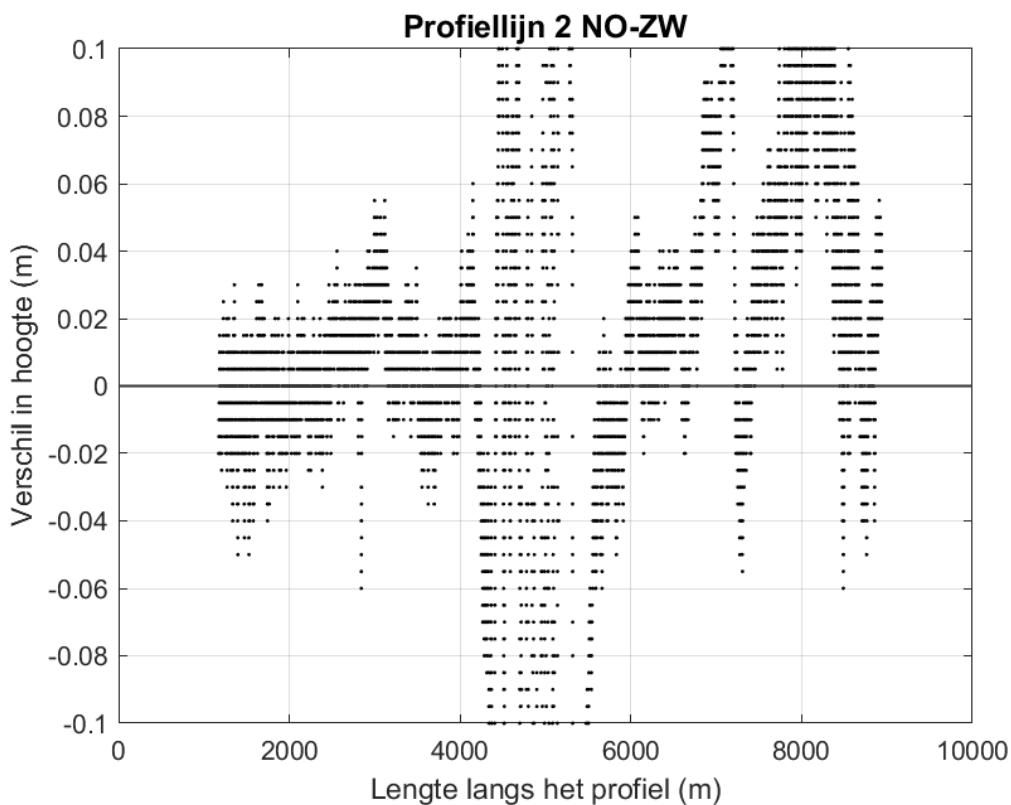
Een morfologische verandering in profiellijn 2 is te zien rondom de sublitorale geul, waarbij er op enkele plekken tot 0,5 à 1 meter hoogteverschil is opgetreden rondom de geulen (Figuur 4-23, midden van de profiellijn). De hoogteverandering op de intergetijde platen van profiellijn 2 (NO-ZW) laat op de platen voornamelijk een verhoging van enkele centimeters zien (zie Figuur 4-24, tussen 1000 tot 3500 meter en tussen 6500 tot 9000 meter).



Figuur 4-22 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019.



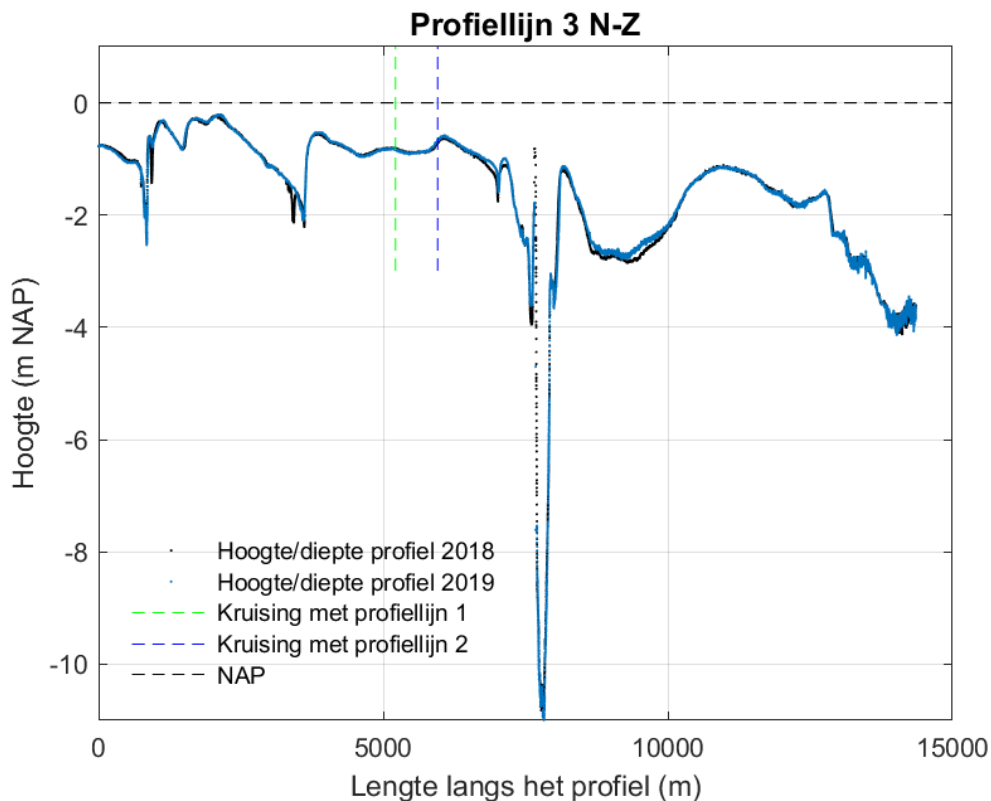
Figuur 4-23 Verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2018.



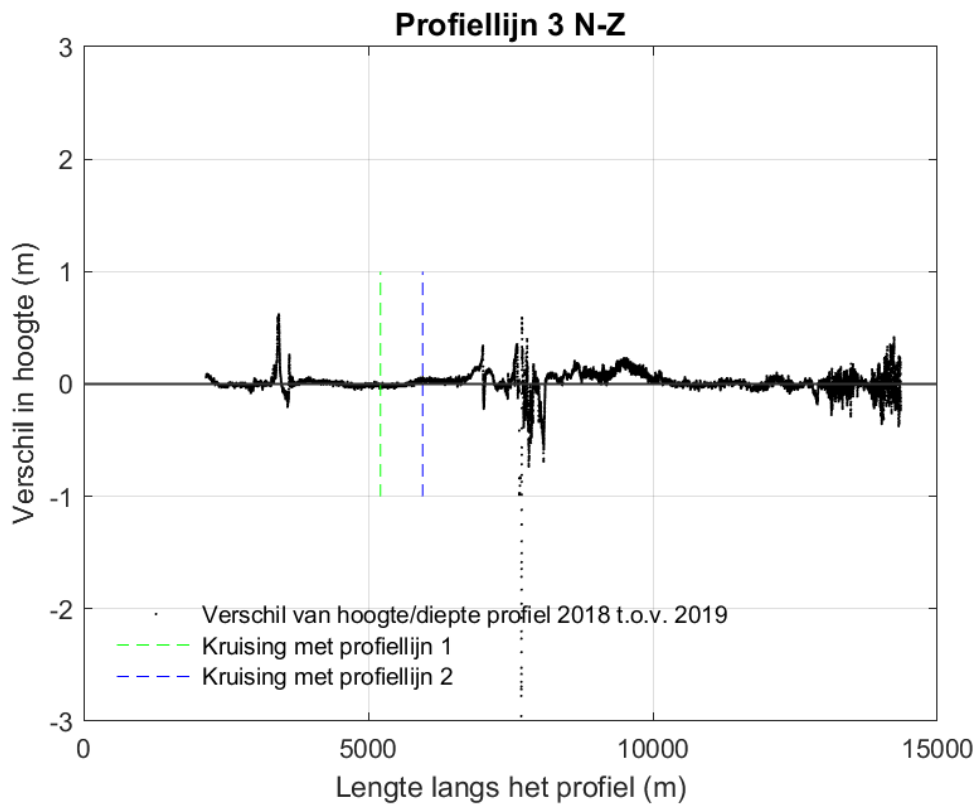
Figuur 4-24 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2018.

Profiellijn 3, van noord naar zuid, laat rondom de intergetijde geulen en de sublitorale geulen relatief kleine morfologische verandering zien, van ongeveer 0,5 meter hoogteverschil (Figuur 4-26, beide uiteinden en midden van de profiellijn). Net als in profiellijnen 1 en 2 is in profiellijn 3 een verhoging van enkele centimeters zichtbaar van de intergetijde platen (zie Figuur 4-27, tussen de 3000 tot 6000 meter en tussen 9000 tot 12000 meter).

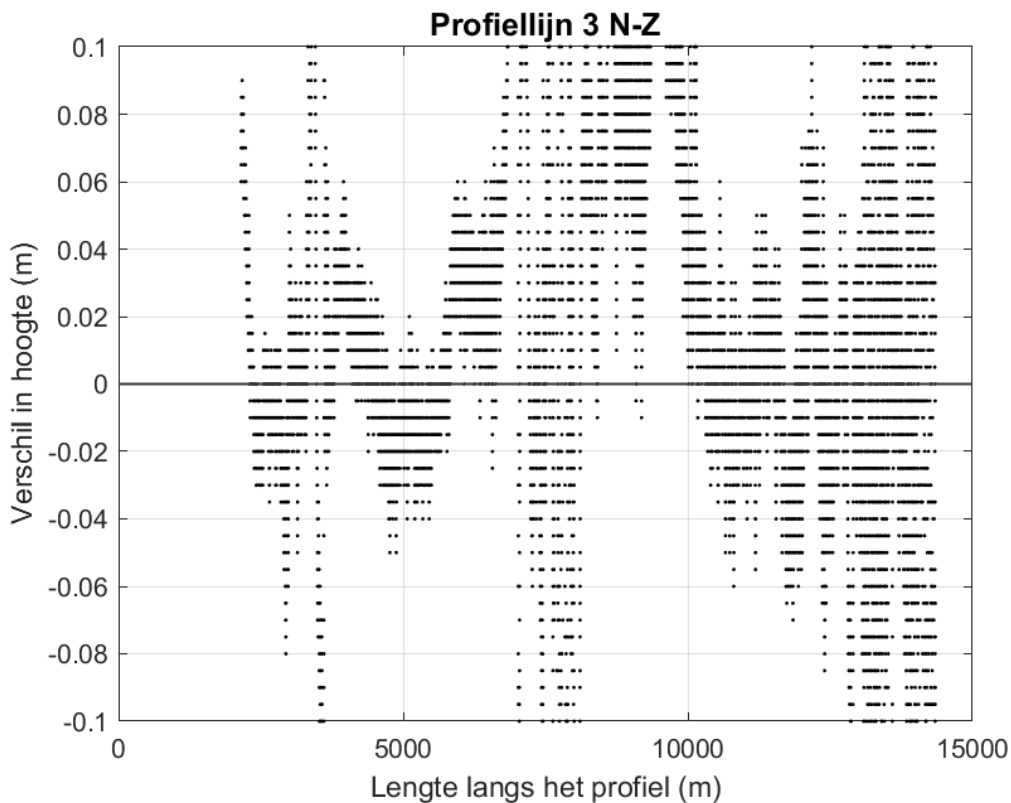
Geconcludeerd kan worden dat de metingen tussen 2018 en mei 2019 goed met elkaar te vergelijken zijn. In het algemeen is te zien dat er in mei 2019 (t.o.v. 2018) de intergetijde platen iets hoger zijn. De dynamiek van de sublitorale geulen komt overeen met de voorgaande hoogte/diepte metingen in de raaien.



Figuur 4-25 Dwarsprofiel langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019.



Figuur 4-26 Verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2018.

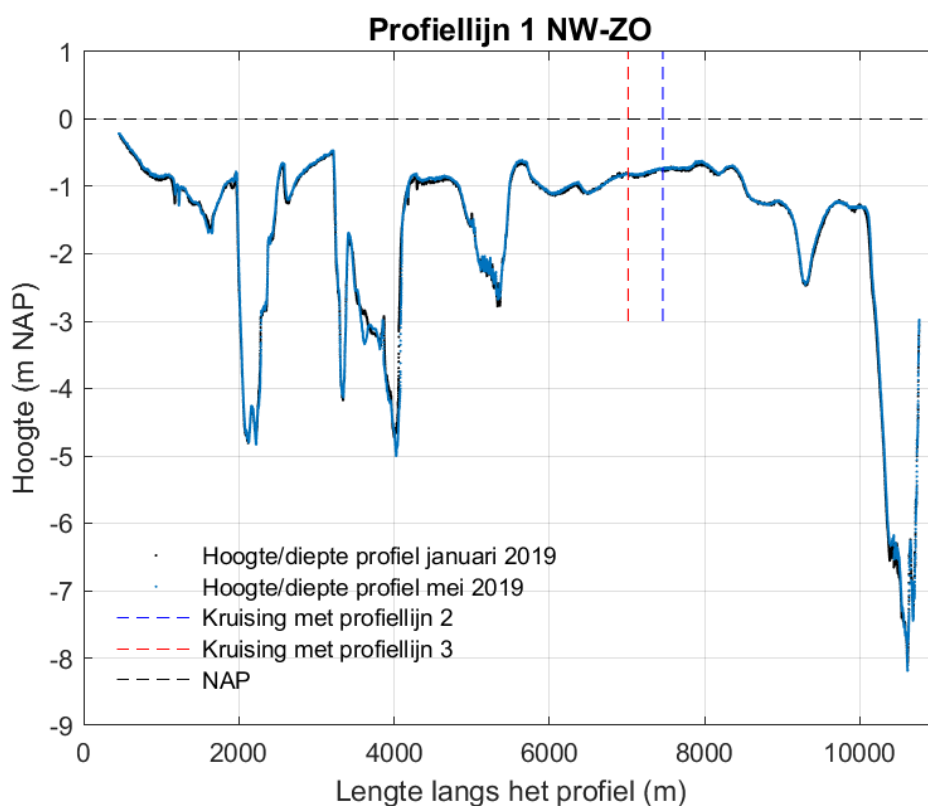


Figuur 4-27 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2018.

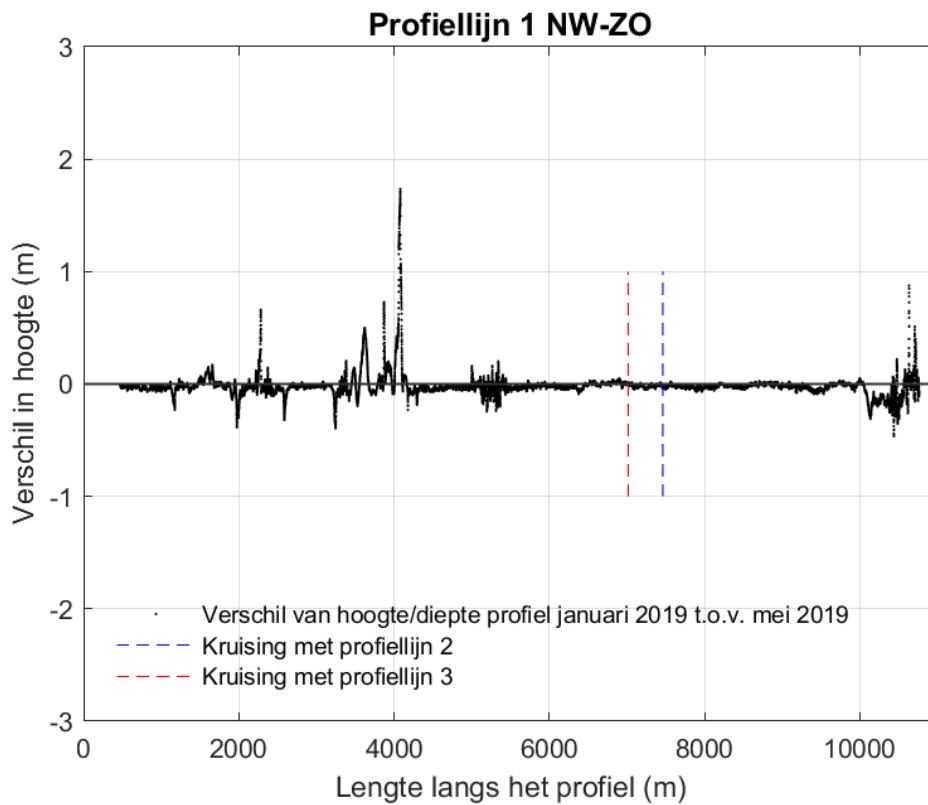
4.5 Vergelijking tussen metingen uit januari 2019 en mei 2019

In deze sectie worden de raaidata van januari 2019 met mei 2019 vergeleken (zie Figuur 4-28, Figuur 4-31 en Figuur 4-34). Dit is een extra vergelijking, die mogelijk is vanwege de beschikbaarheid van twee metingen in 2019. Deze vergelijking geeft inzicht in de omvang van de waargenomen veranderingen over een kortere perioden, van vier maanden in plaats van één jaar. De figuren laten zien dat ondanks de relatief korte periode van vier maanden wel morfologische veranderingen hebben plaatsgevonden, met zoals ook eerder zichtbaar, de grootste veranderingen in de sublitorale geulen.

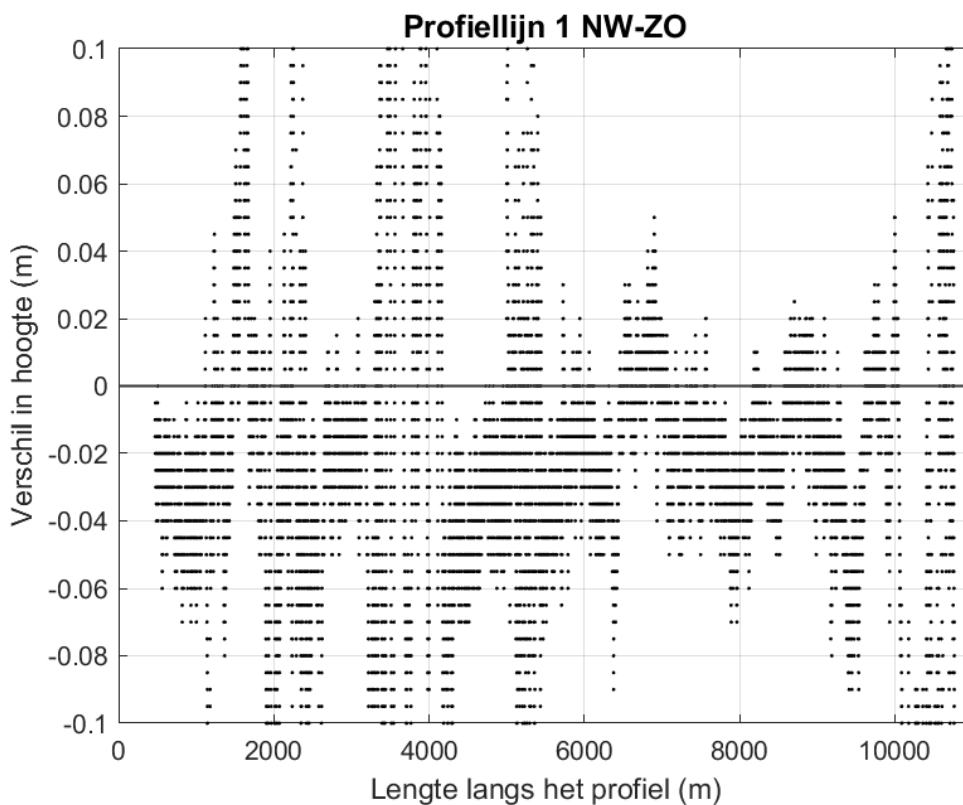
Bij profiellijn 1 is de voornaamste morfologische verandering zichtbaar rondom een van de sublitorale geulen, waarbij er tussen de 0,5 à 1,5 meter hoogteverschil is opgetreden (zie Figuur 4-29, tussen 3000 tot 4500 meter). Dit verschil komt overeen met de eerder waargenomen dynamiek bij deze geul in sectie 4.2, sectie 4.3 en sectie 4.4. Wel valt op dat van januari tot mei 2019 de geul voornamelijk ondieper is geworden. Inzoomend op de morfologische verandering op de intergetijdse platen van profiellijn 1 is te zien dat op de platen voornamelijk een verlaging van enkele centimeters heeft plaatsgevonden (zie Figuur 4-30, tussen 6000 tot 8000 meter).



Figuur 4-28 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019.

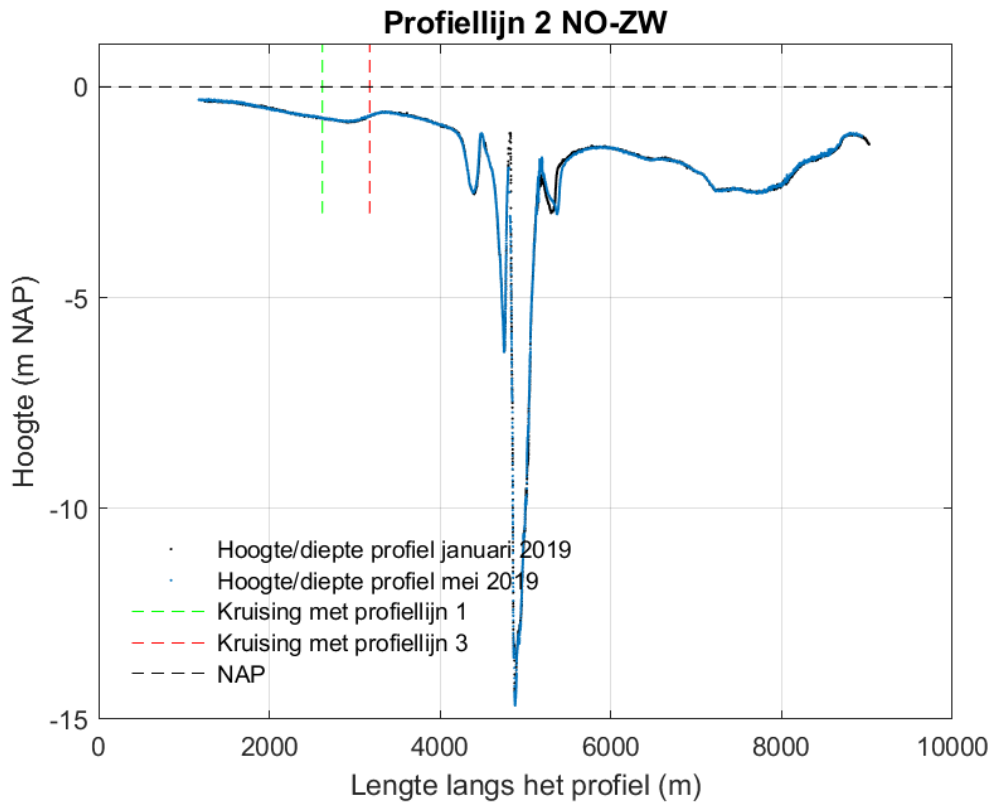


Figuur 4-29 Verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van januari 2019.

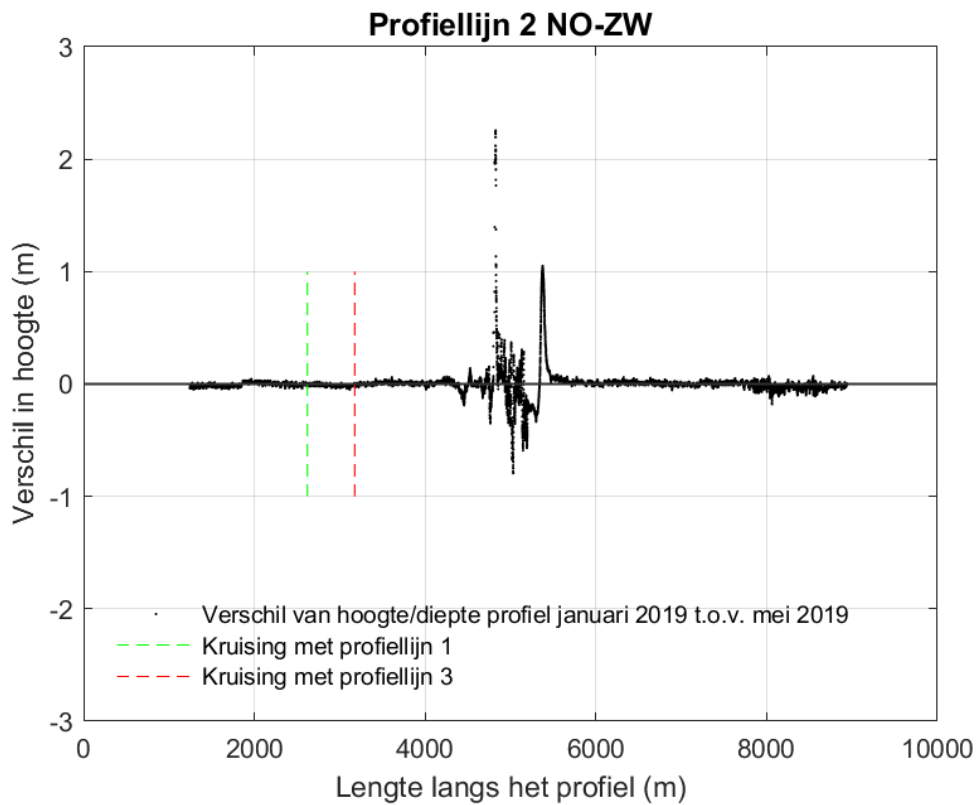


Figuur 4-30 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van januari 2019.

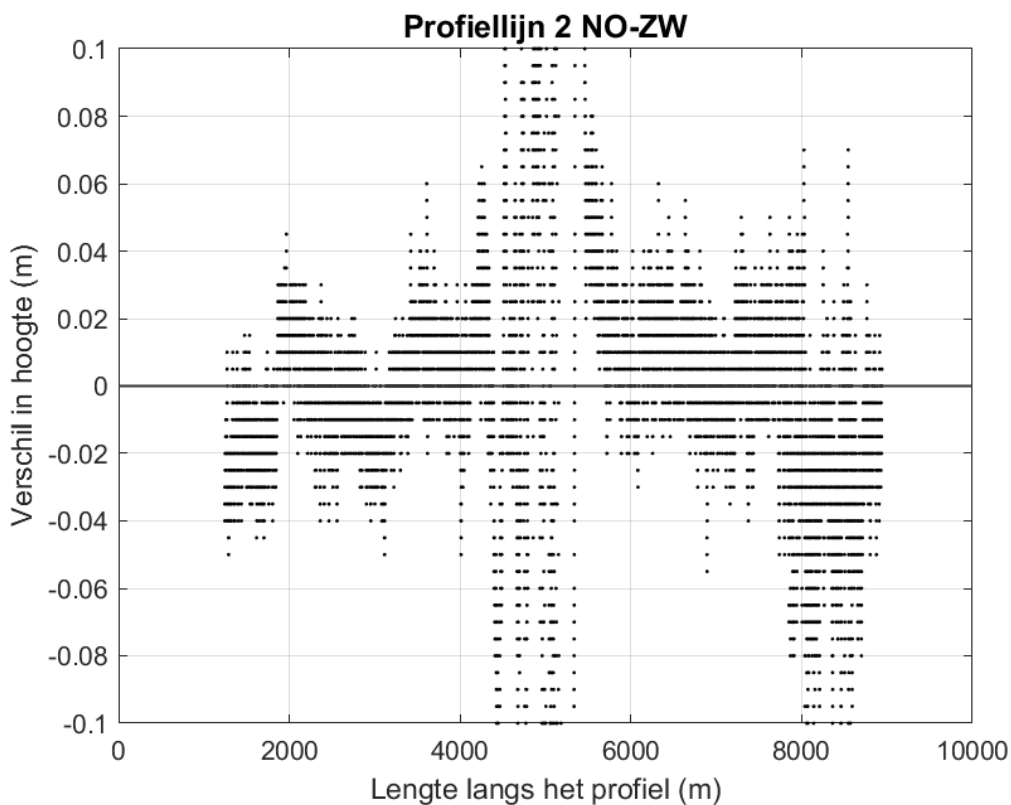
De meest zichtbare morfologische verandering in profiellijn 2 heeft plaatsgevonden rondom de sublitorale geul, waarbij er op enkele plekken tot 0,5 à 2 meter hoogteverschil is opgetreden (Figuur 4-32). De hoogteverschillen op de intergetijde platen van profiellijn 2 laten zien dat op de platen voornamelijk een verlaging van enkele centimeters is (zie Figuur 4-33, tussen 1000 tot 3500 meter en tussen 6500 tot 9000 meter).



Figuur 4-31 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019.



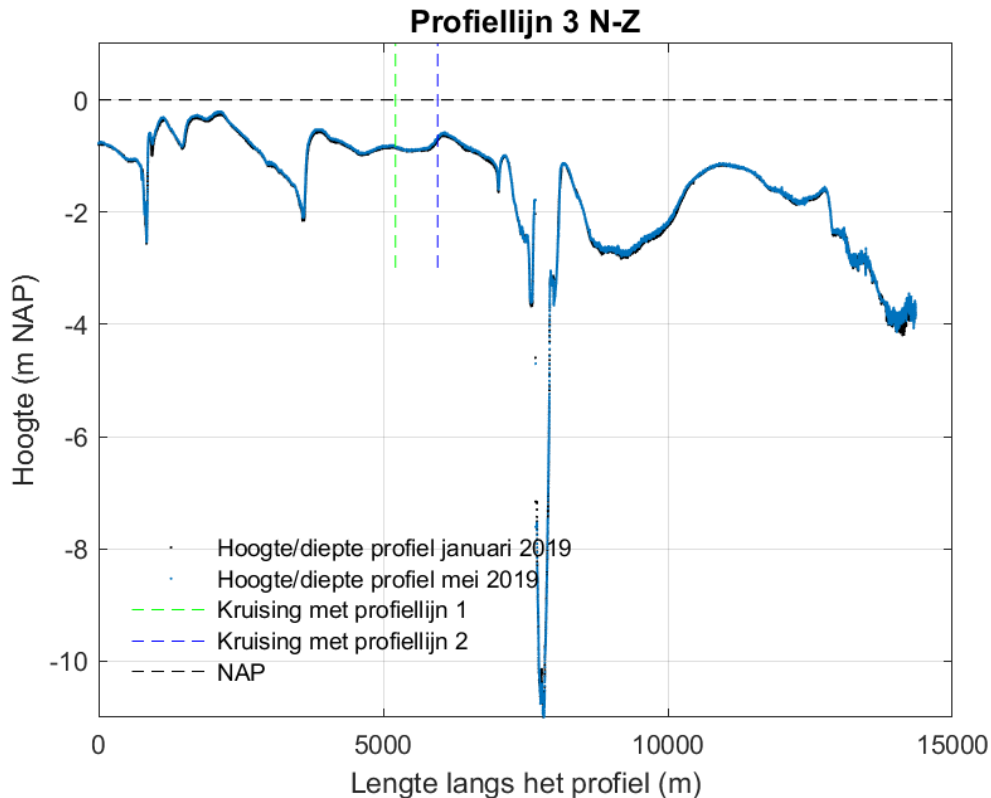
Figuur 4-32 Verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van januari 2019.



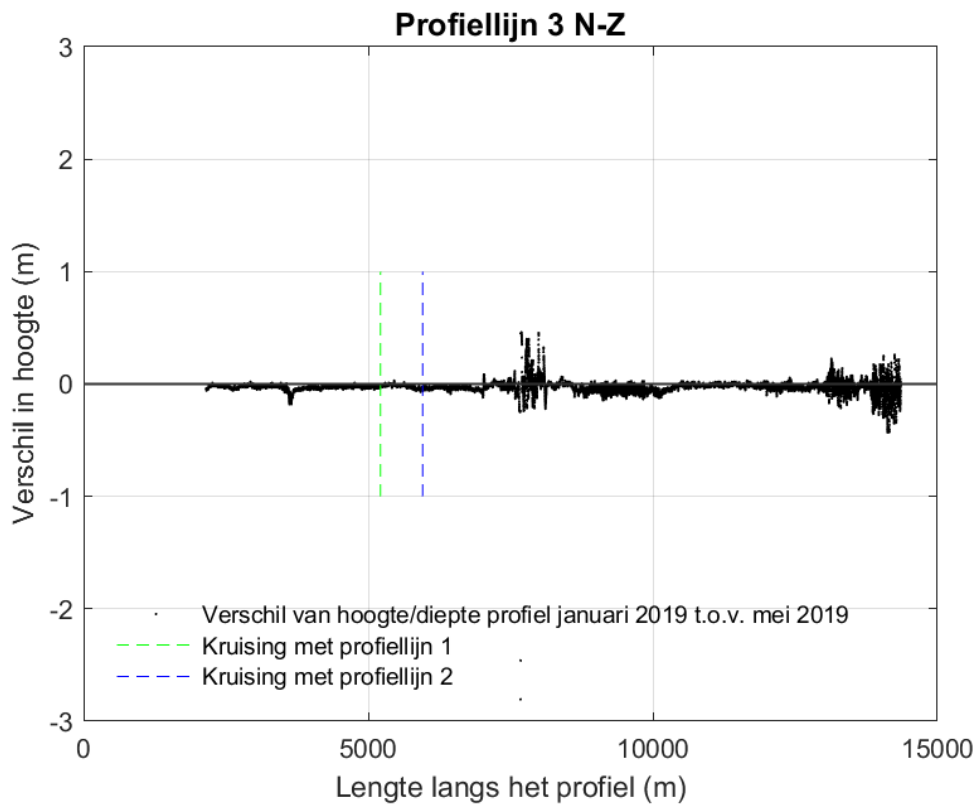
Figuur 4-33 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van januari 2019.

De profiellijn van noord naar zuid (3) laat rondom de intergetijde geulen en de sublitorale geulen relatief kleine morfologische verandering zien, van ongeveer 0,5 meter hoogteverschil (Figuur 4-35, beide uiteinden en midden). Net als in profiellijnen 1 en 2 is in profiellijn 3 een verlaging van enkele centimeters te zien van de intergetijde platen (zie Figuur 4-36, tussen de 3000 tot 6000 meter en tussen 9000 tot 12000 meter).

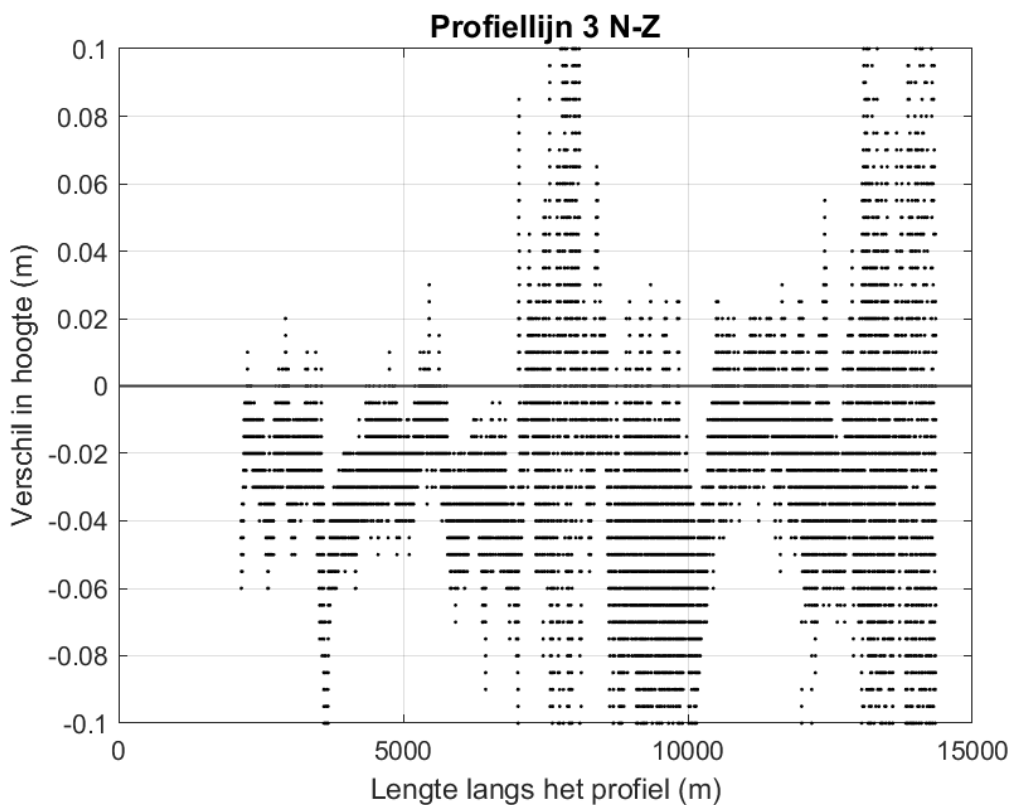
De hoogtes in de drie raaien zijn in januari 2019 en mei 2019 vergelijkbaar. Ondanks de relatief korte periode van enkele maanden, hebben morfologische veranderingen plaatsgevonden, op vergelijkbare wijze als in de opeenvolgende jaren (zie sectie 4.2, 4.3 en 4.4). Wel is de omvang van de veranderingen in de geulen kleiner in deze korte periode.



Figuur 4-34 Dwarsprofiel langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019.



Figuur 4-35 Verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van januari 2019.

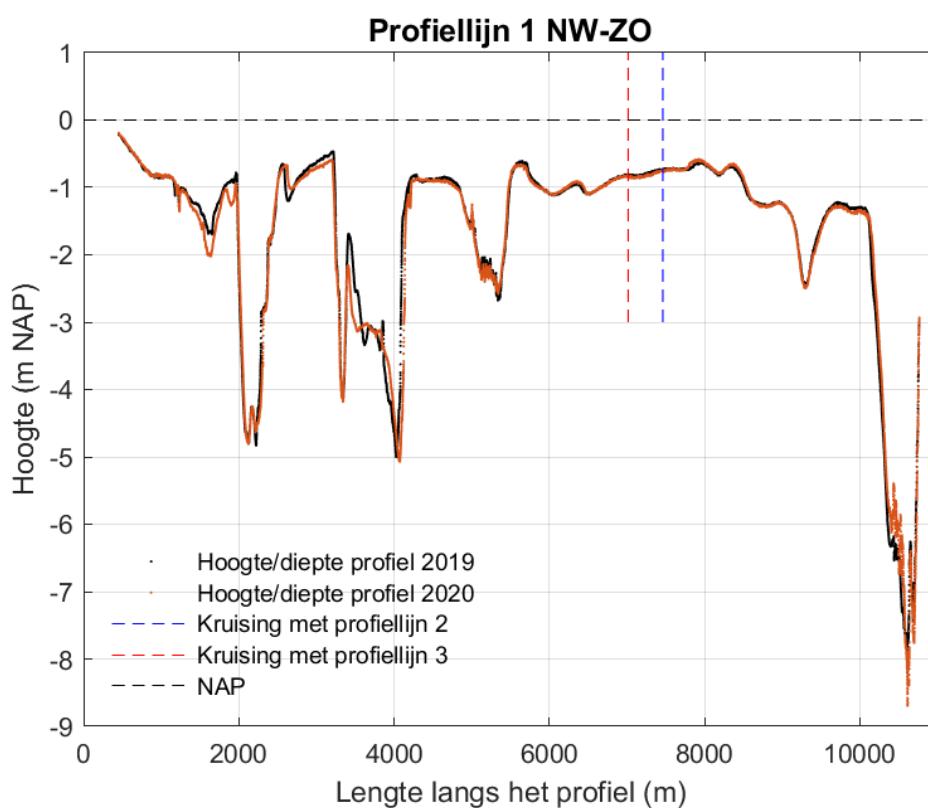


Figuur 4-36 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van januari 2019 en mei 2019. Een negatieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 lager ligt dan de hoogte/diepteraai van januari 2019.

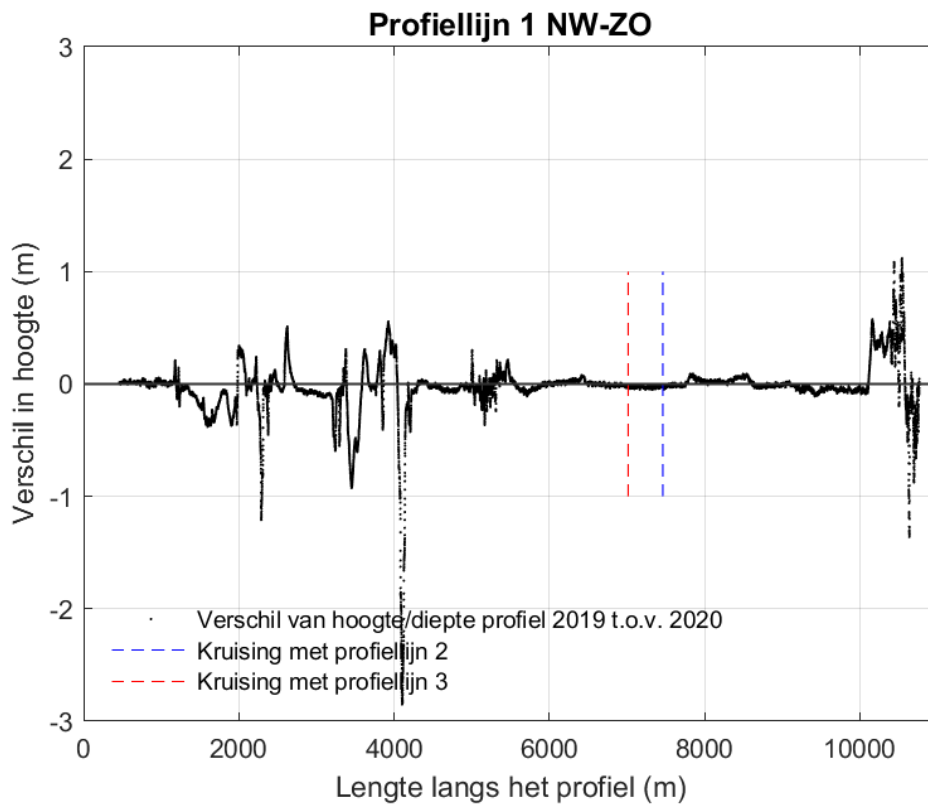
4.6 Vergelijking tussen metingen uit 2019 en 2020

In deze sectie wordt de hoogte van de raaien in mei 2019 met die in 2020 vergeleken (zie Figuur 4-37, Figuur 4-38 en Figuur 4-39). De figuren laten de morfologische veranderingen in deze periode van één jaar zien, waarbij de grootste veranderingen wederom optreden in de sublitorale geulen van de drie profiellijnen.

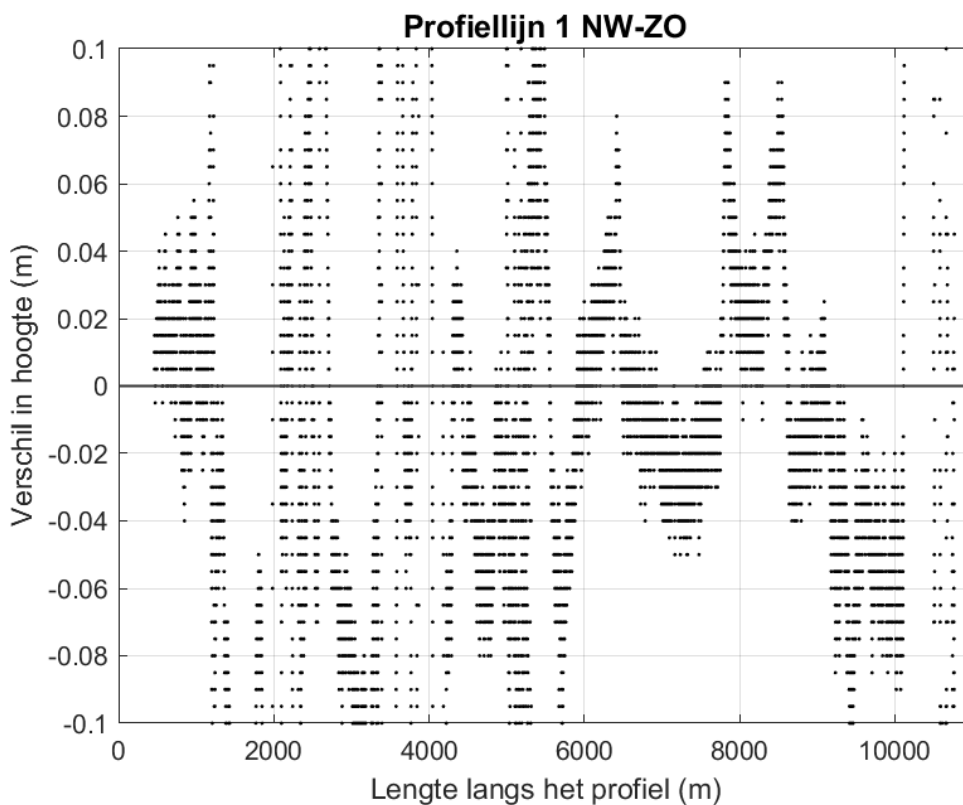
Bij profiellijn 1 is vooral een grote morfologische verandering te zien rondom een van de sublitorale geulen, waarbij er tussen de 1 à 3,5 meter hoogteverschil is opgetreden (zie Figuur 4-38, tussen 3000 tot 4500 meter). Deze dynamiek was ook zichtbaar in de voorgaande vergelijkingen van metingen in paragrafen 4.2 en 4.3. De eerder ingezette verdieping van de geul (2019) op 4000 meter is gehandhaafd gebleven. Op 1800 meter zet een trendmatige verdieping zich voort, waarbij de verdieping van ca. 30cm van afgelopen jaar noemenswaardig is. Op de bank tussen de eerste twee geulen (2500 tot 3000 meter) heeft het afgelopen jaar sedimentatie plaatsgevonden. Ook deze trend is eerder ingezet en handhaaft zich.



Figuur 4-37 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en 2020.

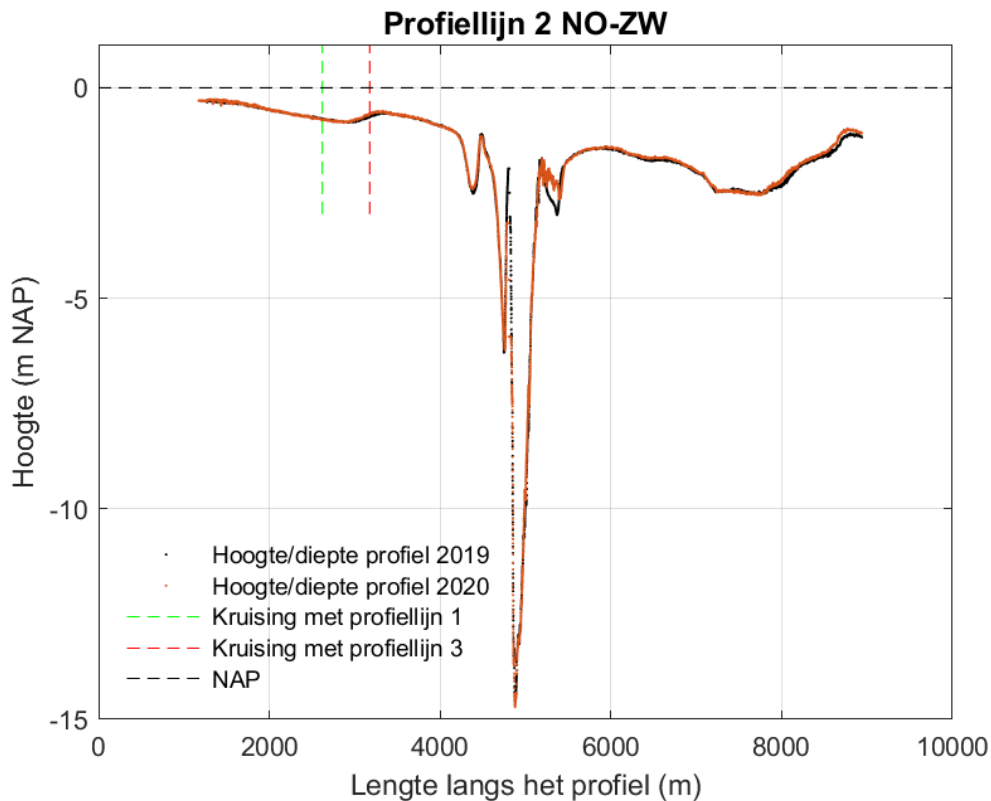


Figuur 4-38 Verschilplot langs profielijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en 2020. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2020 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2019.

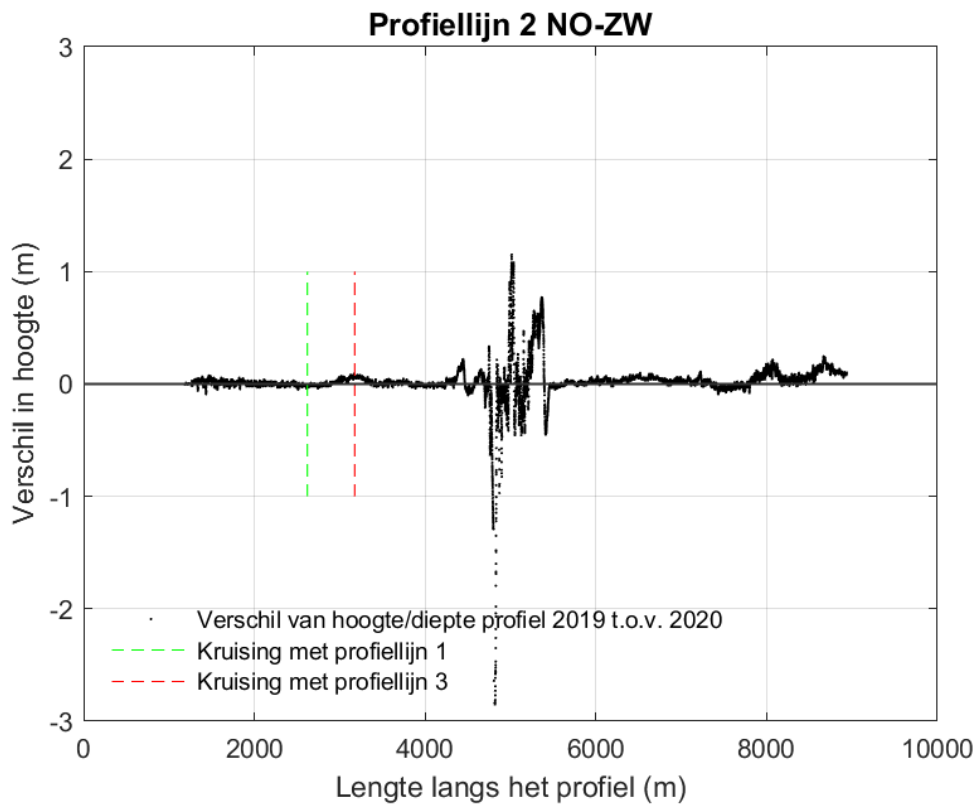


Figuur 4-39 Ingezoomde verschilplot langs profielijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en 2020. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2020 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2019.

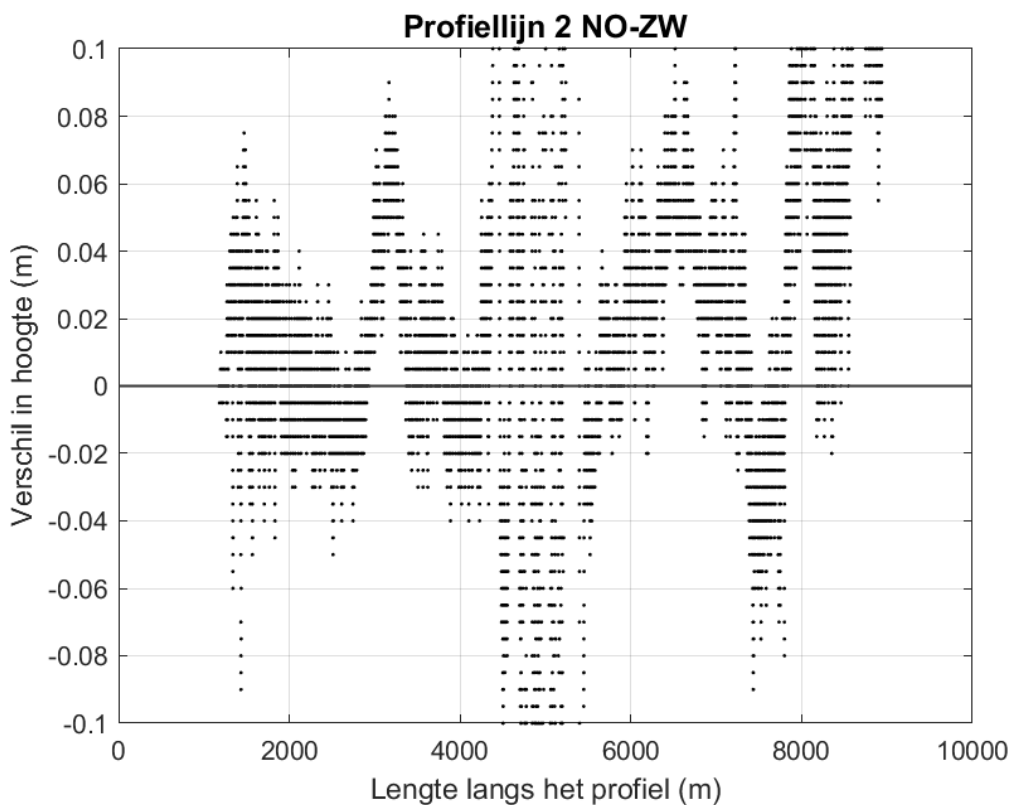
Een morfologische verandering in profiellijn 2 is te zien rondom de sublitorale geul, waarbij er op enkele plekken tot 0,5 à 1 meter hoogteverschil is opgetreden rondom de geulen (Figuur 4-40/Figuur 4-23, midden van de profiellijn). Op 5500 meter, tussen de geul langs de Pollendam en De Pollen, heeft de eerder ingesneden zijgeul zich deels weer opgevuld, met een hoogteverschil van ca. 0,5 meter. De hoogteverandering op de intergetijde platen van profiellijn 2 (NO-ZW) laat op de platen voornamelijk een verhoging van enkele centimeters zien (zie Figuur 4-41, tussen 1000 tot 3500 meter en tussen 6500 tot 9000 meter).



Figuur 4-40 Dwarsdoorsnede langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en 2020.



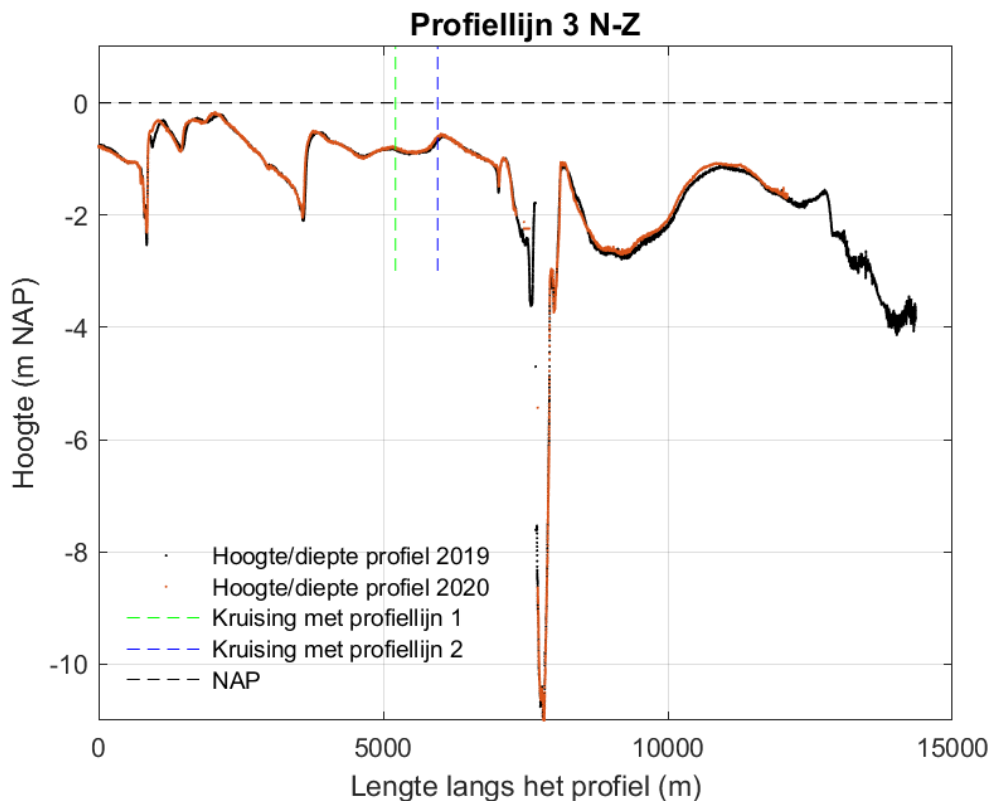
Figuur 4-41 Verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en 2020. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2020 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2019.



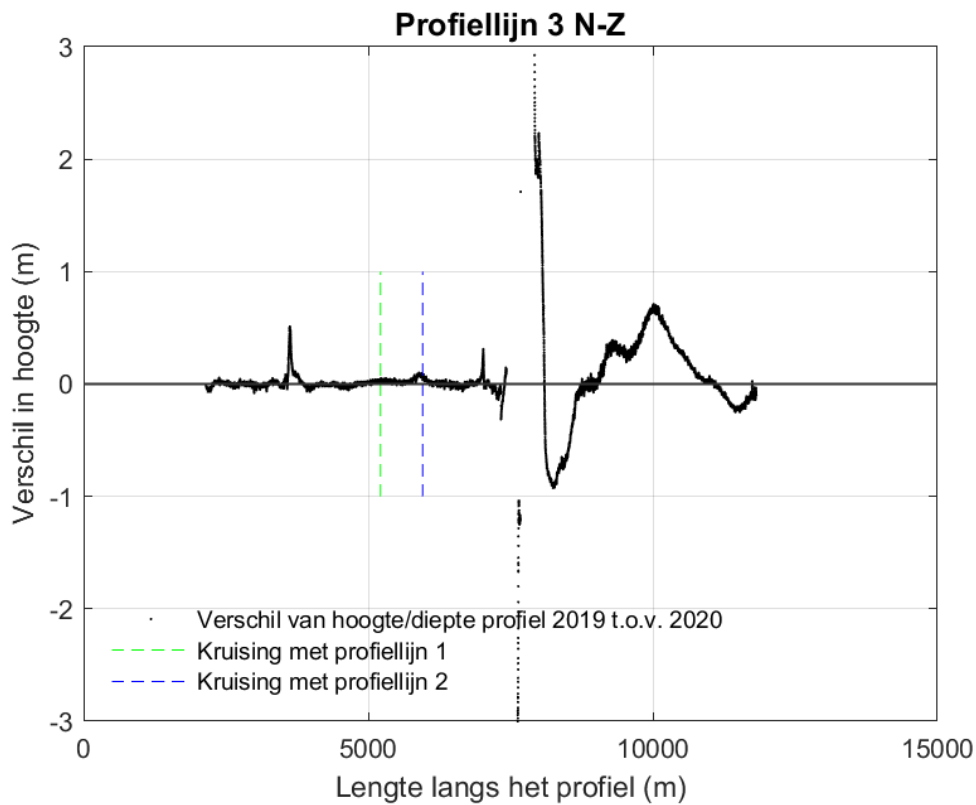
Figuur 4-42 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en 2020. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2020 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2019.

Profiellijn 3, van noord naar zuid, laat weinig tussen 2019 en 2020. De in 2020 gevaren is daarnaast korter dan voorgaande jaren, waardoor veranderingen in het meest zuidelijke gedeelte van het traject dit jaar niet in kaart zijn gebracht.

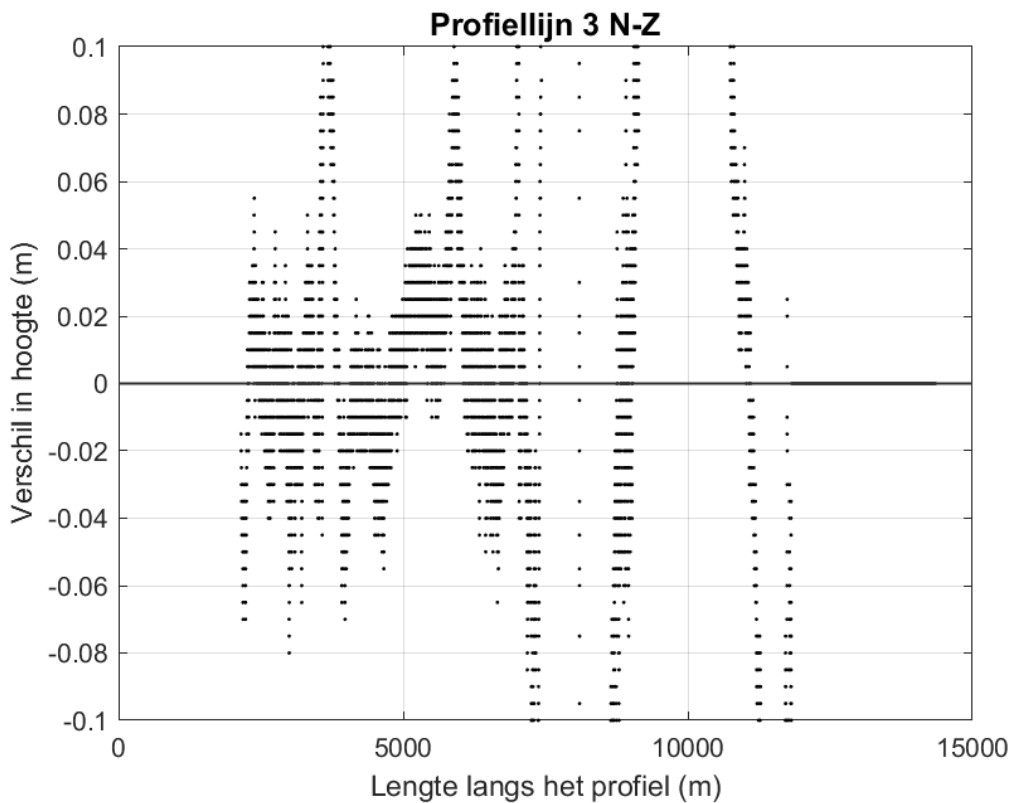
Rondom de intergetijde geulen en de sublitorale geulen zijn relatief kleine morfologische veranderingen zichtbaar, van ongeveer 0,5 meter hoogteverschil (Figuur 4-26, beide uiteinden en midden van de profiellijn). Net als in profiellijnen 1 en 2 is in profiellijn 3 een verhoging van enkele centimeters zichtbaar van de intergetijde platen (zie Figuur 4-27, tussen de 3000 tot 6000 meter en tussen 9000 tot 12000 meter). De dynamiek van de sublitorale geulen komt overeen met de voorgaande hoogte/diepte metingen in de raaien.



Figuur 4-43 Dwarsprofiel langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en 2020.



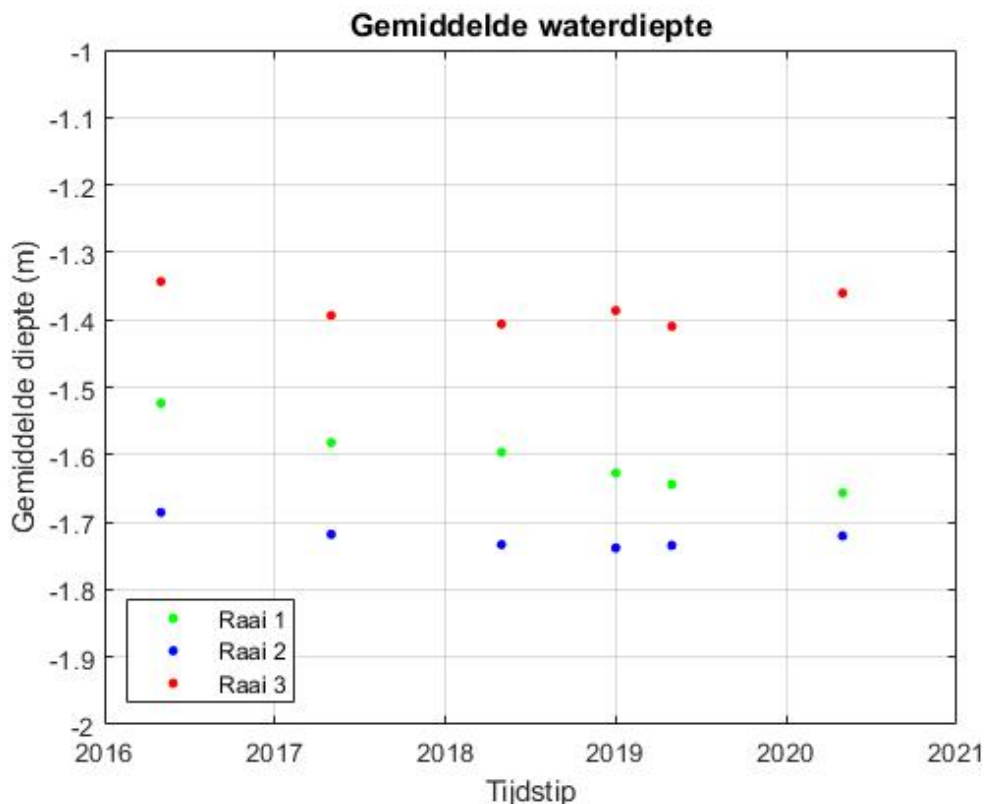
Figuur 4-44 Verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2018 en mei 2019. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van mei 2019 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2018.



Figuur 4-90 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en 2020. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van 2020 hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van 2019.

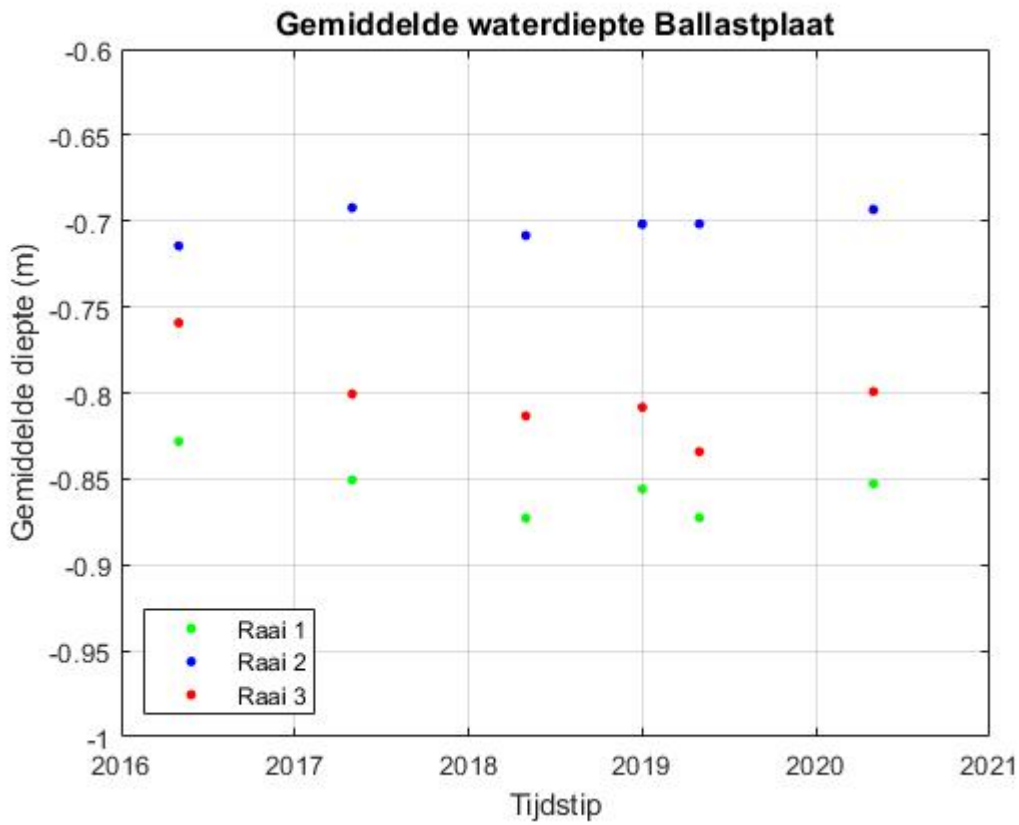
4.7 Gemiddelde diepte per raai 2016-2020

Om de ontwikkelingen in de raaidiepte toegankelijk weer te geven, is gekeken naar veranderingen in de gemiddelde diepte per raai. Om tot een consistente berekening te komen zijn alleen de punten meegenomen waarvan voor elk jaar een meetwaarde beschikbaar is. De gemiddelde diepte per raai per jaar is weergegeven in Figuur 4-45 Plot van de gemiddelde waterdiepte per raai langs de verschillende profielen voor alle meetmomenten. Alleen de punten waar elk jaar is gemeten zijn meegenomen in de berekening van de gemiddelde diepte. Figuur 4-45.

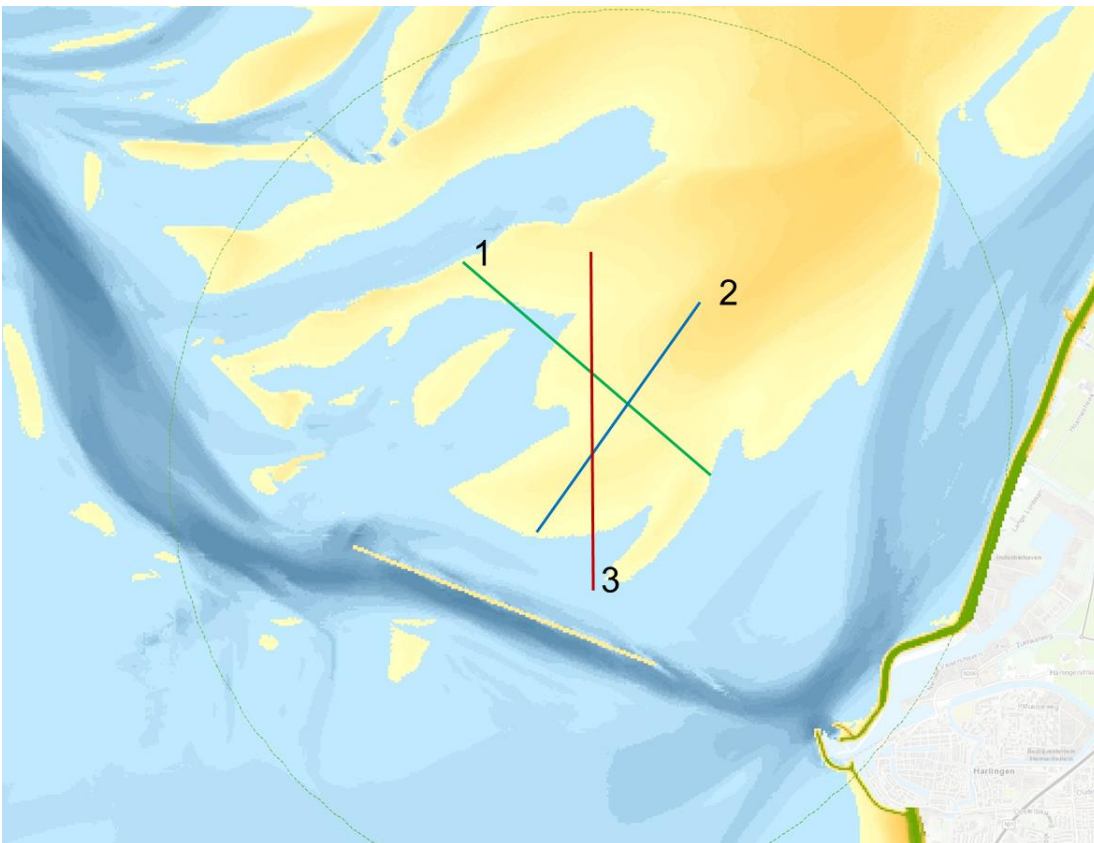


Figuur 4-45 Plot van de gemiddelde waterdiepte per raai langs de verschillende profielen voor alle meetmomenten. Alleen de punten waar elk jaar is gemeten zijn meegenomen in de berekening van de gemiddelde diepte.

In aanvulling op de gemiddelde raai over de volledige lengte, is ook de gemiddelde hoogte berekend van het deel van de drie raaien dat bestaat uit wadplaat. Figuur 4-46 toont de berekende gemiddelde diepte in een grafiek en in de kaart in Figuur 4-47 zijn de gebruikte delen gemarkeerd.



Figuur 4-46 Plot van de gemiddelde waterdiepte voor de hoge delen van de raaien, de locatie waarover de ontwikkeling is bepaald, staat aangegeven in Figuur 4-47.



Figuur 4-47 Kaart waarin de delen zijn gemarkeerd die zijn gebruikt voor het bepalen van de gemiddelde hoogte van de hoge en stabiele delen van de Ballastplaat.

5 OBSERVATIES 2016-2020 HOOGTE/DIEPTE RAAIEN

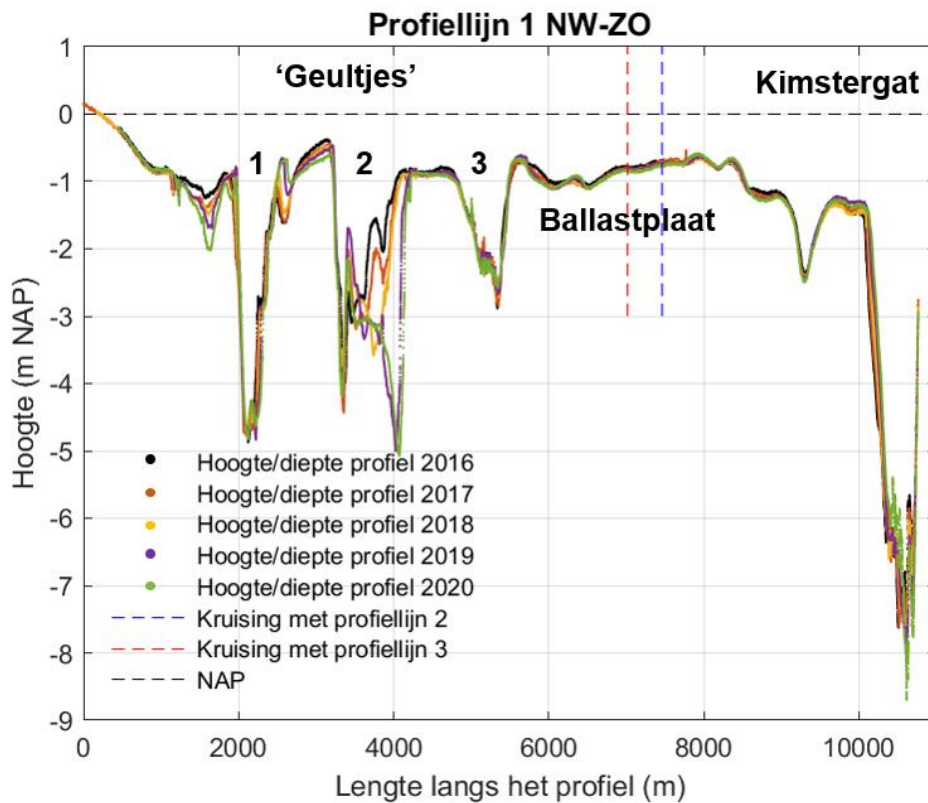
In de voorgaande paragrafen zijn de meetraaien beschreven en onderling vergeleken. In deze paragraaf wordt ingegaan op de verschillen tussen de vijf opeenvolgende opnamen. Daartoe zijn dwarsdoorsneden gemaakt van de drie profiellijnen met de vijf opeenvolgende metingen van 2016, 2017, 2018, 2019 en 2020. De meting van januari 2019 is buiten deze vergelijking gehouden, vanwege het verschil in het interval tussen de januari 2019 meting en de overige metingen.

Voordat wordt gekeken naar de waargenomen veranderingen eerst een opmerking over de nauwkeurigheid van deze metingen. De nauwkeurigheid van de hoogtemetingen bedraagt enkele centimeters, zoals ook is gebleken uit de onderlinge controlepunten op de raaien (zie paragraaf 3). Deze nauwkeurigheid betekent dat alle waargenomen veranderingen die kleiner zijn dan enkele centimeters niet noodzakelijkerwijs betekenen dat dit een morfologische verandering betreft, het kan ook het gevolg zijn van schijnbare veranderingen. Aan de metingen van kleine maar consequente verhoging of consequente verlaging wordt meer waarde toegekend dan aan variaties in de hoogteligging. De metingen van de hoogte/diepte in de raaimetingen zijn goed uitvoerbaar en resulteren in bruikbare gegevens. Indien zich onverwachte veranderingen in de bodemligging zouden voordoen, dan zijn deze uitstekend waarneembaar met deze raaimetingen.

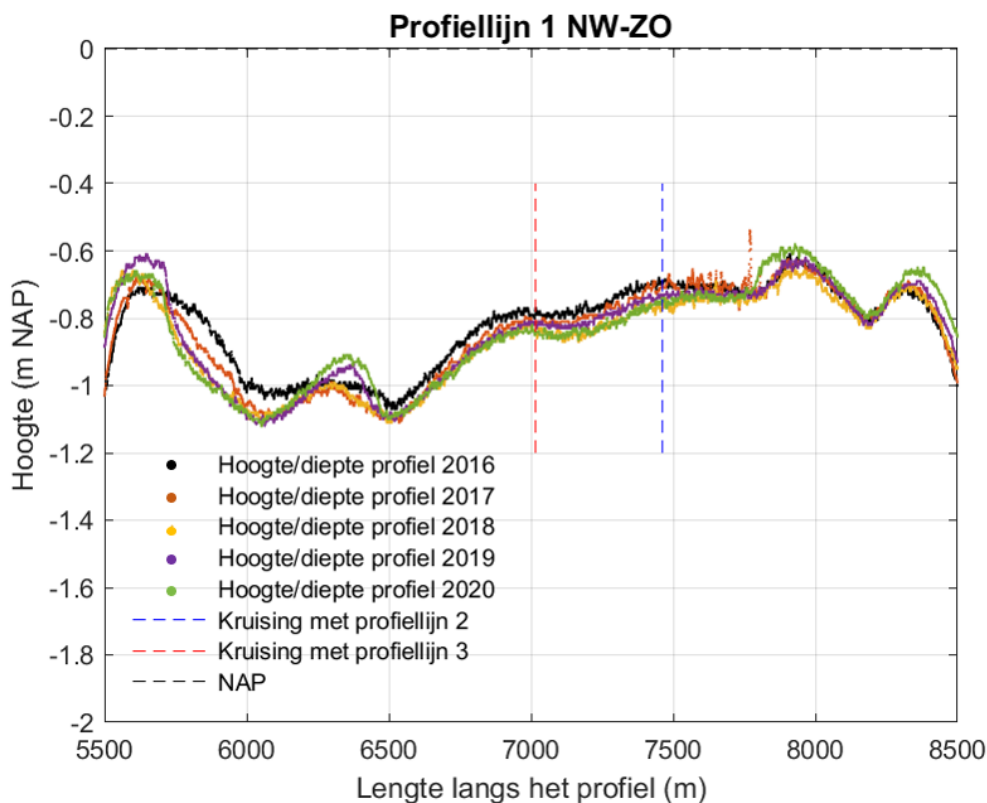
De overzichtsdwarsdoorsnede van profiellijn 1 staat in Figuur 5-1. In dit overzicht is zichtbaar dat er duidelijk veranderingen optreden rond de geulen in het gebied. Bij de weergave op deze verticale schaal lijken de droogvallende platen vrijwel niet te veranderen. De eerste 4000 meter van de opname laten de meeste morfologische dynamiek zien. Tussen 2016 en 2020 snijdt de zijgeul op 1800 meter zich geleidelijk steeds verder in. De bank tussen geul 1 en 2 (tussen 2200 en 3000 meter) hoogt zich jaarlijks enkele centimeters op. In de grafiek met de gemiddelde waterdiepte van raai 1 in Figuur 4-45 is zichtbaar dat de gemiddelde waterdiepte is toegenomen van iets meer dan NAP -1,5 m naar ruim -1,65 m. Deze toename is het gevolg van veranderingen in de geultjes die onderdeel vormen van deze raai. De gemiddelde diepte van de hoge delen op de Ballastplaat, zoals getoond in Figuur 4-46 laat geen structurele afname zien.

Dat de gemiddelde diepte slecht beperkt verandert, betekent niet dat er geen morfologische veranderingen optreden op de Ballastplaat. Om dat te illustreren is een detail van de Ballastplaat toegevoegd in Figuur 5-2 met een meer gedetailleerde verticale schaal. In deze dwarsdoorsnede is zichtbaar dat deze plaat geen platte pannenkoek is, maar dat deze geleidelijk oploopt van het noordwest naar het zuidoosten, waarbij ook enkele undulaties zichtbaar zijn. Deze undulaties, met een lengte van rond de 500 m zijn in alle opnames zichtbaar. Van het hoogste punt van de plaat in deze dwarsdoorsnede loopt de plaat vrij snel af naar het noordoosten, ook met twee undulaties. De vorm van de dwarsdoorsnede door de plaat is in alle vijf de opnames vergelijkbaar. De hoogteverschillen tussen de vijf opnames bedraagt niet meer dan twee decimeter. Tussen 6500 m en 8200 m liggen de opeenvolgende opnames van 2016, 2017 en 2018 steeds lager, terwijl de opname van 2019 juist hoger ligt. Ook de opname van 2020 laat rond 8000 meter een toename in hoogte zien. Daarmee lijkt er nog geen sprake van een trendmatige verandering in de hoogte van dat deel van de Ballastplaat. De hoogteveranderingen van de twee undulaties aan de noordwestzijde van de Ballastplaat (Figuur 5-1, van 5500 tot 6500 meter) corresponderen met het opschuiven van de meest noordwestelijke undulatie naar het noordwesten en het geprononceerder worden van de meer zuidoostelijke undulatie.

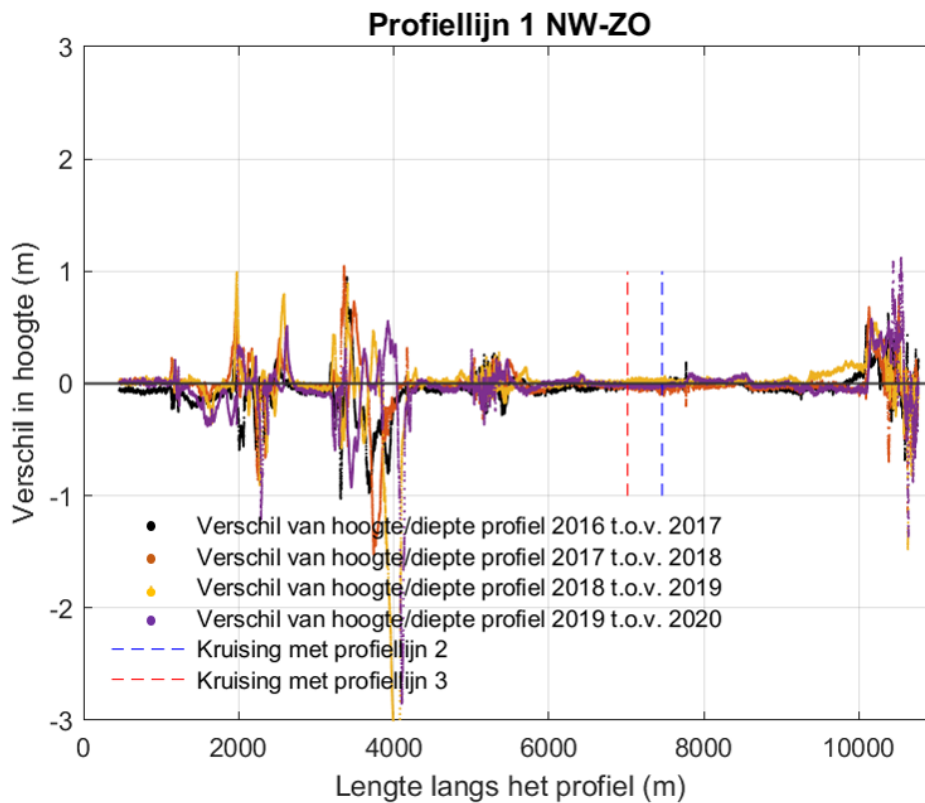
In Figuur 5-3 zijn de verschillen tussen de opeenvolgende bodemliggingen uitgezet. In de delen van deze raaien waar alle waarden aan één zijde van de grafiek liggen, is sprake van een trendmatig hoger of lager worden. Duidelijk is dat dit slechts voor beperkte delen van deze raai aan de orde is. Combinaties van waarden boven de nul met vlak daarnaast waarden onder nul wijzen op het verplaatsen van morfologische eenheden. Dit lijkt bijvoorbeeld het geval te zijn bij de middelste (nummer 2) van de drie geultjes en ook bij de undulaties op de Ballastplaat (Figuur 5-3, rond 6000 meter).



Figuur 5-1 Dwarsprofiel langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016, 2017, 2018, 2019 en 2020.

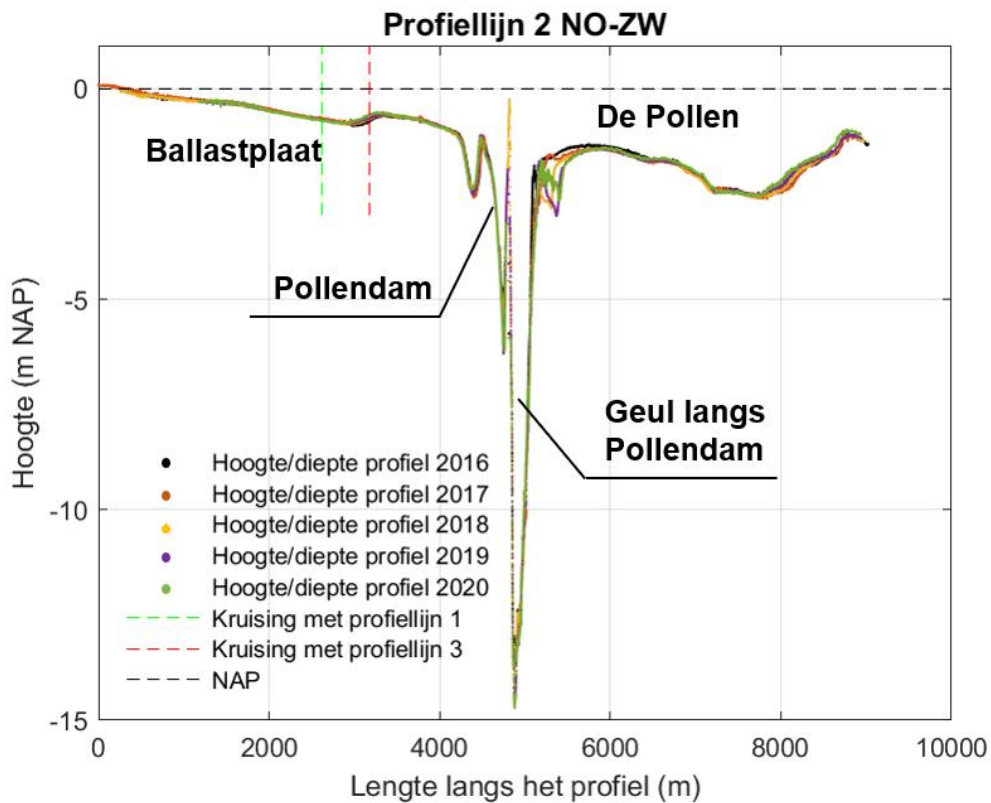


Figuur 5-2 Ingezoomd dwarsprofiel van de Ballastplaat langs profiellijn 2 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016, 2017, 2018, 2019 en 2020 (Detail van Figuur 5-1).

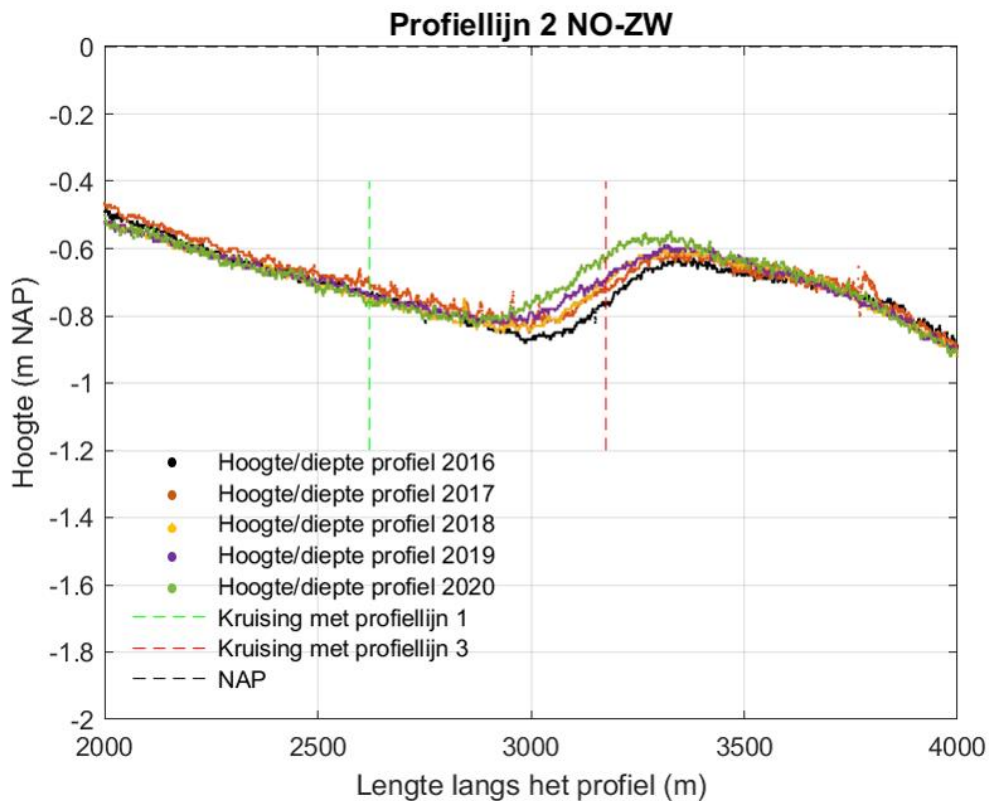


Figuur 5-3 Verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens tussen 2016 t.o.v. 2017, 2017 t.o.v. 2018, 2018 t.o.v. 2019 en 2019 t.o.v. 2020. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van het opvolgende jaar hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van het eerdere jaar.

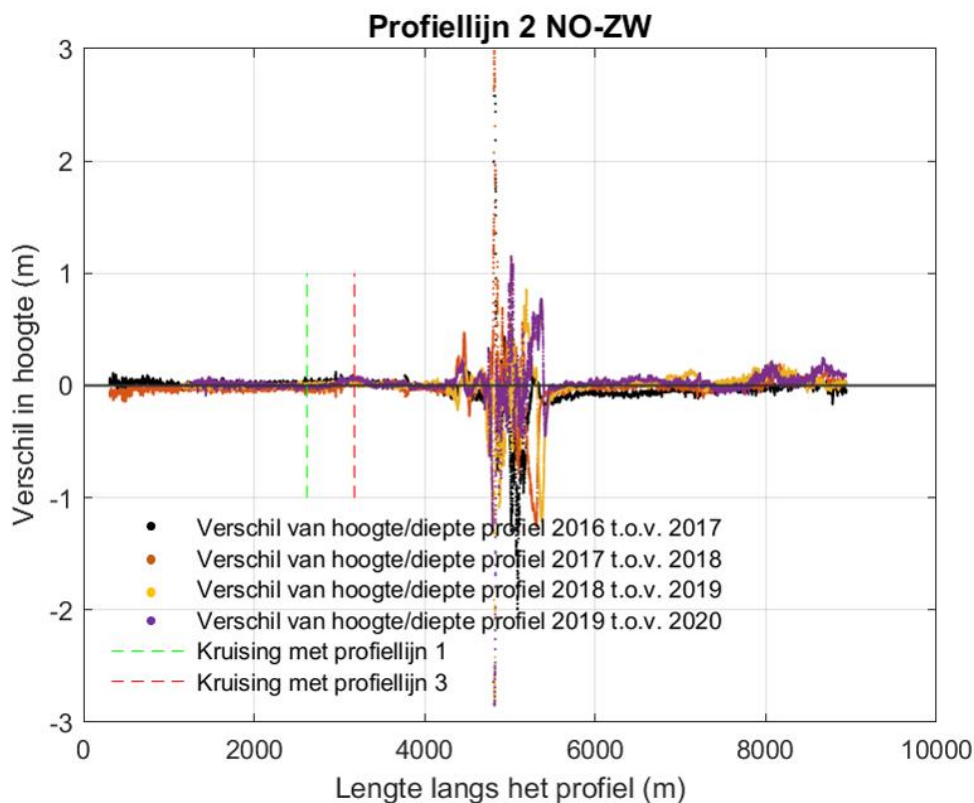
Figuur 5-4 toont de dwarsdoorsnede van profiellijn 2 in een overzicht. In deze dwarsdoorsnede is nog duidelijker dan in profiellijn 1 dat de grotere en meer zichtbare veranderingen in de morfologie alleen optreden aan de randen van de geul. Deze veranderingen leiden niet tot een trendmatige verandering van de gemiddelde waterdiepte, zoals zichtbaar is in Figuur 4-45. De morfologische veranderingen op de droogvallende platen zijn zeer beperkt. Figuur 5-5 laat een detail van de Ballastplaat zien uit profiellijn 2. De gemeten diepteligging lijkt nergens meer dan een decimeters te verschillen in de vijf opnames. Ook de gemiddelde hoogte van de Ballastplaat in Figuur 4-46 laat geen trendmatige veranderingen zien. Structurele verschillen, met de opeenvolgende metingen consequent hoger of lager dan de voorgaande op de Ballastplaat, doen zich in deze profiellijn niet voor. De dynamiek rondom de geulen is goed te zien Figuur 5-6.



Figuur 5-4 Dwarsprofiel langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016, 2017, 2019 en 2020.

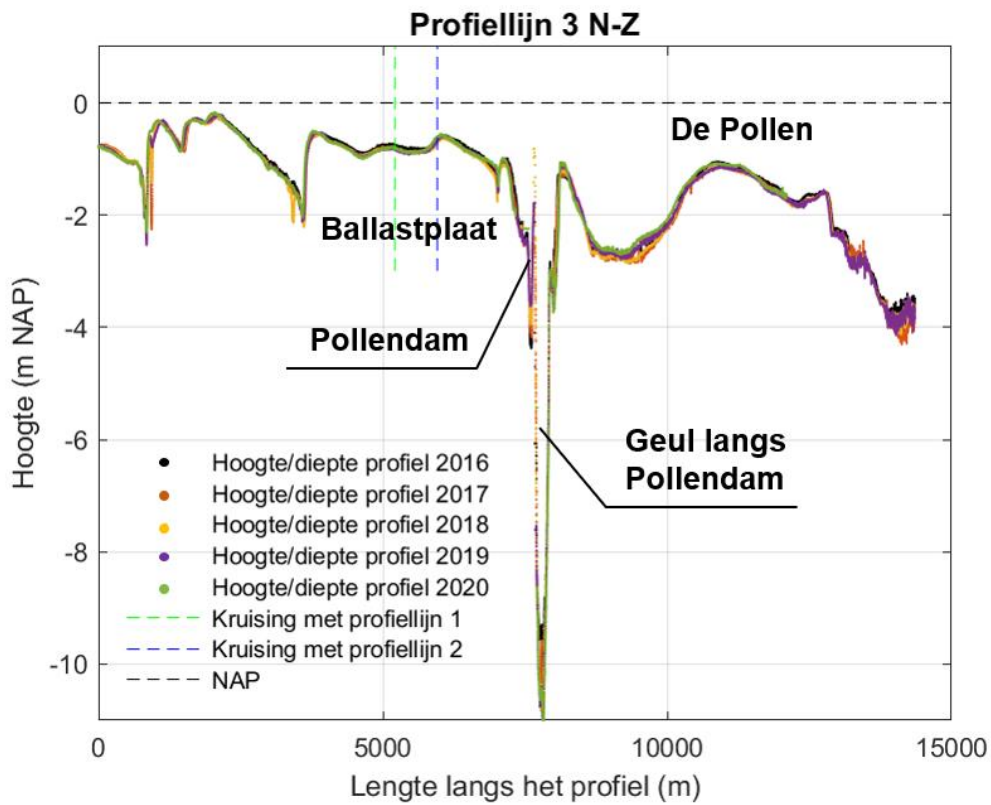


Figuur 5-5 Ingezoomd dwarsprofiel langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016, 2017, 2018, 2019 en 2020 (Detail van Figuur 5-4).

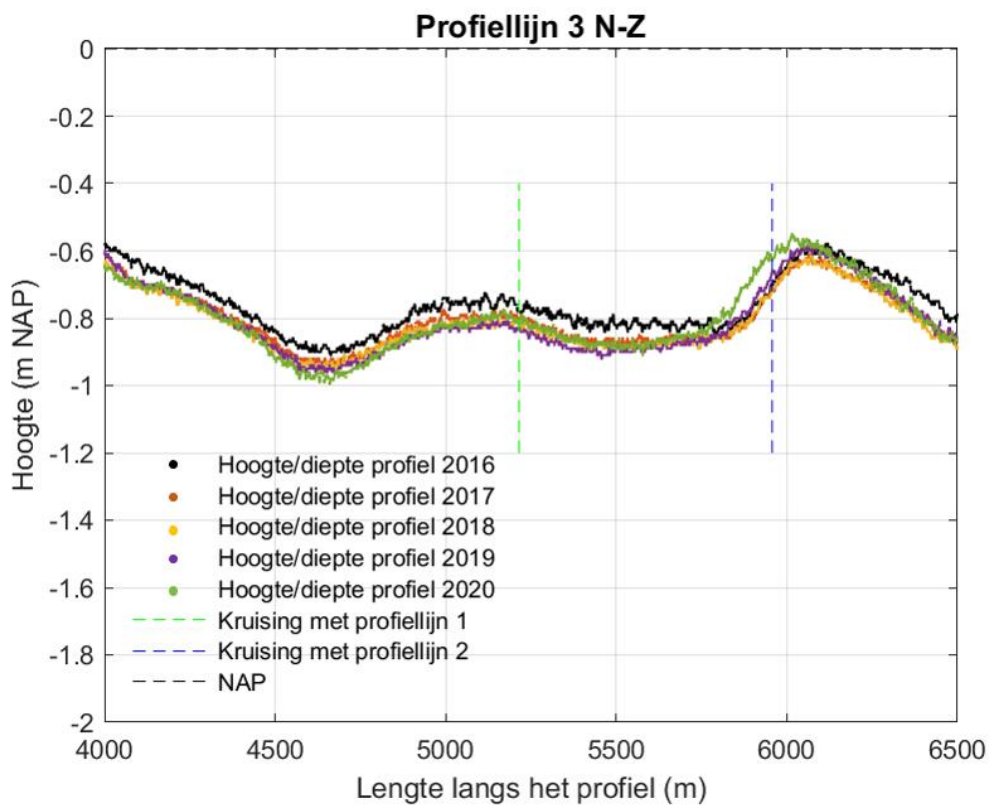


Figuur 5-6 Verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens tussen 2016 t.o.v. 2017, 2017 t.o.v. 2018, 2018 t.o.v. mei 2019 en 2019 t.o.v. 2020. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van het opvolgende jaar hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van het eerdere jaar.

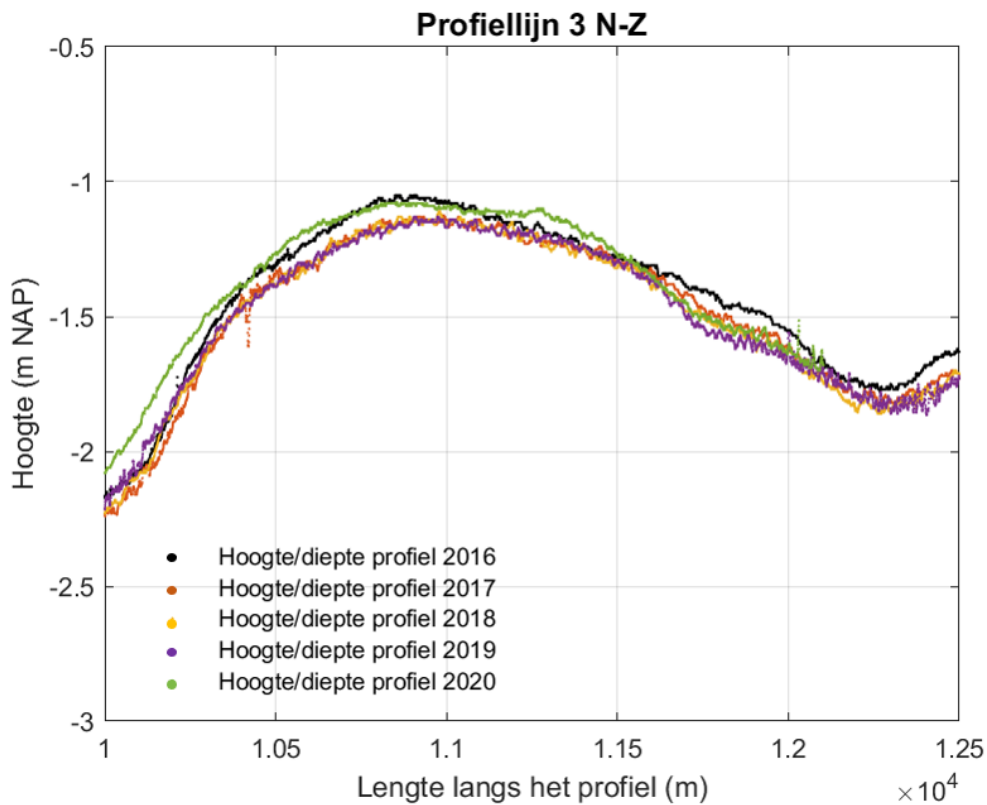
Figuur 5-7 is de overzichtsdoorsnede van profiellijn 3, waarin zichtbaar is dat de grotere veranderingen alleen optreden rond de geulen in het gebied. Deze veranderingen leiden niet tot een trendmatige verandering van de gemiddelde waterdiepte van de geulen en platen, zoals zichtbaar is in Figuur 4-45. Figuur 5-8 toont een detail van de Ballastplaat, waarin bij de aangepaste verticale schaal opvalt dat in het noordelijke deel, van 4500 tot 5700 meter de opeenvolgende jaren steeds iets lager liggen. Vanwege de beperkte hoogteverschillen en het beperkte aantal opnamen is het nog niet mogelijk om van een trendmatige verlaging te spreken. De ontwikkeling van de gemiddelde hoogte van de Ballastplaat in Figuur 4-46 laat een afname zien tot en met mei 2019, gevolgd door een toename. Figuur 5-9 is ook een detail van profiellijn 3, maar dan ten zuidwesten van de Pollendam in het gebied dat “de Pollen” wordt genoemd. Het detailgebied is geen droogvallende plaat, maar een sublitorale plaat die (vrijwel) altijd onderwater ligt. Duidelijk is dat de hoogtes van 2017, 2018, 2019 aan de noordflank van deze sublitorale plaat lager liggen dan in 2016. De waarden voor 2017, 2018 en mei 2019 komen grotendeel overeen. In 2020 is gebroken met die trend en heeft de plaat zich opgehoogd, waardoor de hoogte boven de hoogte van de opname uit 2016 uitkomt. Aan de zuidflank zijn de verschillen in hoogte tussen opeenvolgende opnames veel kleiner, met alleen in het uiterste zuidwesten consequent afnemende hoogtes in de opeenvolgende opnames. In de grafiek met de hoogteverschillen tussen de opeenvolgende opname in Figuur 5-10 weer vooral de dynamiek bij de geulen duidelijk zichtbaar.



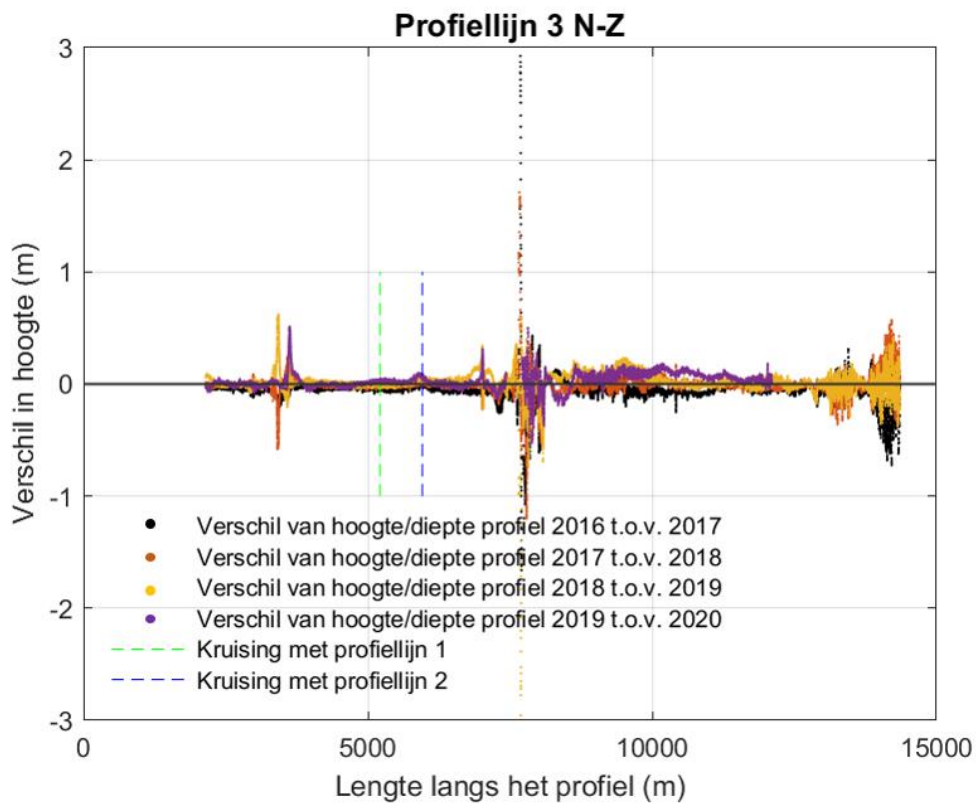
Figuur 5-7 Dwarsprofiel langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016, 2017, 2018, 2019 en 2020.



Figuur 5-8 Ingezoomd dwarsprofiel van de Ballastplaat langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016, 2017, 2018, 2019 en 2020 (Detail van Figuur 5-7).



Figuur 5-9 Ingezoomd dwarsprofiel van de Pollen langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016, 2017, 2018, 2019 en 2020 (Detail van Figuur 5-7).



Figuur 5-10 Verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens tussen 2016 t.o.v. 2017, 2017 t.o.v. 2018, 2018 t.o.v. 2019 en 2019 t.o.v. 2020. Een positieve waarde betekent dat de hoogte/diepteraai van het opvolgende jaar hoger ligt dan de hoogte/diepteraai van het eerdere jaar.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Ten aanzien van de toegepaste methoden

Hoogte/diepte raaien

De hoogte/diepte raaien zijn met succes uitgevoerd in 2016, 2017, 2018, 2019 (tweemaal) en 2020. Het studiegebied leent zich, door de relatief lage ligging van de platen ter plaatse van het studiegebied, uitstekend voor het uitvoeren van deze varende metingen. De metingen zijn per jaar onderling consistent binnen de betrouwbaarheids-bandbreedte. Ook de metingen uit de opeenvolgende jaren laten betrouwbare resultaten zien. De raaimetingen zijn uitstekend bruikbaar voor het uitvoeren van de monitoring.

Vaklodingen

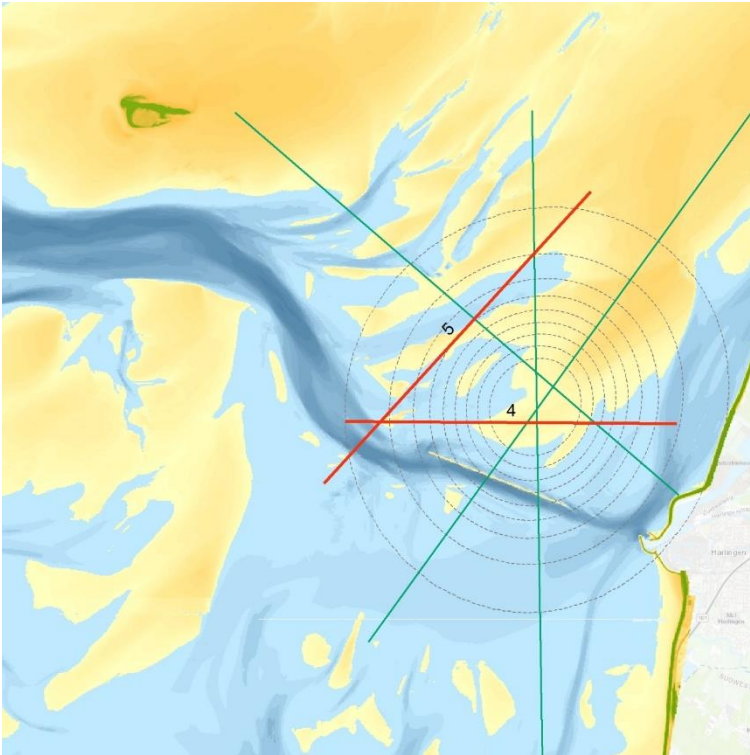
De vaklodingen zijn uitstekend bruikbaar om de grootschalige en langjarige ontwikkelingen in beeld te brengen. De vaklodingen komen iedere zes jaar beschikbaar, zodat een volgende analyse van de grootschalige ontwikkelingen volgt op het beschikbaar komen van de vaklodingen die voorzien zijn voor het jaar 2022 voor het kombergingsgebied van het Vlie.

LiDAR

De LiDAR hoogtemetingen van de droogvallende platen zijn uitgevoerd in 2004, 2010 en 2016 in opdracht van Rijkswaterstaat en in 2019 in opdracht van Frisia. In deze Tnul rapportage zijn alle LiDAR hoogtemetingen getoond. Voor de vergelijking zijn de LiDAR-hoogtemetingen van 2016 en 2019 gebruikt. De dekking van de droogvallende wadplaten in de opname van 2016 is beperkt, waarschijnlijk vanwege het gehanteerde kwaliteitscriterium (minimum aantal metingen per punt) in combinatie met de kenmerken van de lage wadplaten (relatief nat), die het behalen van dat kwaliteitscriterium in de weg staan. Bij het inwinnen van de LiDAR hoogtemetingen in 2019 is aandacht besteedt aan het inwinnen van het volledige droogvallende areaal (boven NAP -0,5 m) in het studiegebied. De vergelijking van de raaimetingen met de LiDAR hoogtemetingen laten verschillen zien die groter zijn dan verwacht mag worden op basis van de beide meettechnieken. Het vertrouwen in de uitkomsten van de LiDAR-hoogtemetingen van de droogvallende platen is kleiner dan het vertrouwen in de raaimetingen. De LiDAR metingen zijn relatief complex om uit te voeren en door hun uitvoeringswijze gevoeliger voor de meteorologische omstandigheden en het getij.

Aanvullende raaimetingen

De LiDAR hoogtemetingen van de droogvallende platen leveren tot nu toe minder bevredigende resultaten op dan de drie hoogte/diepte metingen in de raaien. De metingen van de hoogte van de wadplaten en het sublitoraal in de drie raaien is zeer succesvol in het studiegebied. Vanwege de beperkte hoogte van de wadplaten leent het gebied zich uitstekend voor metingen met een ondiep stekend vaartuig. Voor dit gebied zijn de hoogte/diepte raaien bewezen effectief. Door twee aanvullende raaien in te meten wordt een nog beter ruimtelijk beeld verkregen van de hoogte van de droogvallende platen. De locatie van de twee aanvullende raaien is aangegeven in Figuur 6-1.



Figuur 6-1 Aanvullende hoogte/diepte raaien 4 en 5 voor het inmeten van de droogvallende platen, als alternatief voor de LiDAR-hoogtemetingen van de droogvallende platen.

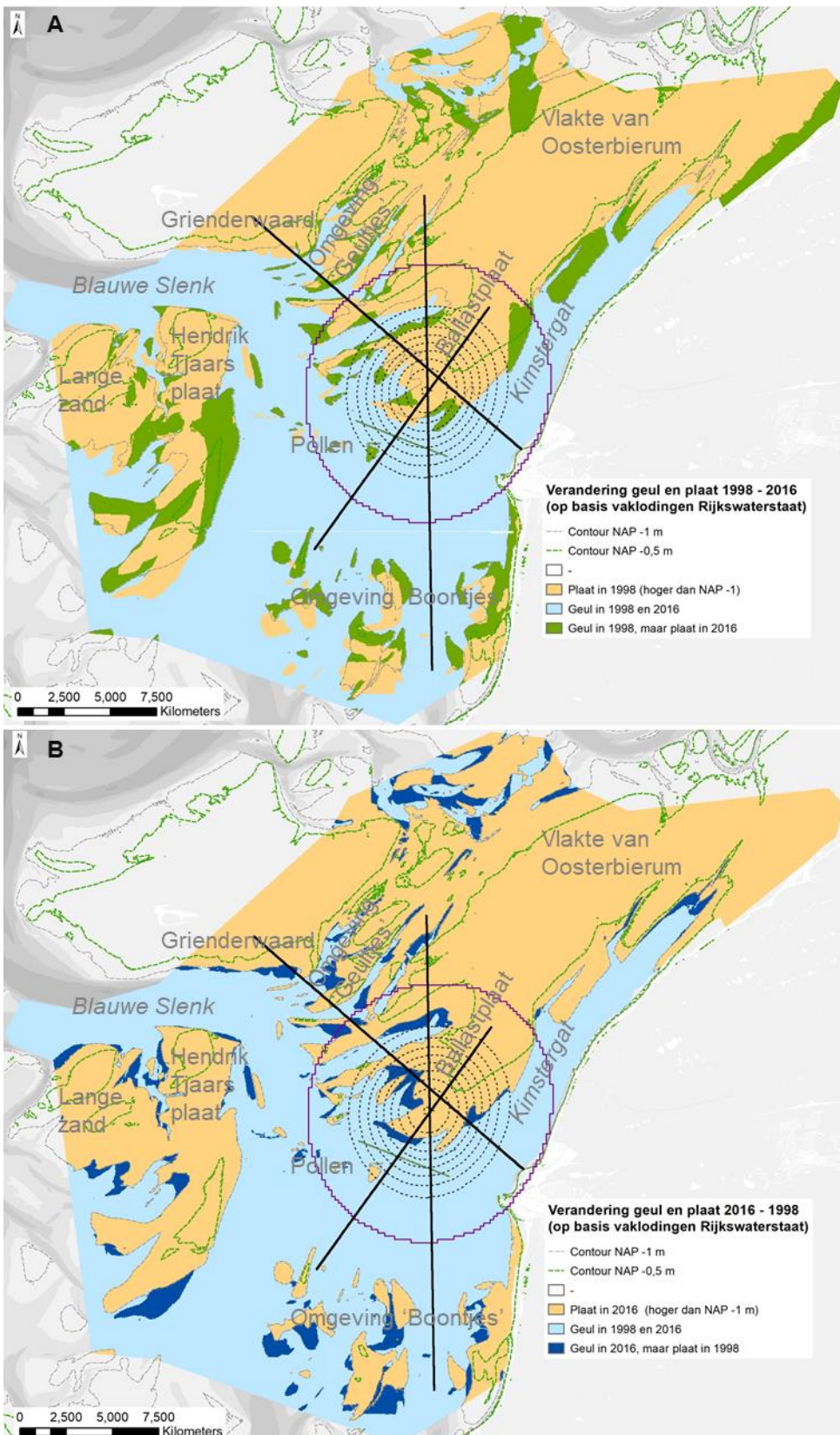
6.2 Ten aanzien van de morfologische ontwikkelingen

Langjarige ontwikkelingen (tientallen jaren)

In het studiegebied voor de zoutwinning treden een aantal langjarige veranderingen op, die zichtbaar zijn in de vaklodingen. Een deel van deze veranderingen is trendmatig en een deel bestaat uit variaties. Hieronder enkele van deze ontwikkelingen:

- De meest uitgesproken structurele ontwikkeling vindt plaats op de Vlake van Oosterbierum en de Ballastplaat. Door de doorgaande sedimentatie zijn de hoogte en het areaal van de droogvallende plaat toegenomen. Hierbij hoort de afname van de omvang van de getijdegeul Kimstergat. Het drainagegebied van deze getijdegeul neemt door de hoogtetoename en uitbreiding van de droogvallende plaat steeds verder af en daar hoort een steeds kleinere geul bij.
- De geultjes tussen de Ballastplaat en de Grienderwaard zijn dynamische onderdelen van het studiegebied, de geultjes verplaatsen en verdiepen en verondiepen. De Grienderwaard zelf is relatief stabiel, hoewel van opname naar opname wel kleine verschillen in de hoogte van de droogvallende plaat zichtbaar zijn.
- Ten zuidwesten van de Pollendam is het gebied van “de Pollen” relatief dynamisch, hier ontstaan en verdwijnen droogvallende en sublitorale platen. Het is wel een netto sedimentatie gebied, dat geleidelijk ondieper wordt. Dit geldt ook voor het gebied ten zuidwesten van Harlingen, rondom het gebaggerde deel van de vaargeul “Boontjes”.

In het algemeen geldt dat het invloedsgebied een dynamisch gebied is, waar de ligging van geulen en wadplaten verandert. Deze dynamiek is een kenmerk van de Waddenzee. De dynamiek in het invloedsgebied is geïllustreerd in Figuur 6-2. In deze kaarten is zichtbaar gemaakt welke wadplaten er in 2016 bij zijn gekomen ten opzichte van 1998 (de groene delen in de bovenste kaart) en welke geulen in 2016 nog wadplaten waren in 1998 (de blauwe delen in de bovenste kaart). Duidelijk is dat overal in het gebied zowel wadplaten zijn ontstaan als zijn verdwenen. Wel is in één oogopslag zichtbaar dat in de bovenste kaart meer groene delen aanwezig zijn dan blauwe delen in de onderste kaart. Dat verschil betekent dat er meer wadplaat is bijgekomen dan dat er aan wadplaat is verdwenen en dat komt overeen met de trend in de ontwikkeling van het plaatareaal (Figuur 0-10).



Figuur 6-2 Kaarten met plaat en geul en de gebieden die zijn veranderd; met in A in groen het plaatareaal dat in 2016 erbij is gekomen ten opzichte van 1998 en in B in blauw de platen die in 2016 ten opzichte van de situatie in 1998 zijn verdwenen.

Korte termijn ontwikkelingen (jaren)

De metingen in de drie hoogte/diepte raaien laten zien dat de langjarige ontwikkelingen die hierboven zijn beschreven, niet noodzakelijkerwijs dezelfde trend vertonen op de korte termijn. Zo is de overgang van de Ballastplaat naar het Kimstergat, aan de zuidoostzijde van profiellijn 1 (Figuur 2-3) een gebied waar van jaar op jaar zowel erosie als sedimentatie kan plaatsvinden (zichtbaar aan de rechterzijde in Figuur 5-3). In de bodemligging is sprake van een uitbreiding van de wadplaat en afname, wanneer wordt gekeken naar de verschillen tussen 2016 en 2020 (Figuur 5-1, aan de rechterzijde). Dit geldt in nog grotere mate voor de jaar-op-jaar veranderingen op de droogvallende platen, die over het algemeen dermate klein zijn dat pas na meer dan vijf opnamen kan worden vastgesteld of sprake is van trendmatige veranderingen in de autonome situatie. Dit is ook duidelijk in de ontwikkeling van de gemiddelde hoogte van de Ballastplaat in de raaimetingen in Figuur 4-46.

Het ontbreken van duidelijke trends betekent niet dat afwijkende ontwikkelingen niet kunnen worden waargenomen. De nauwkeurigheid van de raaimetingen is enkele centimeters. De maximale snelheid van bodemdaling in het diepste deel van de bodemdalingsschotel bedraagt ook enkele centimeters. Indien de vereffening van de bodemdaling op de wadplaat beperkter zou zijn dan is voorspeld, dan zal dit naar voren komen in de raaimetingen.

7 REFERENTIES

Cleveringa, J. 2016. Notitie Morfologische ontwikkelingen Ballastplaat, Arcadis Memo 8-jan-2016.

Elias, E.P.L., 2019. Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002.

Oost, A.P., J. Cleveringa & M. Taal, 2018. Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2018. Deltares-rapport 11202177-000 - ZKS-0013

Quadros, N., 2016. Technology in Focus: Bathymetric LiDAR – HydroMagazine 19/10/2016.

COLOFON

MONITORING T0-SITUATIE 2019 BODEMLIGGING STUDIEGEBIED ZOUTWINNING WADDENZEE

KLANT

Frisia Zout B.V.

AUTEUR

Jessica Bergsma & Stijn de Haan

PROJECTNUMMER

C03081.000369

ONZE REFERENTIE

D10007501:31

DATUM

28 april 2020

STATUS

Concept

GECONTROLEERD DOOR

Jelmer Cleveringa
Senior Advisor Coastal Morphodynamics

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com

BIJLAGE A HOOGTE WADPLATEN LIDAR

7.1 Introductie meetmethode

LiDAR metingen zijn hoogtemetingen die worden uitgevoerd vanuit een vliegtuig (of vanuit een helikopter of een drone), door een naar de grond gerichte laserbundel en plaatsbepalingsapparatuur (die niet alleen de x, y en z-positie van het vliegtuig vaststelt, maar ook corrigeert voor de bewegingen van het vliegtuig). Al vliegend wordt de hoogte gemeten in een baan onder het vliegtuig. Door een vliegpatroon in raaien komen de banen langs elkaar te liggen en wordt een gebiedsdekkende opname verkregen.

Voorwaarden voor een geslaagde LiDAR hoogtemeting van wadplaten zijn:

- Het ontbreken van water boven de plaat, dus meten tijdens laagwater;
- Goede weersomstandigheden: geen laaghangende bewolking, regen of harde wind.

LiDAR wordt sinds het einde van jaren '90 door Rijkswaterstaat standaard ingezet voor hoogtemetingen van de droogvallende delen van de Zoute Rijkswateren (Waddenzee, Oosterschelde en Westerschelde, strand en duinen). De NAM laat in het kader van de monitoring van de gaswinning onder de Waddenzee de hoogte van de droogvallende platen in de komberging van het Pinkegat en het Friesche Zeegat met LiDAR meten.

De primaire metingen van de hoogte van de droogvallende platen en het sublitoraal zijn de raaimetingen die in het voorgaande hoofdstuk zijn besproken. Deze raaimetingen hebben een hoge mate van betrouwbaarheid en zijn in de tijd goed te koppelen aan andere metingen. Dat laatste betekent dat de samenhang in het meetprogramma goed kan worden geborgd met de raaimetingen. Op basis van de raaimetingen zal worden vastgesteld hoe hoog de wadbodem van jaar op jaar is. Het meten van de wadbodemhoogte met raaimetingen is niet gevoelig voor de aanwezigheid van een laagje water op de platen. De LiDAR hoogtemetingen leveren aanvullende informatie met betrekking tot de ruimtelijk ontwikkeling in het droogvallende gebied.

De bodemdaling door de zoutwinning vindt geleidelijk plaats. Deze bodemdaling manifesteert zich in de diepe (Pleistocene) ondergrond. Op de wadbodem wordt deze bodemdaling vereffend over een groot gebied en overprint door de autonome erosie en sedimentatie (onder andere door de verplaatsing en de vorming van geultjes). De verwachting is dan ook dat de hoogte van de wadbodem niet meetbaar of merkbaar zal veranderen door de bodemdaling. De raaimetingen zijn zo ingericht, dat kan worden gesignaleerd of eventuele dalingen van de wadbodem groter zijn, in die delen van het gebied waar ook de daling van de vaste ondergrond groter is. Bij signalering hiervan moet, al naar gelang wat zich precies voordoet, nader worden onderzocht of er ook een causale relatie met de zoutwinning bestaat. De LiDAR metingen dienen als een aanvulling, waarmee het ruimtelijk beeld van de veranderingen in de bodemhoogte wordt vastgelegd.

De LiDAR metingen zijn niet bedoeld als signaleringsmeting en worden daarom niet jaarlijks uitgevoerd, zoals de raaimetingen. De LiDAR hoogtemetingen zullen iedere drie jaar worden uitgevoerd, gebiedsdekkend voor de Ballastplaat. Het gebied voor de LiDAR opnamen is ruimer dan het gebied met de Pleistocene bodemdaling. Het opnamegebied sluit aan bij de raaimetingen, die zijn verlengd tot buiten het gebied met bodemdaling in de vaste (Pleistocene) ondergrond. Op deze wijze wordt zowel een gebied ingemeten waaronder sprake is van bodemdaling, als een gebied waar dat niet het geval is (referentie).

De periode van uitvoering wordt gekoppeld aan de hoogte/dieptemetingen met raaien (mei). Het exacte moment van de opname wordt bepaald door de vereiste omstandigheden voor de meting (buiten het stormseizoen, voldoende laagwater, droog, geen mist).

In 2016 is volgens de planning van Rijkswaterstaat de vakloding uitgevoerd in het kombergingsgebied van het Vlie, waarbij de plaathoogte met LiDAR is opgemeten. Hetzelfde is in 2010 gebeurd. De resultaten van deze LiDAR metingen zijn ingezet voor de monitoring van Frisia. In 2019 is de plaathoogte in het studiegebied met LiDAR opgemeten in opdracht van Frisia. Deze meting is uitgevoerd door Kavel10.

7.2 Gemeten hoogte wadplaten LiDAR

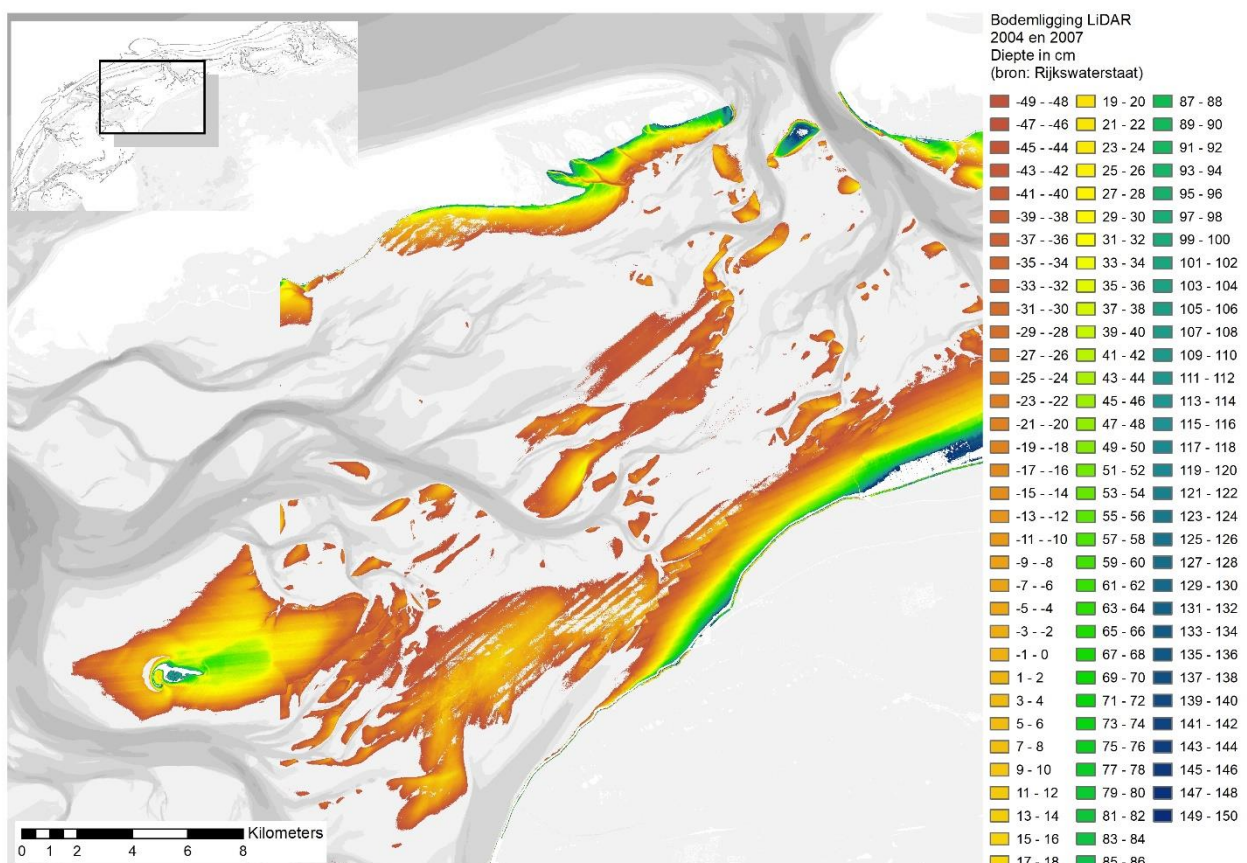
In 2004 & 2007, 2010 en 2016 is voor Rijkswaterstaat en in 2019 is voor Frisia de plaathoogte in het kombergingsgebied Vlie ingewonnen met LiDAR (zie Figuur 0-1, Figuur 0-2, Figuur 0-3 en Figuur 0-5). De kaart met de hoogte van de platen in 2004 & 2007 laat rond op de Grienderwaard strepen zien die waarschijnlijk overeenkomen met de overlap tussen naastgelegen vluchtbanen. Deze 'banen' horen niet

zichtbaar te zijn in de metingen van de plaathoogte en wijzen erop dat deze eerste set hoogtegegevens op basis van LiDAR-metingen nog niet van voldoende kwaliteit is voor gebruik in een kwantitatieve analyse. De 2004 & 2007 opname is dan ook niet verder geanalyseerd.

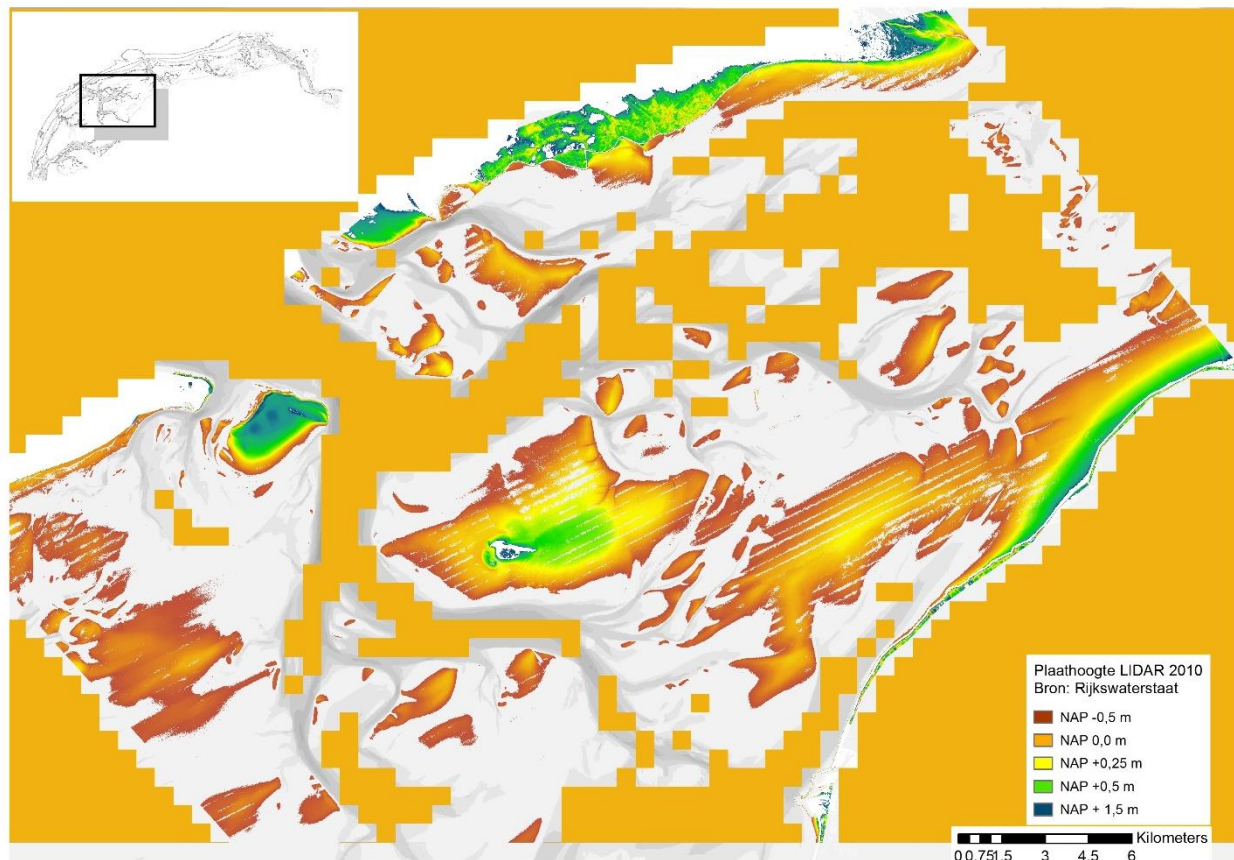
In de kaart met de LiDAR-gegevens van 2010 in Figuur 0-2 is een groot deel van het kombergingsgebied, het vaste land en de Noordzee oranje gekleurd, omdat deze gebieden de waarde 0 hebben gekregen. Voor de analyse worden deze gebieden buiten beschouwing gelaten, hiervoor wordt alleen naar de droogvallende plaatgebieden gekeken, die worden gekenmerkt door een verlopende kleurschaal.

In vergelijking met de 2010 LiDAR meting is in de opname van 2016 beduidend minder oppervlakte aan droogvallende plaat zichtbaar. Zo ontbreekt in de opname van 2016 bijvoorbeeld het gebied tussen de Ballastplaat en de Vlakte van Oosterbierum. Het is niet zo dat dit gebied in 2016 geen droogvallende plaat meer is, zoals blijkt uit de volledige dekkende vaklodingen van 2016 (volgende hoofdstuk en de kaart in Figuur 1-1). Dat een kleiner gebied beschikbaar is in de LiDAR van 2016 heeft waarschijnlijk te maken met de gehanteerde kwaliteitscriteria voor de gegevens. LiDAR metingen van de plaathoogte hebben dezelfde nauwkeurigheid als de raaimetingen, maar zijn wel gevoelig voor aanwezigheid van een laagje water op de platen. De aanwezigheid van een dun laagje water verandert niet alleen de gemeten hoogte, omdat het wateroppervlak wordt opgemeten in plaats van de wadbodem, maar resulteert ook in minder gemeten punten, doordat de laserbundel niet voldoende wordt verstrooid door het wateroppervlak. Het hanteren van strenge criteria voor het aantal gemeten punten betekent dat met name van de laag liggende delen van de droogvallende platen, waar het water minder tijd heeft om af te stromen, een groot deel afvalt.

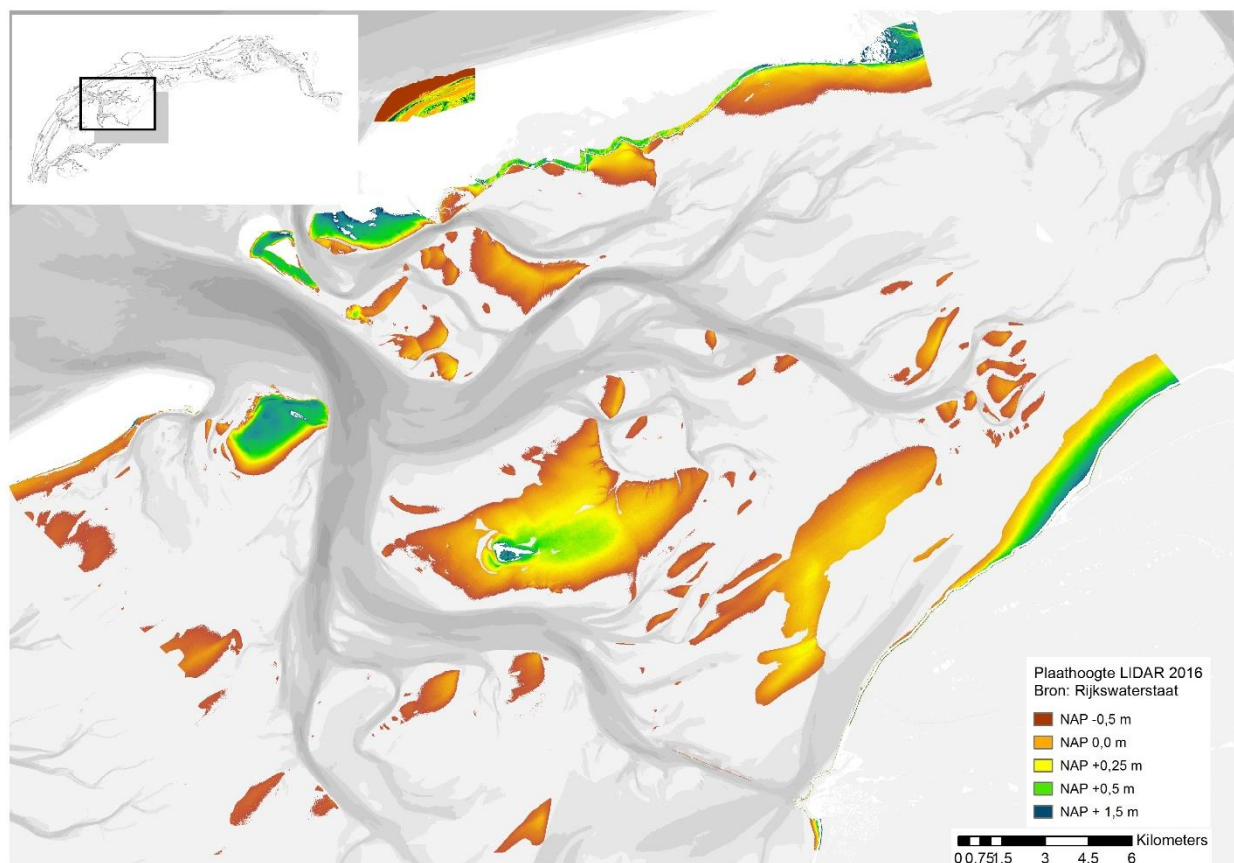
De LiDAR metingen zijn ingewonnen voor het invloedsgebied van de bodemdaling en omvatten daarmee niet het gehele kombergingsgebied. De 2019 LiDAR opnamen omvatten een groter gebied van droogvallende platen dan de opnames van 2016.



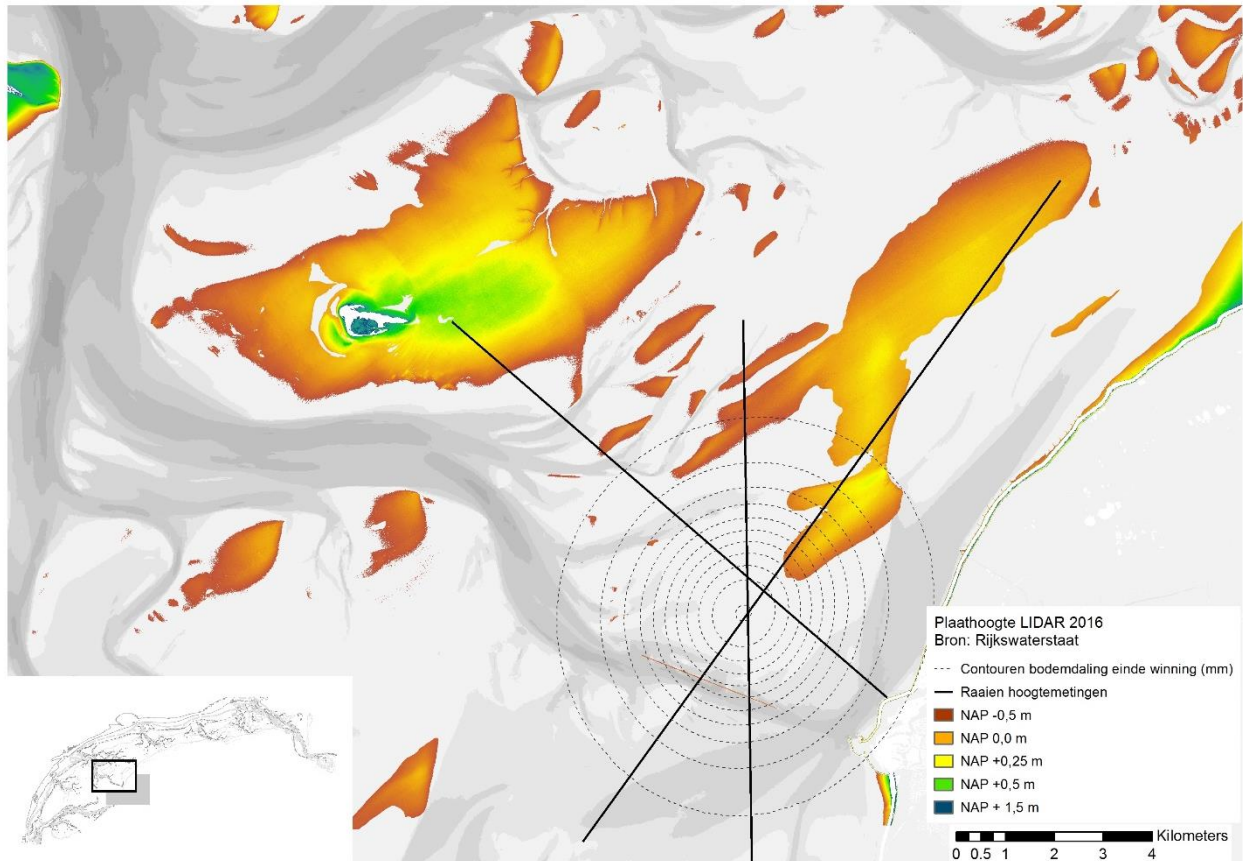
Figuur 0-1 Overzichtskartaal van het kombergingsgebied van het Vlie met de gecombineerde LiDAR opname van 2004 en 2007.



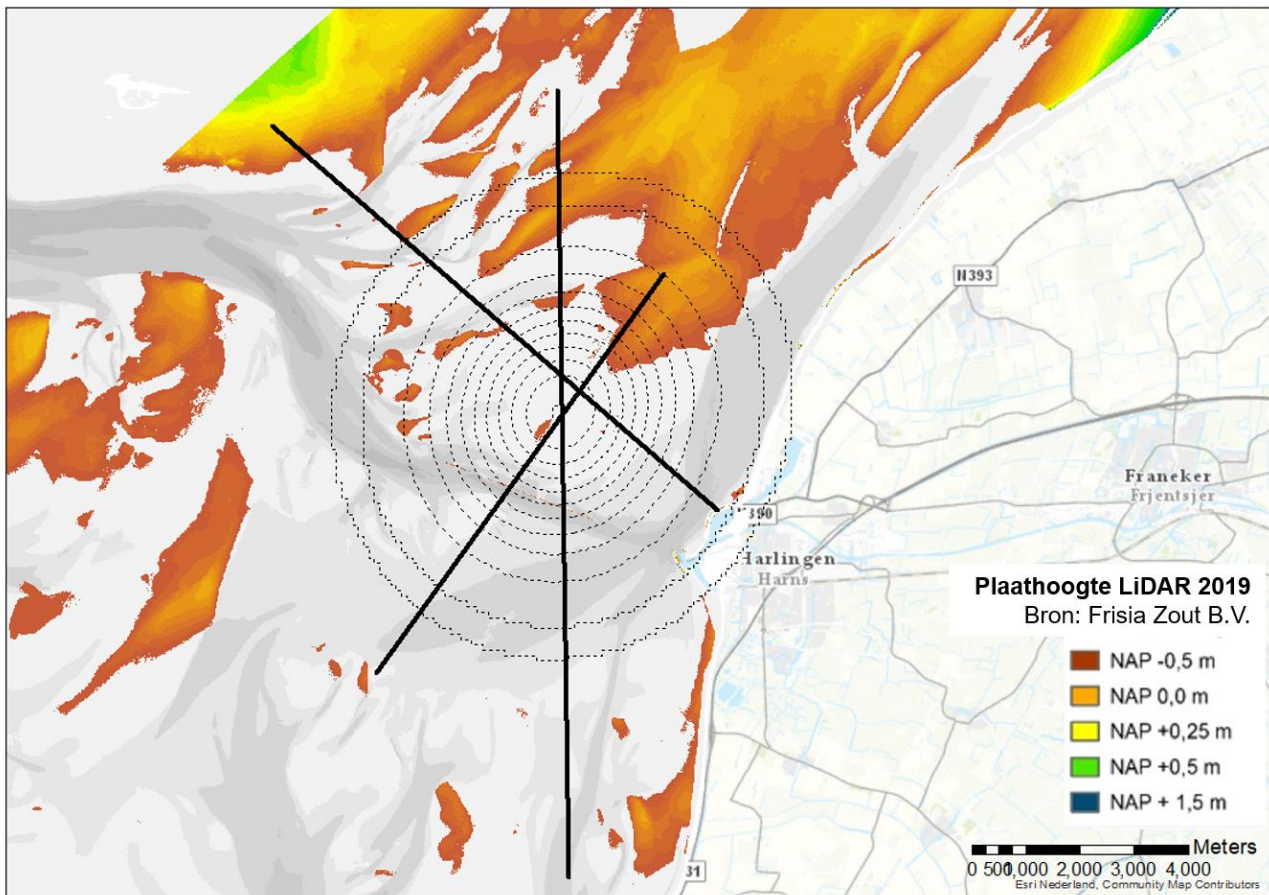
Figuur 0-2 Overzichtskartaal van het kombergingsgebied van het Vlie, met de LiDAR opname van 2010.



Figuur 0-3 Overzichtskartaal van het kombergingsgebied van het Vlie, met de LiDAR opname van 2016.



Figuur 0-4 Detailkaart van het gebied waar bodemdaling door zoutwinning kan optreden, met de LiDAR opname van 2016.



Figuur 0-5 Detailkaart van het gebied waar bodemdaling door zoutwinning kan optreden, met de LiDAR opname van 2019.

7.3 Verschil hoogte/diepte raaimetingen en LiDAR-data

De hoogte van de droogvallende platen wordt zowel ingemeten met LiDAR, als met de metingen van de hoogte/diepte raaien. Dat geeft de mogelijkheid om de met beide methodes gemeten hoogtes van 2016 en 2019 te vergelijken. Beide metingen worden in dezelfde periode (in de maand mei) in hetzelfde gebied gemeten.

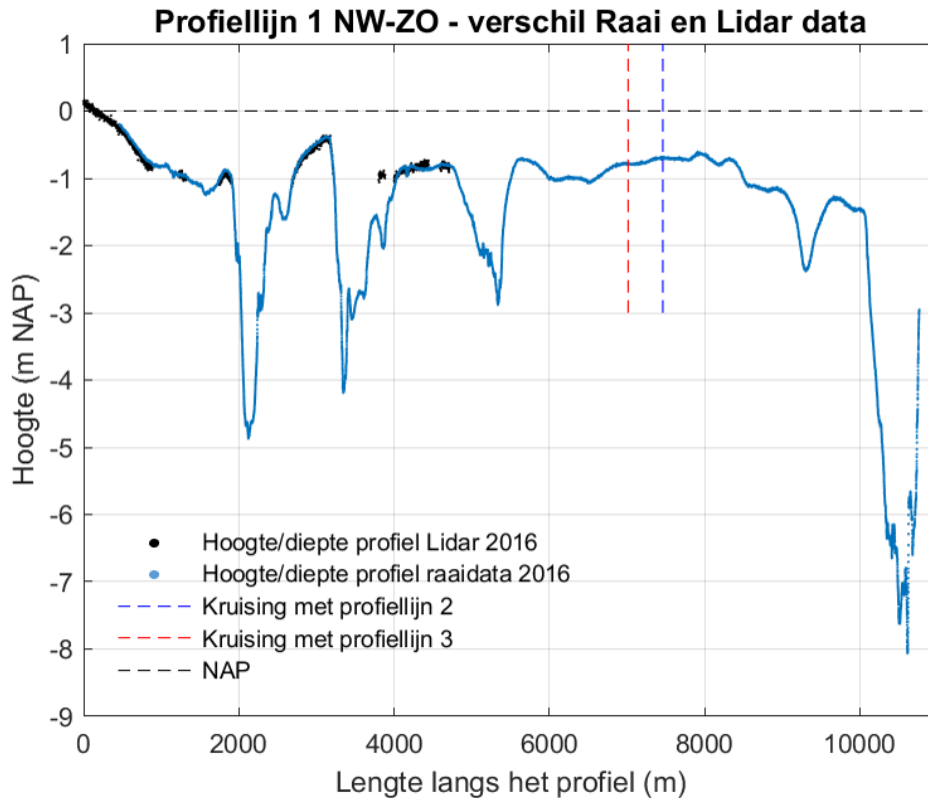
7.3.1 Verschil 2016 raaihoogte en 2016 LiDAR

Om de gemeten hoogte/diepte raaien van 2016 en de LiDAR-data van 2016 met elkaar te vergelijken, is op basis van locatie gekeken waar overlap is tussen beide datasets (Figuur 0-4). Als er geen LiDAR-data beschikbaar is voor de locatie van de hoogte/diepte raaimeting wordt dit ook niet weergegeven. Deze uitwerking is gedaan voor alle drie de profiellijnen in vergelijking met de LiDAR-data van 2016 en weergegeven in Figuur 0-6, Figuur 0-9 en Figuur 0-12.

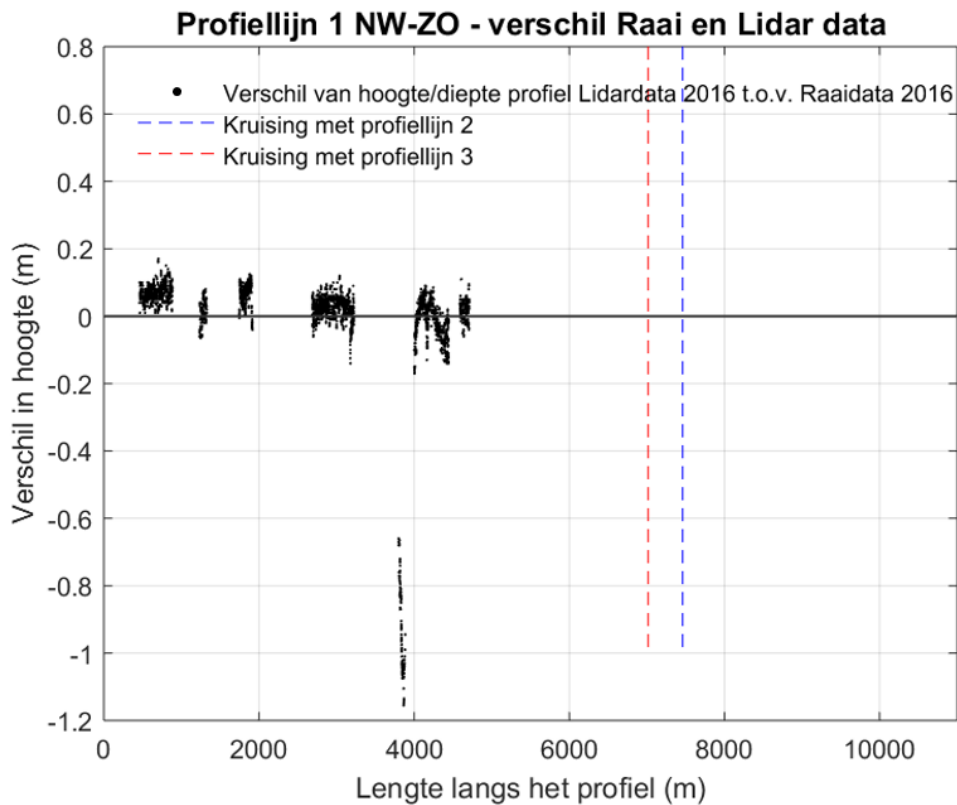
Figuur 0-7, Figuur 0-10 en Figuur 0-13 laten de verschilplots zien per gemeten profiellijn, waarin de verschillen in hoogte tussen de hoogte/diepte raai metingen en de LiDAR-data tegen elkaar is uitgezet. Vanwege het beperkte areaal droogvallende platen in het studiegebied en de beperkte dekking van de droogvallende platen door de LiDAR-hoogtemeting van 2016, is er relatief weinig overlap tussen de LiDAR meting en raaimetingen.

Figuur 0-8, Figuur 0-11 en Figuur 0-14 laten delen van de verschilplots zien, waarbij is ingezoomd op de gebieden waar zowel LiDAR-data als hoogte/diepte data is gemeten. Hieruit blijkt dat de wadplaten redelijk in hoogte met elkaar overeenkomen, ondanks het verschil in tijd waarop de data is gemeten. Bij profiellijn 1 in Figuur 0-8 liggen de hoogte verschillen zowel onder als boven de nul. Bij profiellijn 2 in Figuur 0-11 liggen de waarden vrijwel allemaal onder de nul en dat betekent dat de hoogte volgens de LiDAR boven de raaihoogte ligt. Bij profiellijn 3 (Figuur 0-14) daarentegen liggen de verschilwaarden voornamelijk boven de

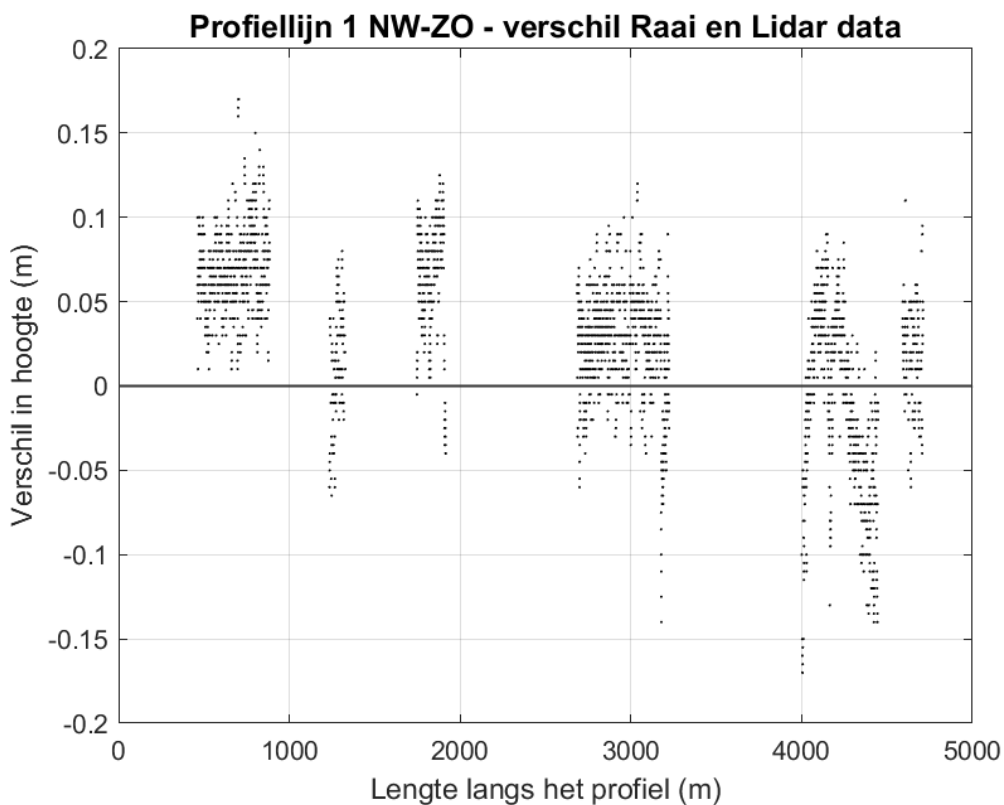
nul en dat betekent dat de hoogte volgens de LiDAR-dat onder die van de hoogte/diepteraai ligt. Deze verschuivingen komen overeen met de verschillen in hoogte op de controlepunten van de hoogte/diepteraaien (paragraaf 3). De verschillen in de hoogte tussen de LiDAR en de hoogte/diepteraaien zijn groter dan op grond van de controlepunten in de raaimetingen wordt verondersteld. De verschillen zijn ook groter dan de verschillen tussen de raaimetingen 2016 en 2017. Het is niet duidelijk waar deze verschillen zijn ontstaan. Omdat zowel sprake is van een hogere, als van een lagere ligging in de LiDAR hoogtemetingen ten opzichte van de raaimeting, zijn de verschillen niet toe te schrijven aan een structureel verschil tussen de meetmethoden.



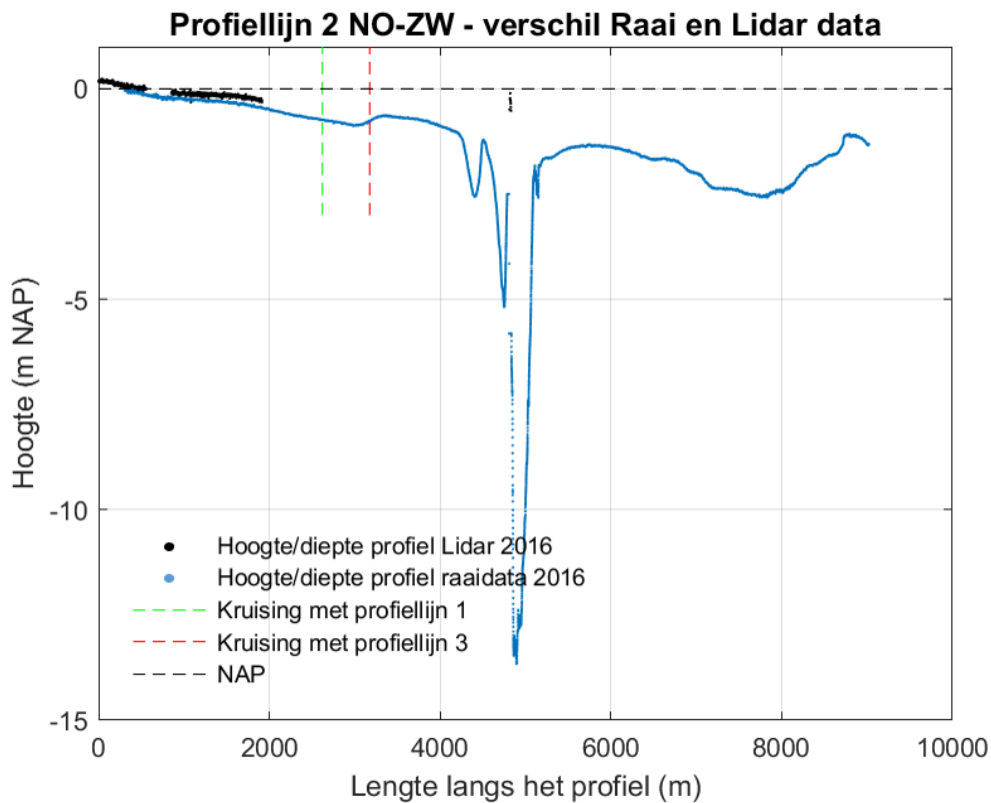
Figuur 0-6 Profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016.



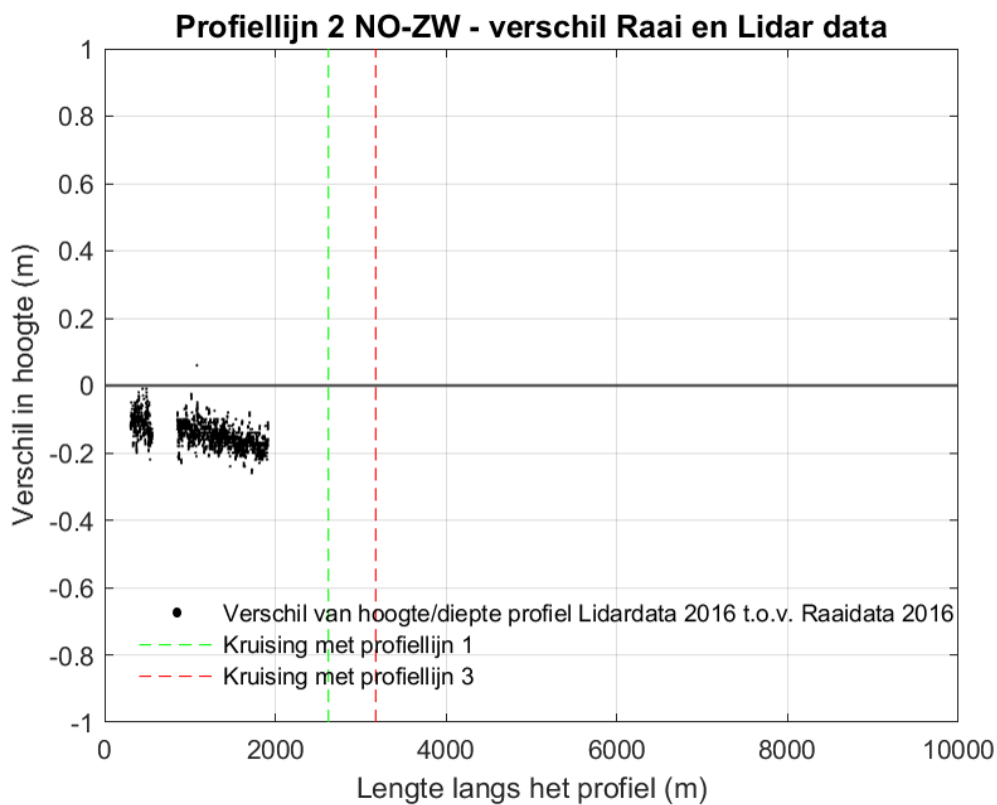
Figuur 0-7 Verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



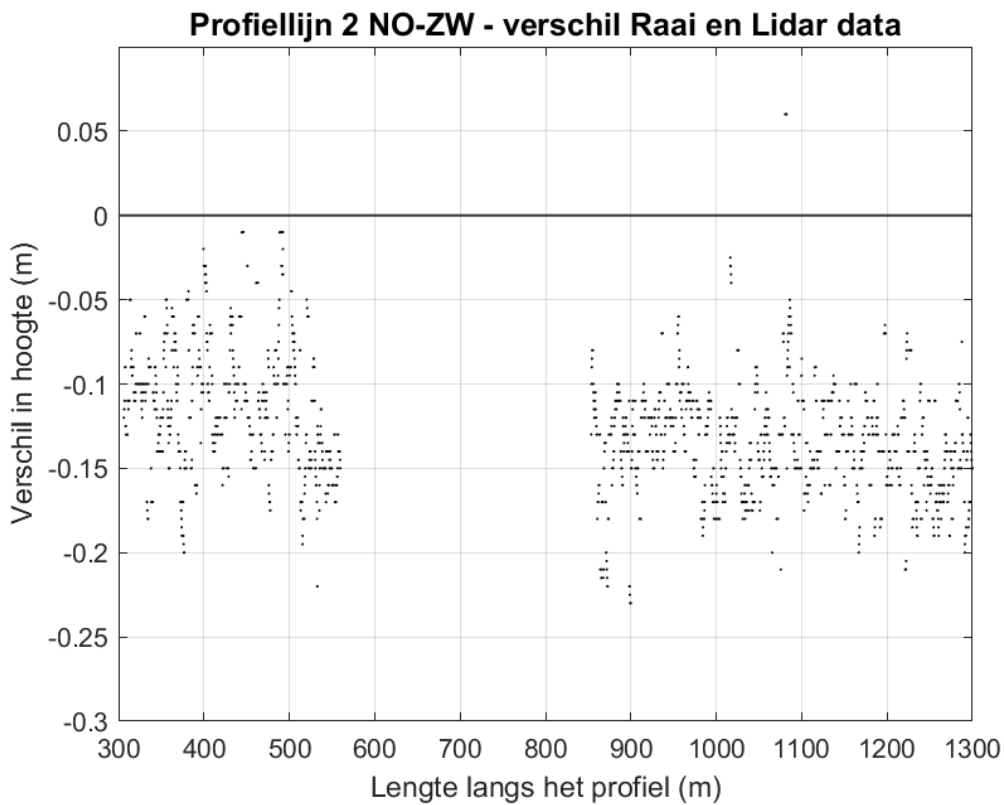
Figuur 0-8 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



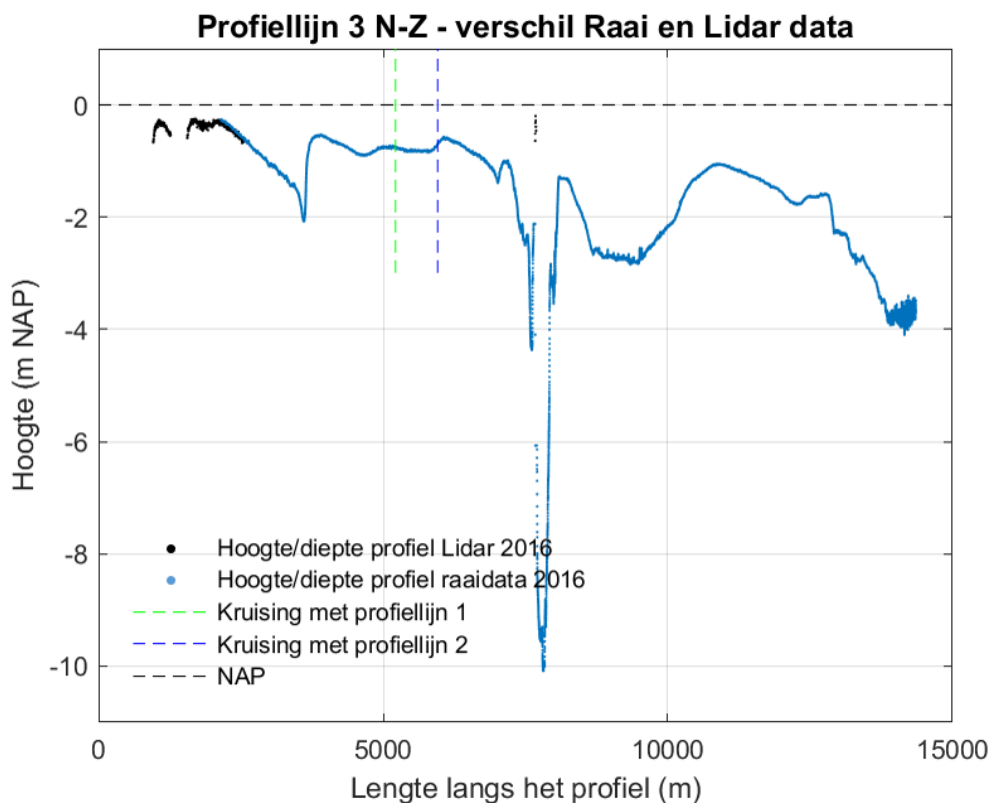
Figuur 0-9 Profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016.



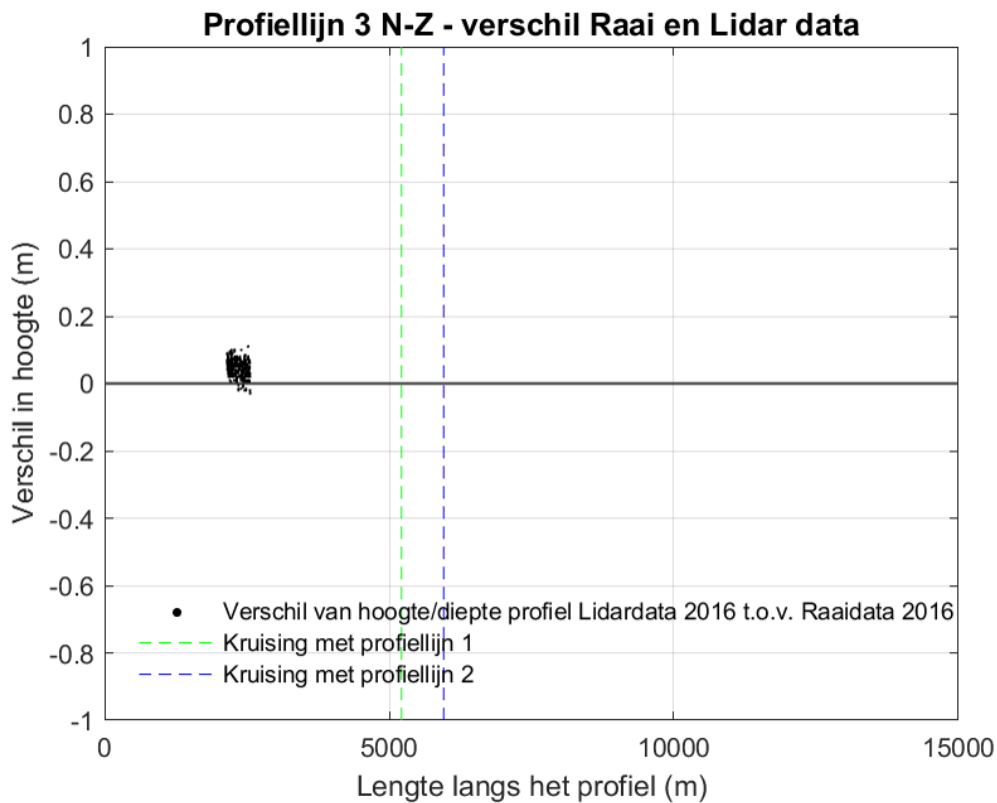
Figuur 0-10 Verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



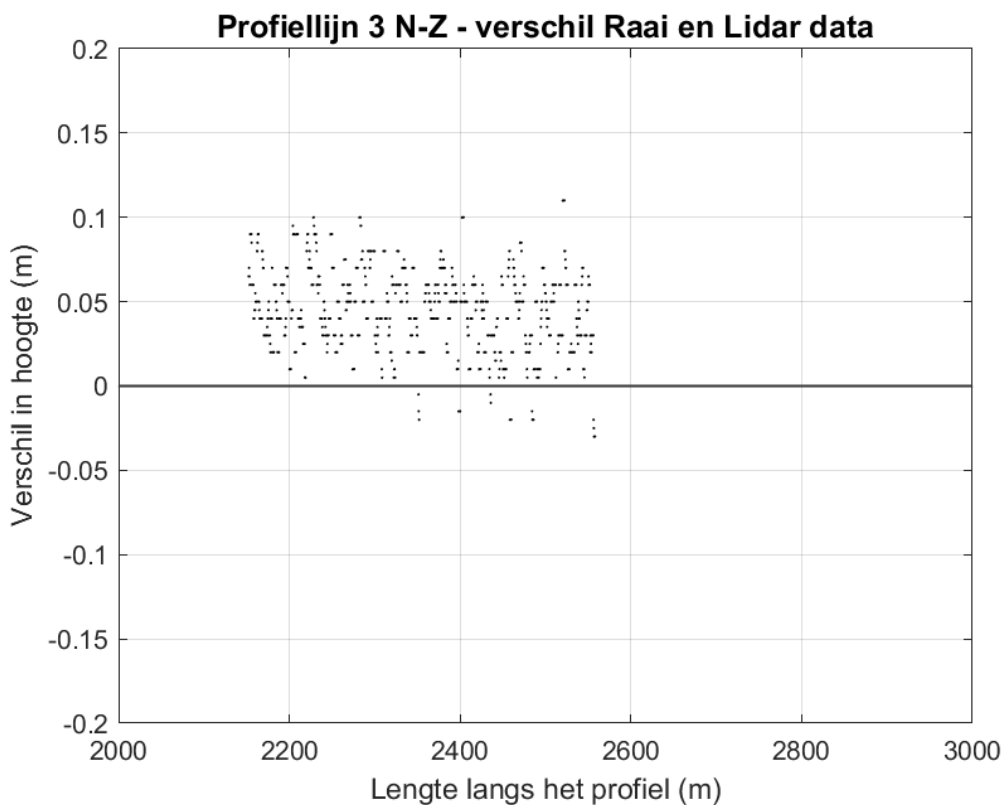
Figuur 0-11 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



Figuur 0-12 Profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016.



Figuur 0-13 Verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



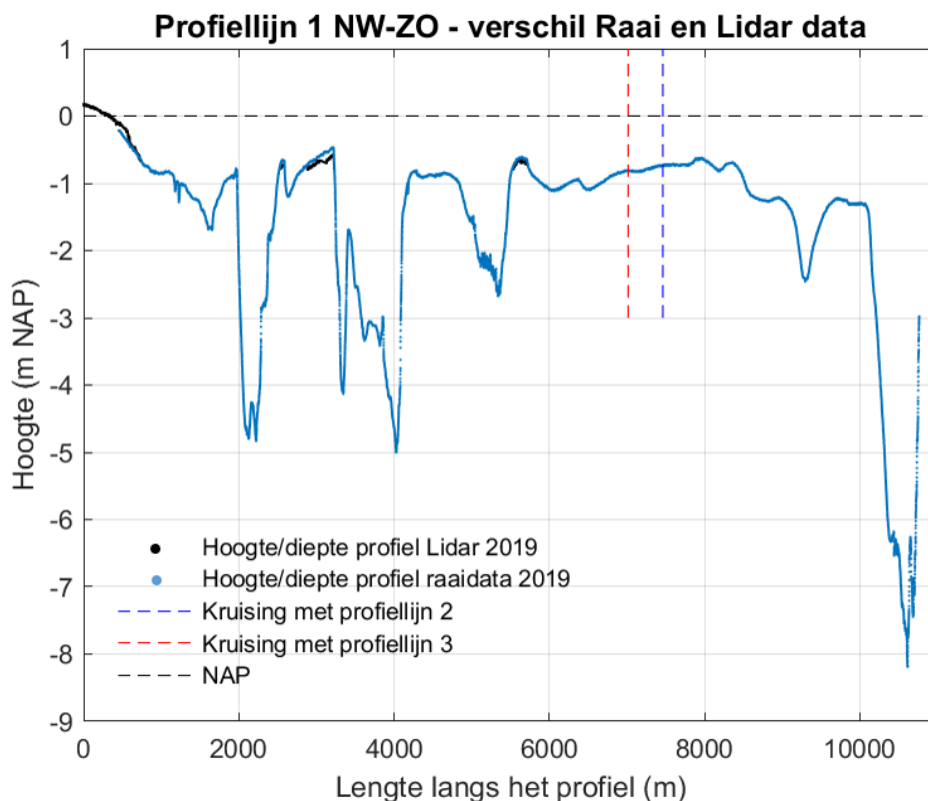
Figuur 0-14 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2016 en de LiDAR-data van 2016. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.

7.3.2 Verschil 2019 raaihoogte en 2019 LiDAR

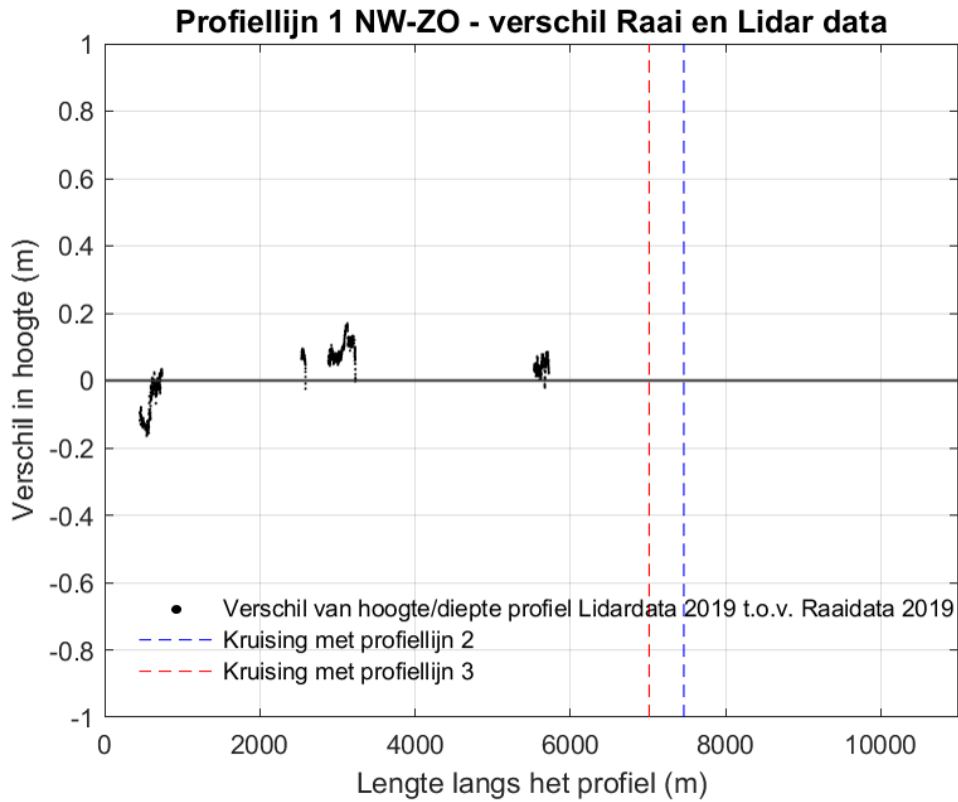
Om de morfologische verandering tussen de gemeten hoogte/diepte raaien van 2019 en de LiDAR-data van 2019 met elkaar te vergelijken, is er op basis van locatie gekeken op welke locatie er overlap is tussen beide datasets (Figuur 0-5). Als er geen LiDAR-data beschikbaar is voor de locatie van de hoogte/diepte raaimeting wordt dit ook niet weergegeven. Deze uitwerking is gedaan voor alle drie de profiellijnen en weergegeven in Figuur 0-15, Figuur 0-18 en Figuur 0-21.

Figuur 0-16, Figuur 0-19 en Figuur 0-22 laten de verschilplots zien per gemeten profiellijn, waarin de verschillen in hoogte tussen de hoogte/diepte raai metingen en de LiDAR-data tegen elkaar is uitgezet. Vanwege het beperkte areaal droogvallende platen in het studiegebied en de beperkte dekking van de droogvallende platen door de LiDAR-hoogtemeting van 2019, is er relatief weinig overlap tussen de LiDAR-data en de raaimetingen. Figuur 0-17, Figuur 0-20 en Figuur 0-23 laten delen van de verschilplots zien, waarbij is ingezoomd op de gebieden waar zowel LiDAR-data als hoogte/diepte data is gemeten.

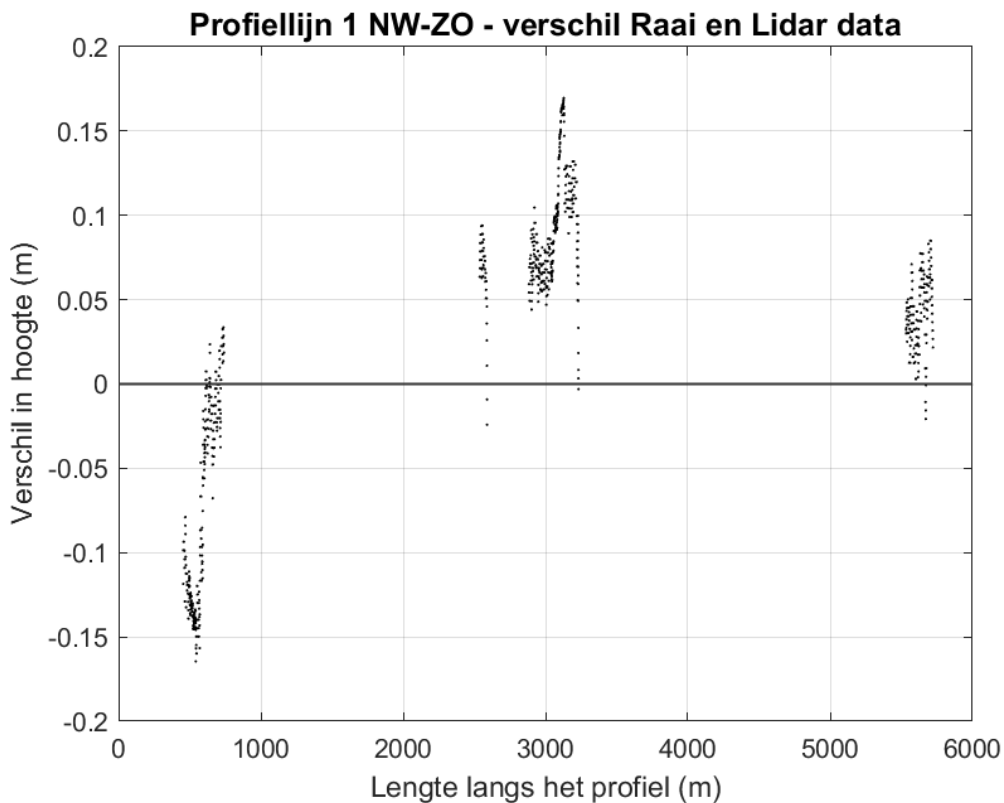
Bij profiellijn 1 in Figuur 0-17 liggen de hoogteverschillen zowel onder als boven de nul, met een onderling verschil tot anderhalve decimeter. Bij profiellijn 2 in Figuur 0-20 zijn de verschillen vrijwel groter dan nul, met waarden tot tweeëneenhalve decimeter. Het verschil wijst op een structurele afwijking van de LiDAR metingen is ten opzichte van de hoogte/diepte raaimetingen. De dwarsdoorsnede op basis van de LiDAR hoogtemetingen in profiellijn 2 (Figuur 0-18) vertoont eenzelfde verloop van het hoogte profiel.



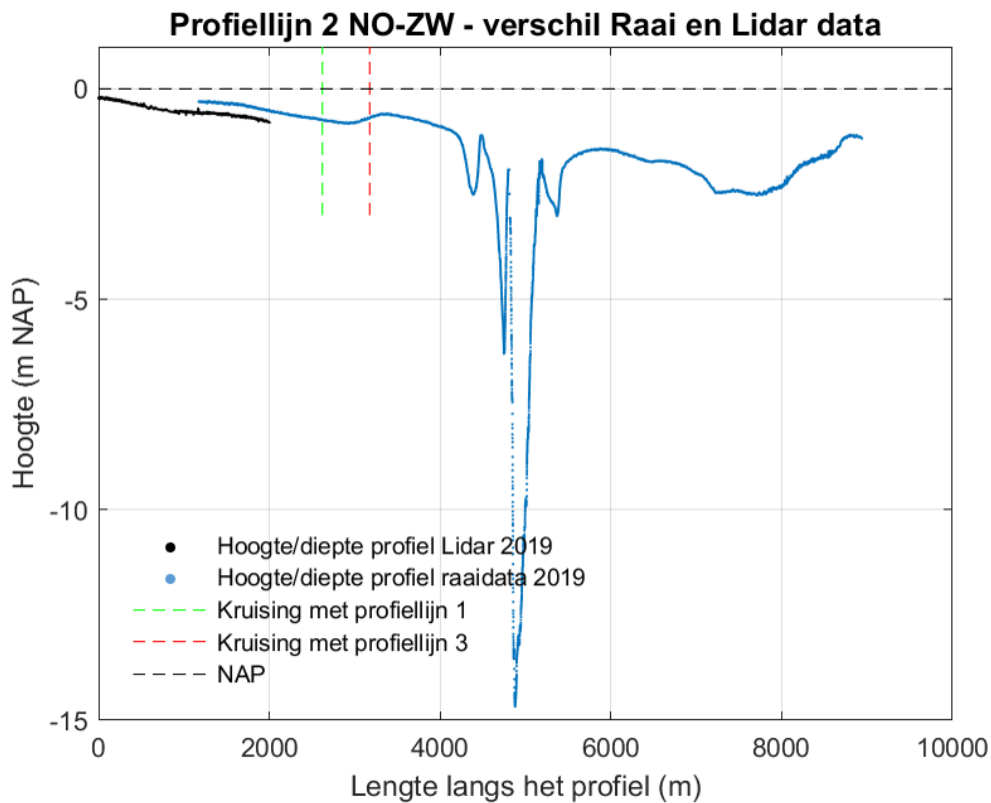
Figuur 0-15 Profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019.



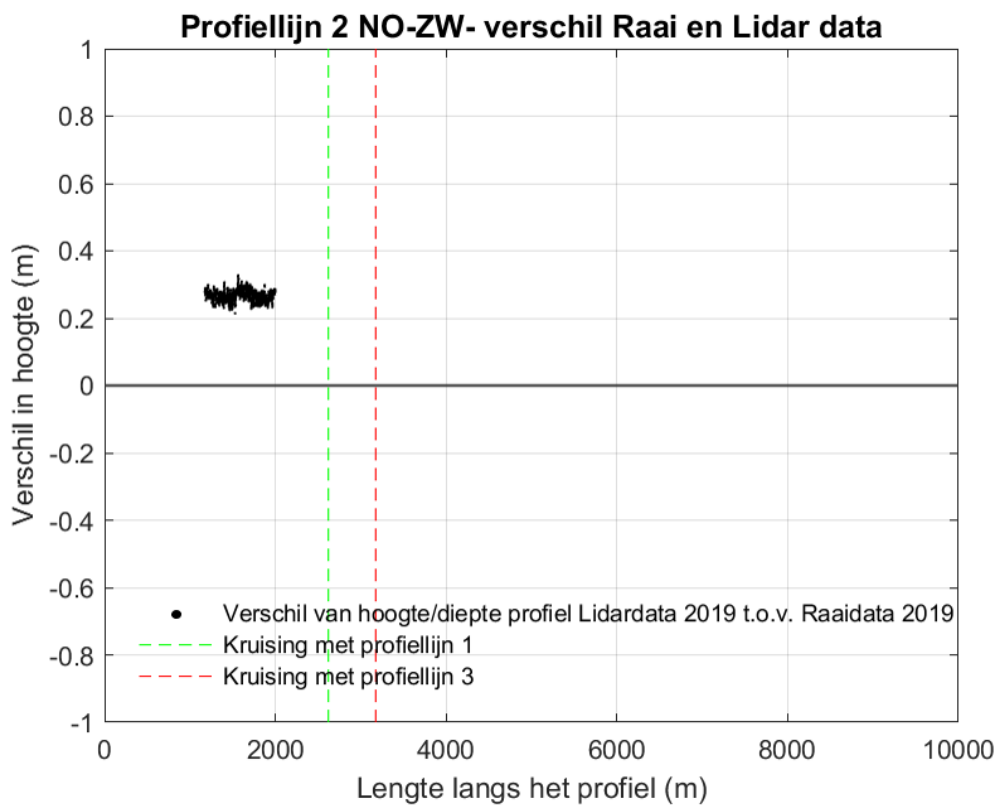
Figuur 0-16 Verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



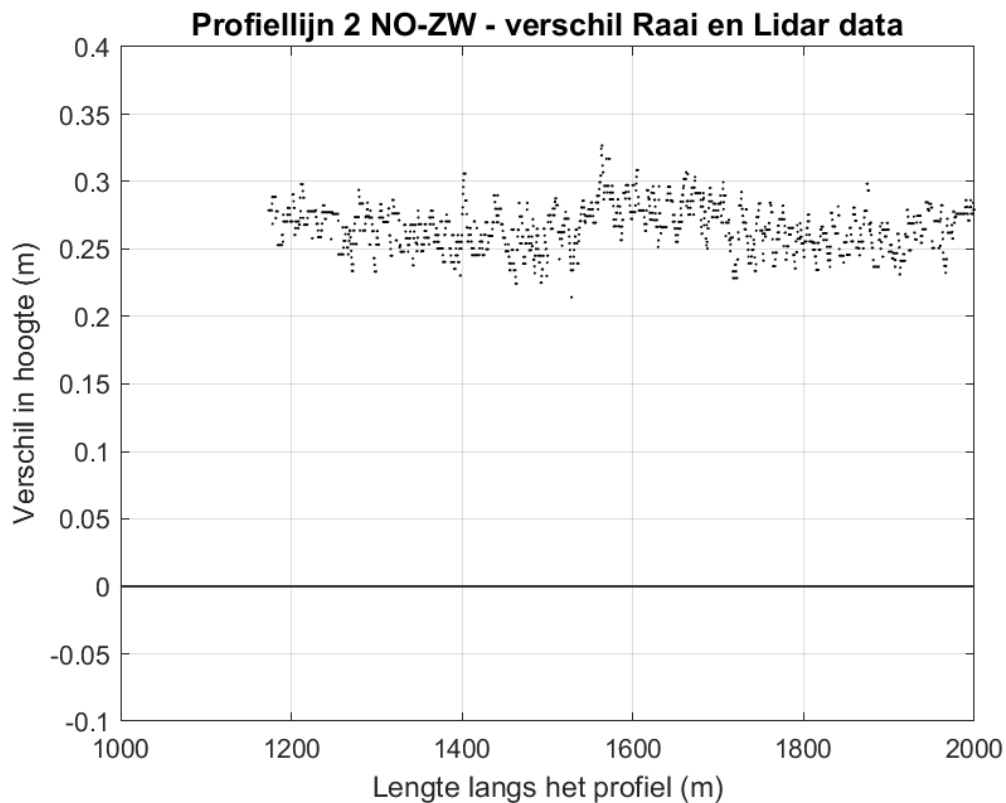
Figuur 0-17 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 1 van noordwest naar zuidoost voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



Figuur 0-18 Profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019.



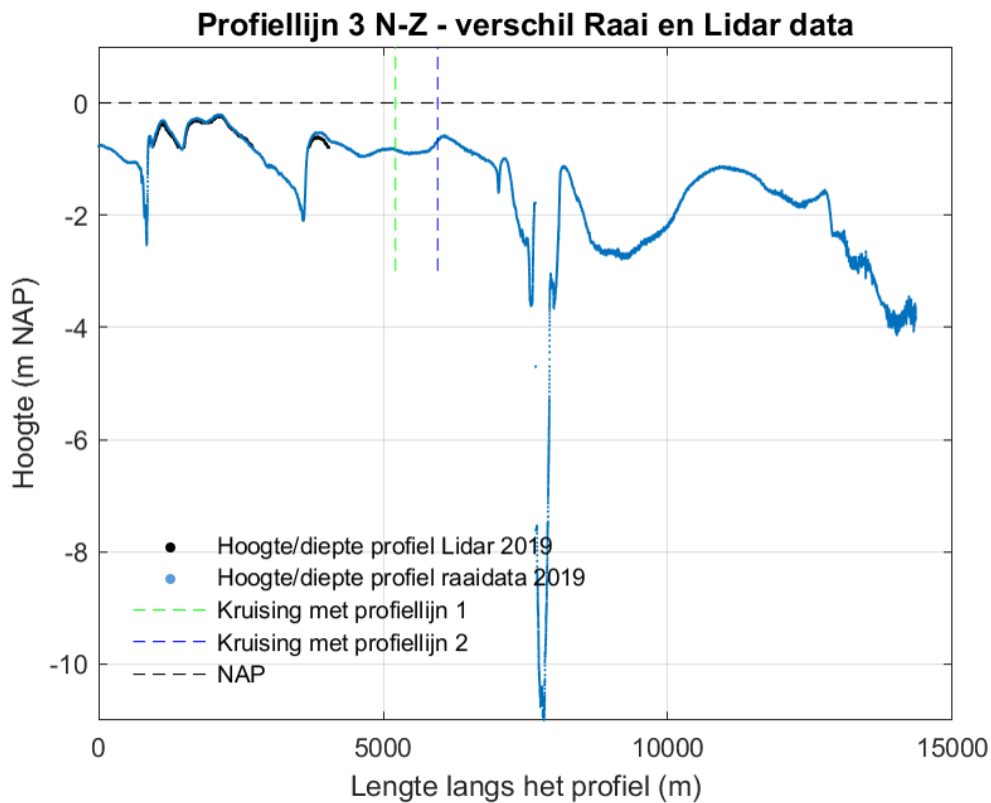
Figuur 0-19 Verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



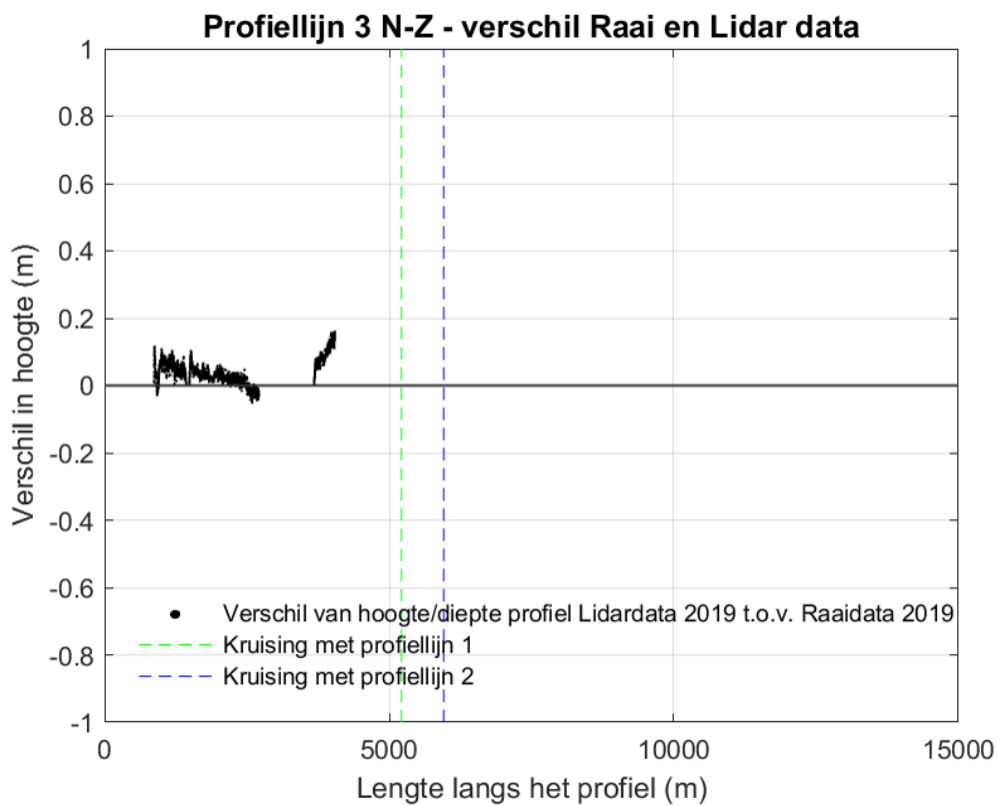
Figuur 0-20 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 2 van noordoost naar zuidwest voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.

In de dwarsdoorsnede van profiellijn 3 zijn in Figuur 0-23 zijn de verschillen van de LiDAR-dataset ten opzichte van de hoogte/diepte raaimetingen relatief klein in vergelijking met de andere twee raaien. Inzoomend op dit specifieke deel van dwarsprofiel 3 (zie Figuur 0-24) laat zien dat de hoogte/diepte raaimetingen en de LiDAR-data grotendeels met elkaar overeenkomen, maar tussen 3500 en 4100 meter wijkt de LiDAR-data van de hoogte/diepte raaimetingen af.

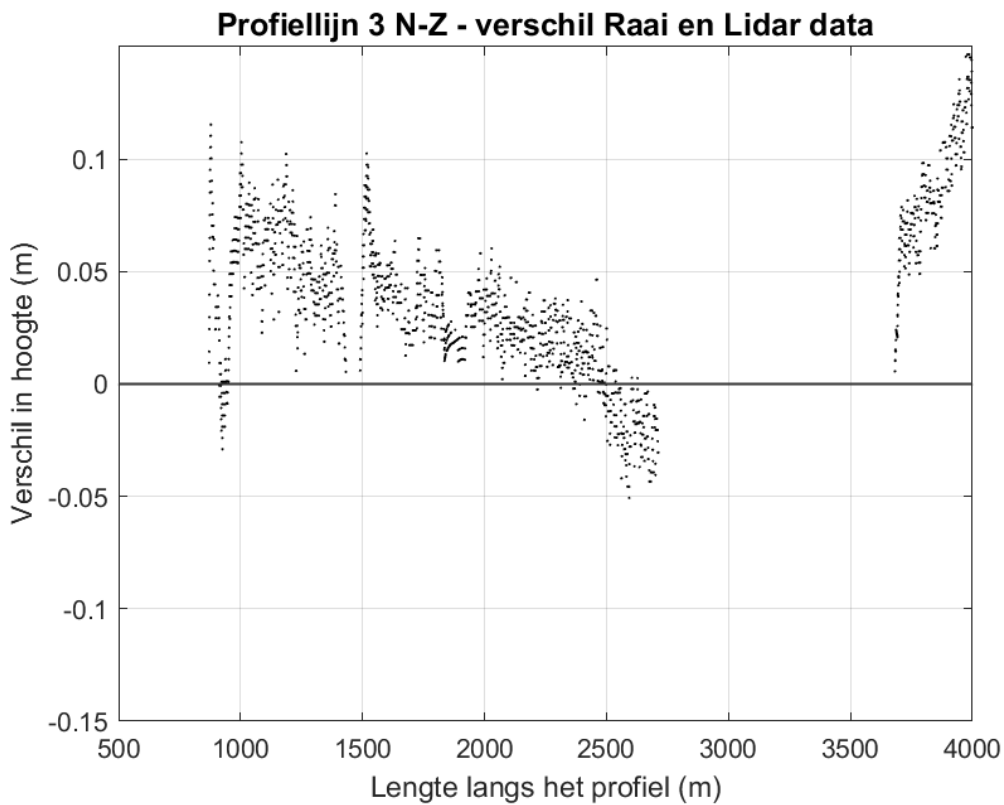
Het is niet duidelijk waarom deze verschillen in de gemeten hoogte tussen de LiDAR-hoogtemetingen en de raaimetingen in 2019 zijn ontstaan. Omdat zowel sprake is van een hogere, als van een lagere ligging in de LiDAR hoogtemetingen ten opzichte van de raaimeting, zijn de verschillen niet toe te schrijven aan een structureel verschil tussen de meetmethoden. Zo'n structureel verschil zou bijvoorbeeld ontstaan als bij de LiDAR-metingen consequent ook het laagje water op de platen wordt ingemeten.



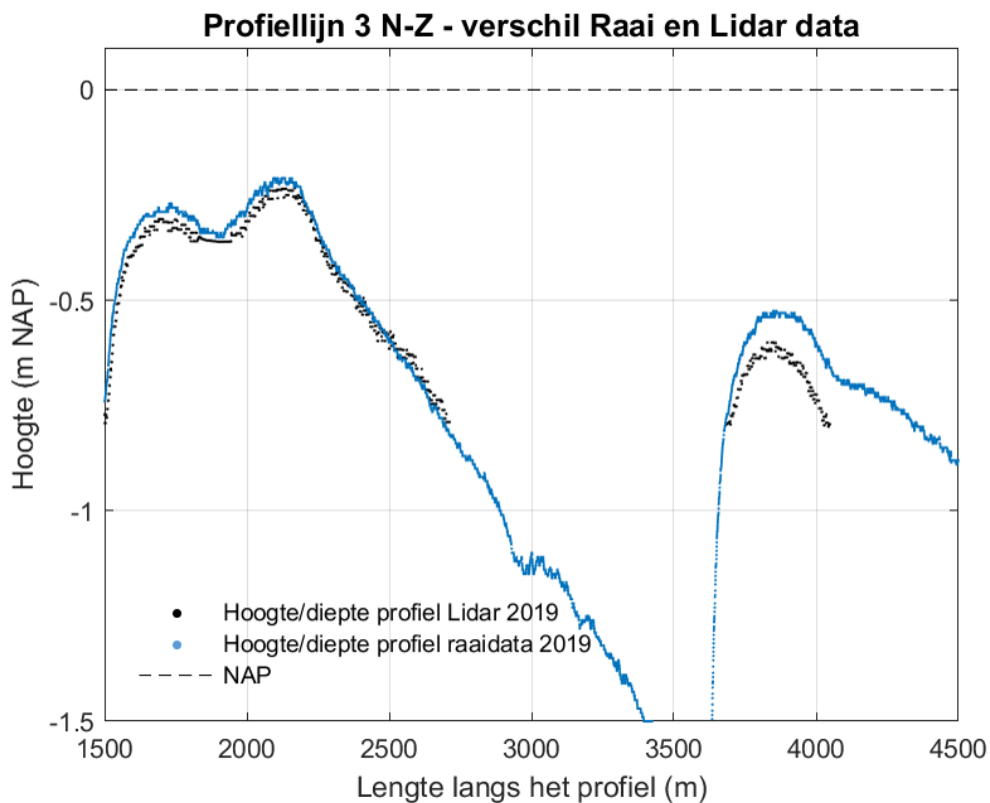
Figuur 0-21 Profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019.



Figuur 0-22 Verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



Figuur 0-23 Ingezoomde verschilplot langs profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019. Een positieve waarde betekent dat de LiDAR lager ligt dan de hoogte/diepteraai.



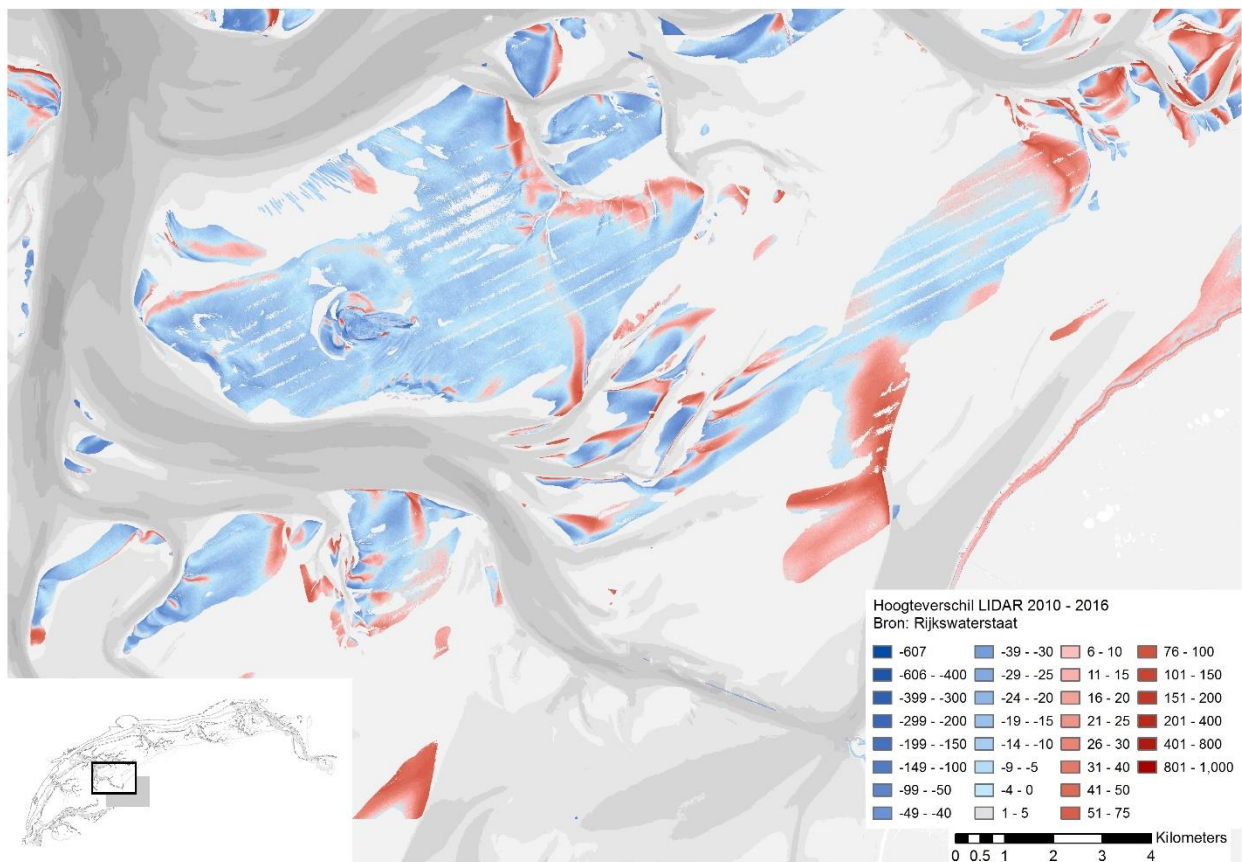
Figuur 0-24 Ingezoomd deel van profiellijn 3 van noord naar zuid voor de hoogte/diepte raai meetgegevens van 2019 en de LiDAR-data van 2019. Meetopnames hebben een significant verschil tussen de LiDAR-data en de raai meetgegevens uit hetzelfde jaar.

7.4 Hoogteverschil wadplaten

Om de LiDAR-datasets uit de verschillende jaren met elkaar te vergelijken zijn verschilkaarten gemaakt, waarin zichtbaar is of de gemeten hoogte hoger of lager is dan in de voorgaande opname. De gemeten verschillen in hoogte kunnen het gevolg zijn van daadwerkelijk opgetreden veranderingen in de morfologie, maar kunnen ook het resultaat zijn fouten in de metingen.

7.4.1 2010 - 2016

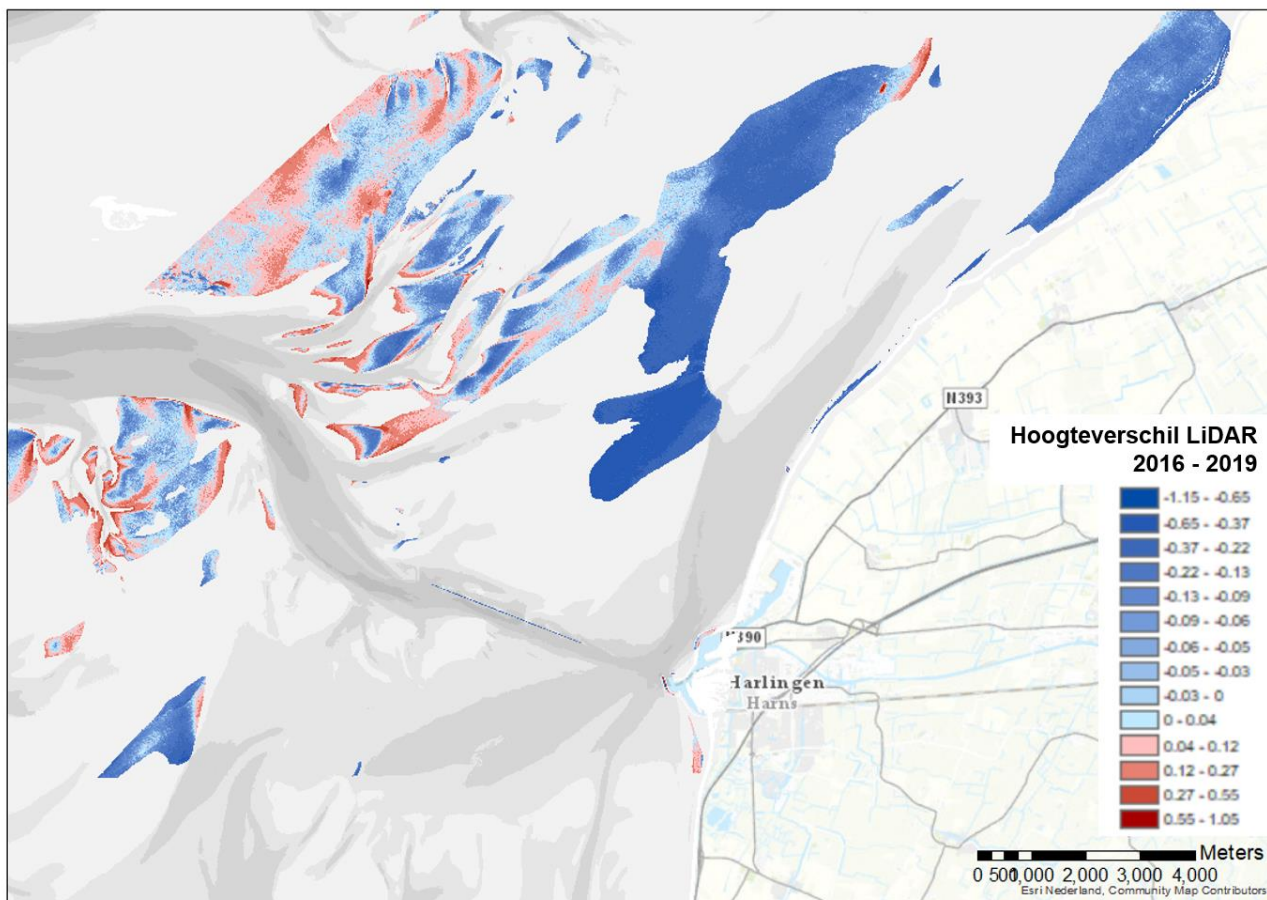
Figuur 0-25 laat het hoogteverschil zien tussen de LiDAR opnames van 2010 en 2016. In een groot deel van het studiegebied liggen de platen lager, met uitzondering van een aantal plaatranden. Aan de zuidwestzijde en aan de noordoostzijde van de Ballastplaat is sprake van gebieden waar de plaat hoger ligt in 2016.



Figuur 0-25 Kaart met de hoogteverschillen in centimeters tussen de LiDAR hoogtemetingen van 2010 en 2016. De blauwe gebieden liggen lager in 2016 en de rode gebieden hoger.

7.4.2 2016 – 2019

Figuur 0-26 laat het hoogteverschil zien tussen de LiDAR opnames van 2016 en 2019. In een groot deel van het studiegebied lijken de platen lager te liggen, met uitzondering van een aantal plaatranden en de Grienderwaard die in het algemeen hoger zijn geworden. Met name de Ballastplaat lijkt in de LiDAR-opnames van 2019 in zijn geheel lager te liggen. Hier staat steeds 'lijkt', omdat het op basis van de vergelijking van de LiDAR hoogtemetingen met de raaimetingen duidelijk is dat de gemeten hoogte met de LiDAR afwijkt van de werkelijke hoogte van de droogvallende platen. De weergegeven verschillen zijn daarom hoogstwaarschijnlijk geen indicatie van morfologische veranderingen.



Figuur 0-26 Kaart met de hoogteverschillen in meters tussen de LiDAR hoogtemetingen van 2016 en 2019. De blauwe gebieden liggen lager in 2019 en de rode gebieden hoger.

7.5 Observaties 2016 en 2019 LiDAR-hoogte metingen van de droogvallende platen

De resultaten van de LiDAR hoogtemetingen van de droogvallende platen in de opeenvolgende opnames behoorlijk veel verschillen zien. Die verschillen betreffen zowel de omvang van het areaal waarvan de gegevens zijn ingewonnen, als de hoogte en vorm van de droogvallende platen. Het verschil in het waargenomen areaal is een gevolg van de vereisten die aan de metingen worden gesteld, zoals is uitgelegd in paragraaf 2.2. Omdat een belangrijk deel van het plaatareaal in het invloedsgebied laag ligt, dat wil zeggen in het onderste deel van het intergetijdgebied, is de duur van de laagwaterperiode bij plaatareaal beperkt. Dat betekent dat het water, in vergelijking met hogere wadplaten, weinig tijd heeft om af te stromen via geultjes, of in wadbodem weg te zakken. Daarmee wordt de kans vergroot dat de laserstraal van de LiDAR, in plaats van het sedimentoppervlak het wateroppervlak raakt. Dat betekent niet alleen dat daarmee een andere hoogte wordt ingemeten dan bedoeld, maar ook dat veel minder metingen worden uitgevoerd. Dat laatste heeft te maken met de wijze waarop de meting wordt uitgevoerd: het door de bodem verstrooide licht wordt gemeten. Een wateroppervlak reflecteert meer dan het verstrooid, waardoor minder wordt gemeten.

De vergelijking van de LiDAR hoogtemetingen met de raaimetingen voor de opnames van 2016 en 2019 maakt duidelijk dat de verschillen relatief groot zijn, in vergelijking met de verschillen tussen de opeenvolgende raaimetingen. Omdat sprake is van negatieve en positieve afwijkingen wordt vastgesteld dat het geen structurele afwijking is in LiDAR hoogtemetingen. Het is niet duidelijk wat de verschillen in de gemeten hoogte tussen de opeenvolgende LiDAR hoogtemetingen en met de raaimetingen veroorzaakt.

Het vertrouwen in de uitkomsten van de LiDAR hoogtemetingen is minder groot dan dat in de raaimetingen. Daarbij komt dat de LiDAR metingen slechts een beperkt deel omvatten van het gebied waar Pleistocene bodemdaling door zoutwinning kan plaatsvinden. Daarmee lenen de LiDAR hoogtemetingen van de droogvallende platen zich veel minder dan de raaimetingen voor het signaleren van de kleine morfologische

veranderingen waar in de autonome situatie sprake van is. In hoofdstuk 6 zal nader worden ingegaan op de beperkingen van de LiDAR hoogtemetingen en mogelijkheden van alternatieve meetmethoden.

BIJLAGE B VAKLODINGEN

7.1 Introductie van de meetmethode

De dieptemetingen van de geulen worden uitgevoerd met een (singlebeam) echolood dat is gemonteerd op een vaartuig, dat is uitgevoerd met nauwkeurige plaatsbepaling- en registratieapparatuur. Al varend wordt de diepte onder het schip gemeten. De hoogte van de droogvallende platen wordt ingemeten met LiDAR, zie hiervoor het voorgaande hoofdstuk. De data van de beide metingen wordt gecombineerd tot een gebiedsdekkend grid van 20 m x 20 m.

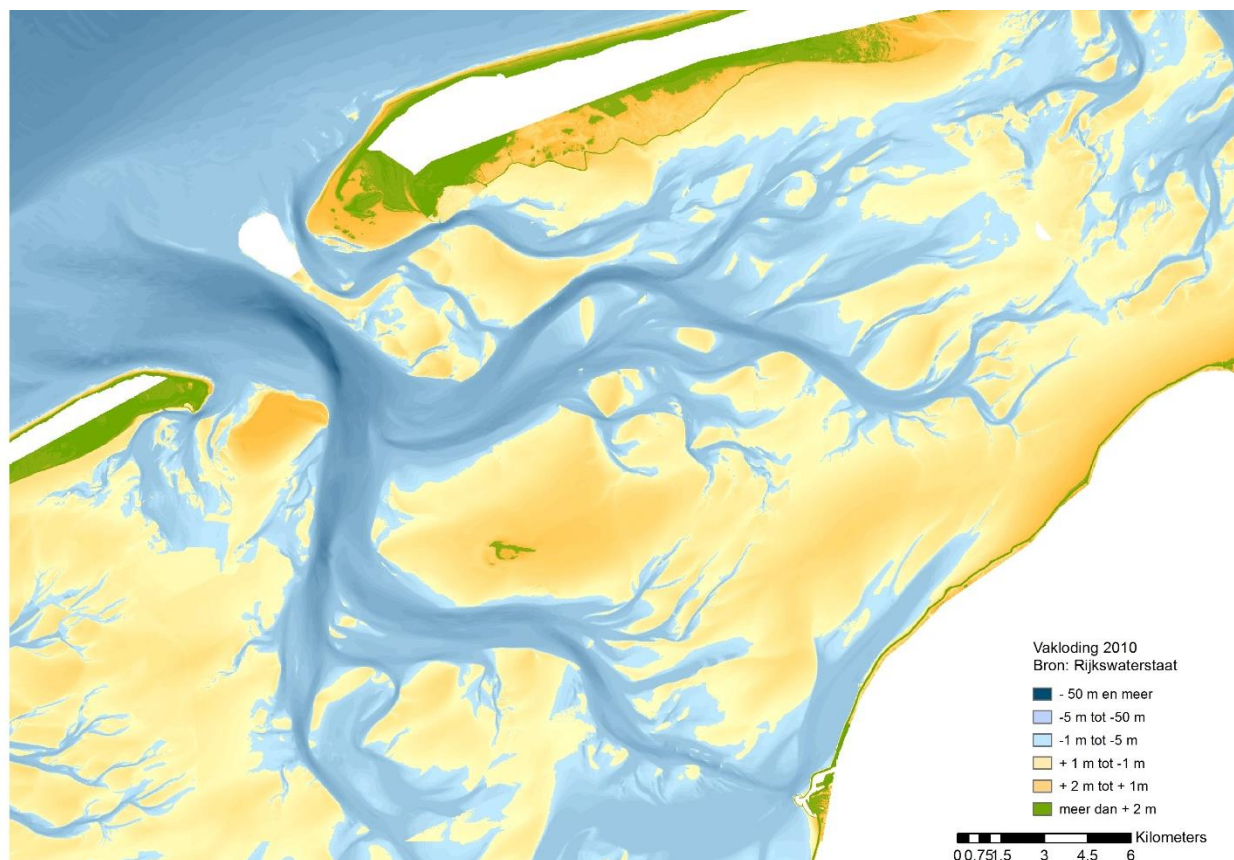
Het doel van deze metingen is om vast te stellen welke veranderingen in de hoogte/diepte optreden in het gehele kombergingsgebied. Doordat de meetraaien doorlopen tot buiten het gebied met bodemdaling worden referentiegebieden ingemeten.

Vaklodingen worden per kombergingsgebied in de Waddenzee 1 keer in de 6 jaar uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat. De vaklodingen maken deel uit van de MWTL (Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands).

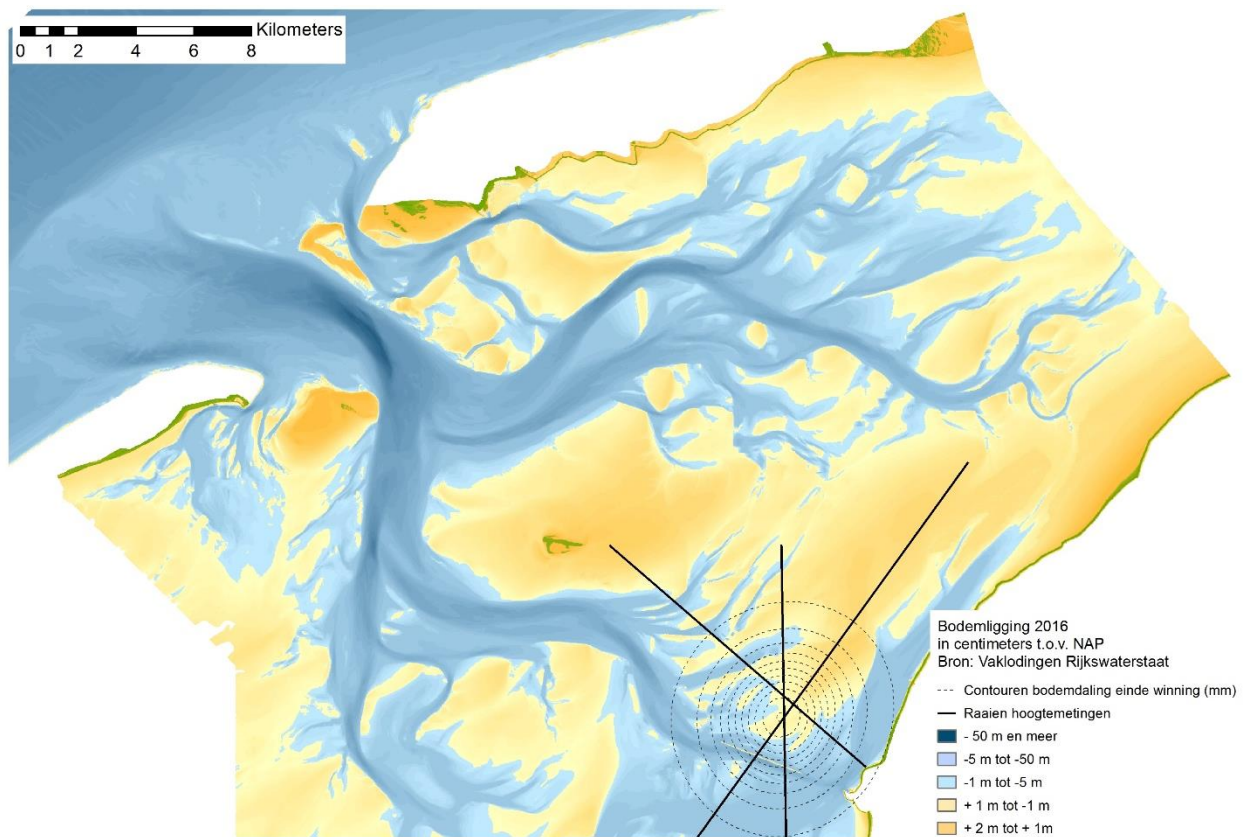
Rijkswaterstaat is de opdrachtgever voor het uitvoeren van deze meting. Frisia vraagt de gegevens op bij Rijkswaterstaat.

7.2 Vaklodingen 2010 en 2016

In 2010 en 2016 zijn door Rijkswaterstaat vaklodingen uitgevoerd van het kombergingsgebied van het Vlie (Figuur 0-1 en Figuur 0-2). De vaklodingen datasets bestaan uit gebiedsdekkende regelmatige grids van 20 m x 20 m. Voor de droogvallende delen wordt de hoogte gemeten met LiDAR, voor de 'natte' delen worden de diepte ingemeten in raaien met een meetschip.



Figuur 0-1 Overzichtsk kaart van de vakloding 2010 van het kombergingsgebied van het Vlie en de aangrenzende kombergingsgebieden.

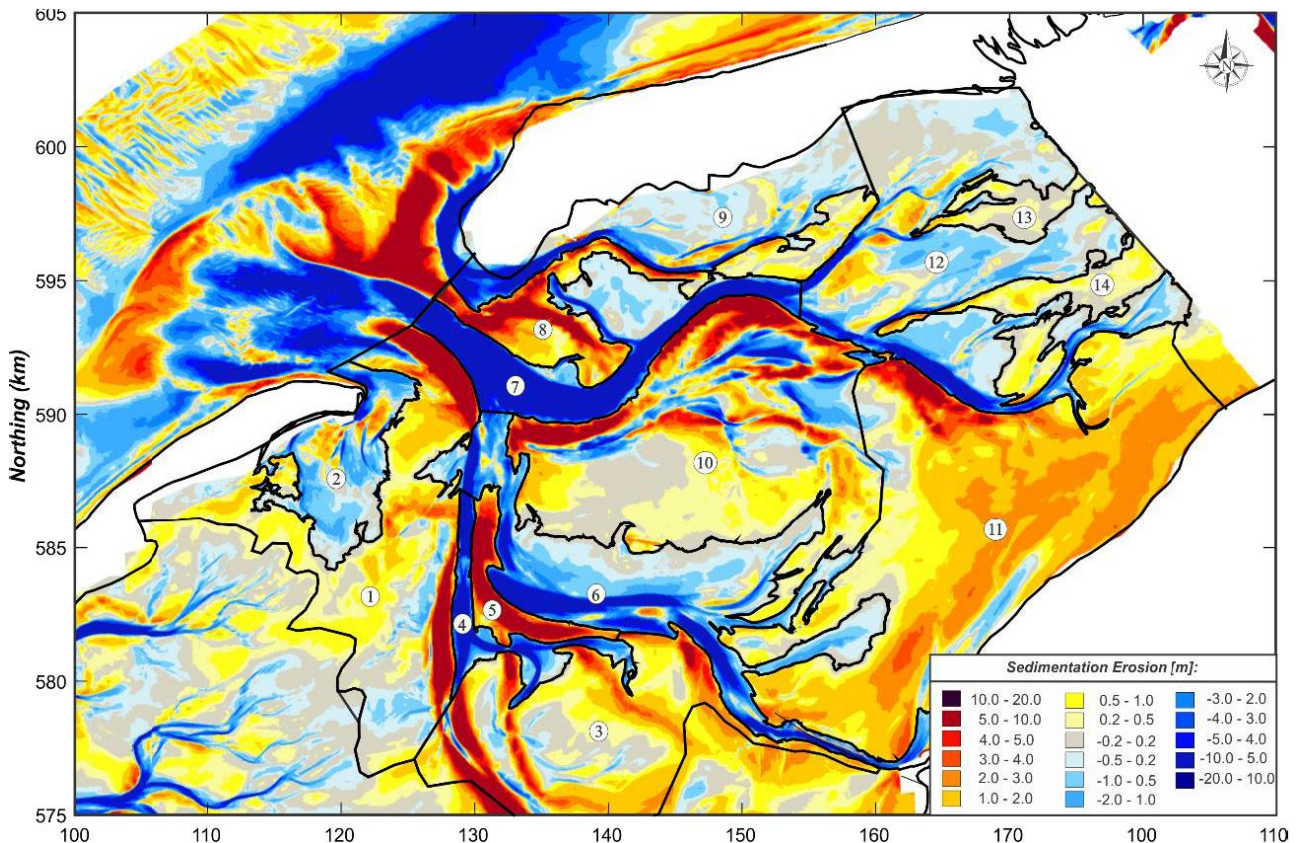


Figuur 0-2 Overzichtskaat van de vaklodging 2016 van het kombergingsgebied van het Vlie.

7.3 Analyse vaklodgingen

In het studiegebied voor de zoutwinning treden een aantal structurele langjarige veranderingen op, die zichtbaar zijn in de opeenvolgende vaklodgingen. Dit is geïllustreerd met de verschilkaarten tussen vaklodging 1933-2015 van Elias (2019) in Figuur 0-3. In de verschilkaart over de lange periode van 1933 tot 2015 is polygoon 11 de Vlake van Oosterbierum, met de Ballastplaat het grootste gebied met sedimentatie in het kombergingsgebied van het Vlie. Ook tegenwoordig vindt hier nog sedimentatie plaats. Verder springen de gevolgen van de verplaatsing en lokale verdieping en verondieping van geulen in het oog. In de verschilkaart manifesteren deze ontwikkelingen van de geulen als rood-blauwe banden, zoals bij 7, 4, 5 en 6 in Figuur 0-3. Deze grote veranderingen domineren het beeld in de verschilkaart, maar leveren voor het overgrote deel geen structurele veranderingen op in het plaat- en het geulareaal, omdat het plaatareaal dat door erosie aan de ene zijde verdwijnt door de sedimentatie aan de andere zijde wordt aangevuld.

Een vergelijking op het oog van de vaklodging 2010 (Figuur 0-1) en 2016 (Figuur 0-2) laat een toename zien van het areaal droogvallende plaat zien bij de Ballastplaat. Andere ontwikkelingen zijn niet duidelijk zichtbaar in deze kaarten en daarom zijn verschilkaarten toegevoegd met daarin het hoogteverschil tussen de hoogte in 2004 en 2010 (Figuur 0-4) en de hoogteverschillen tussen 2010 en 2016 (Figuur 0-5). De hoogteverschillen in de beide kaarten worden hieronder besproken, waarna wordt stilgestaan bij de verschillen en de overeenkomsten tussen de ontwikkelingen in de twee perioden.



Figuur 0-3 Een overzicht van de sedimentatie-erosie patronen (1933-2015) en polygoon indeling in het bekken van het Zeegat van het Vlie (uit Elias, 2019). Polygoon 11 is de Vlakte van Oosterbierum, die ook de Ballastplaat omvat.

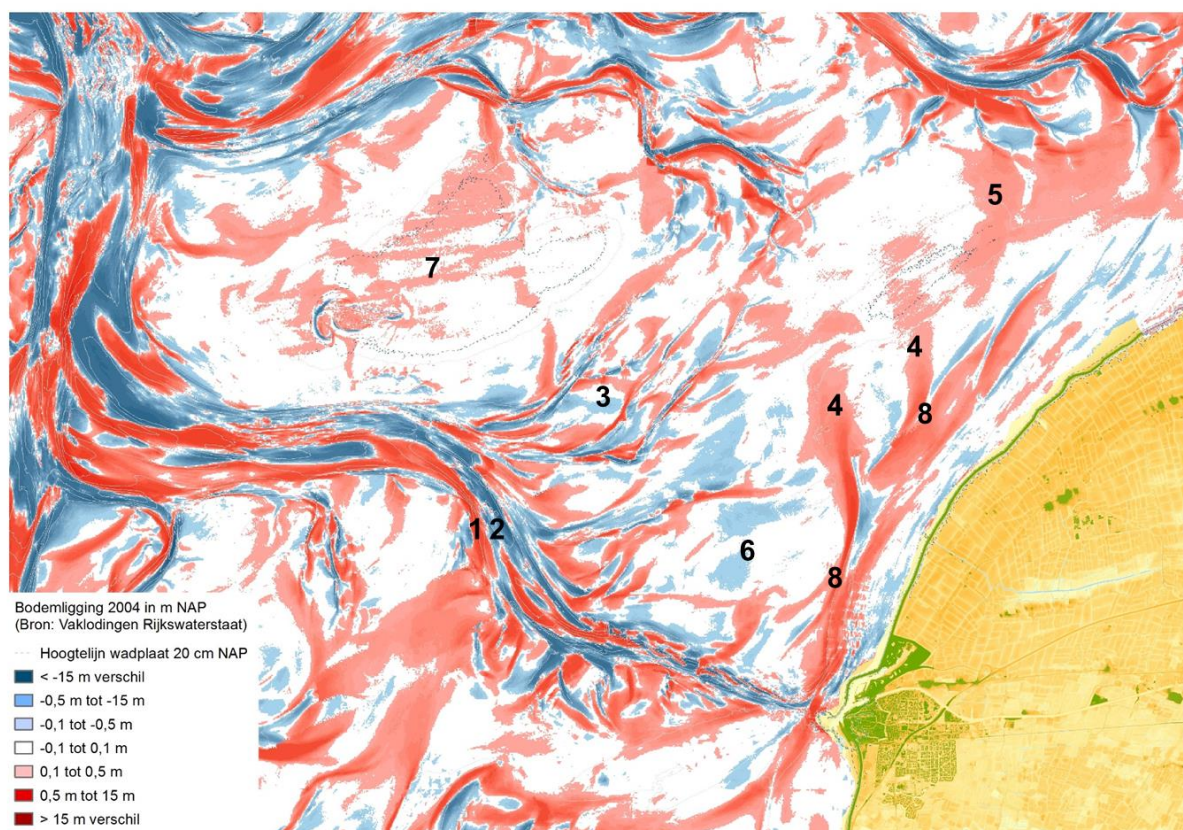
Hoogteverschil 2004-2010

De verschilkaart in Figuur 0-4 geeft het hoogteverschil tussen de bodem van 2004 en die van 2010 weer, waarbij een hoogtetoename (sedimentatie) een rode kleur heeft gekregen en een hoogteafname een blauwe kleur (erosie). In de kaart zijn een aantal ontwikkelingen gemarkeerd, die hieronder worden uitgelegd:

1&2: Dit is een combinatie van flinke sedimentatie (1) en erosie (2), die wordt veroorzaakt doordat een geul verplaatst. In dit geval is het grote geul Blauwe slenk, maar ook de verplaatsing van kleine geulen levert dergelijke paren van erosie en sedimentatie. Deze grote veranderingen domineren het beeld, maar leveren voor het overgrote deel geen structurele veranderingen op in het plaatareaal, omdat het areaal dat door erosie aan de ene zijde verdwijnt door de sedimentatie aan de andere zijde wordt aangevuld.

De overige ontwikkelingen zijn:

3. Verplaatsing, vormverandering en opvulling en vorming geultjes;
4. Sedimentatie op de Ballastplaat, aan de zuidzijde in de nabijheid van het Kimstergat;
5. Sedimentatie aan de oostzijde van Ballastplaat/ Vlakte van Oosterbierum;
6. Erosie aan de westzijde van de Ballastplaat;
7. Sedimentatie op de Grienderwaard;
8. Aangroei van de Ballastplaat door sedimentatie in het Kimstergat.



Figuur 0-4 Kaart met de verschillen in bodemhoogte tussen de vaklodingen 2004 en 2010 (Blauw: de bodem ligt lager; Rood: de bodem ligt hoger).

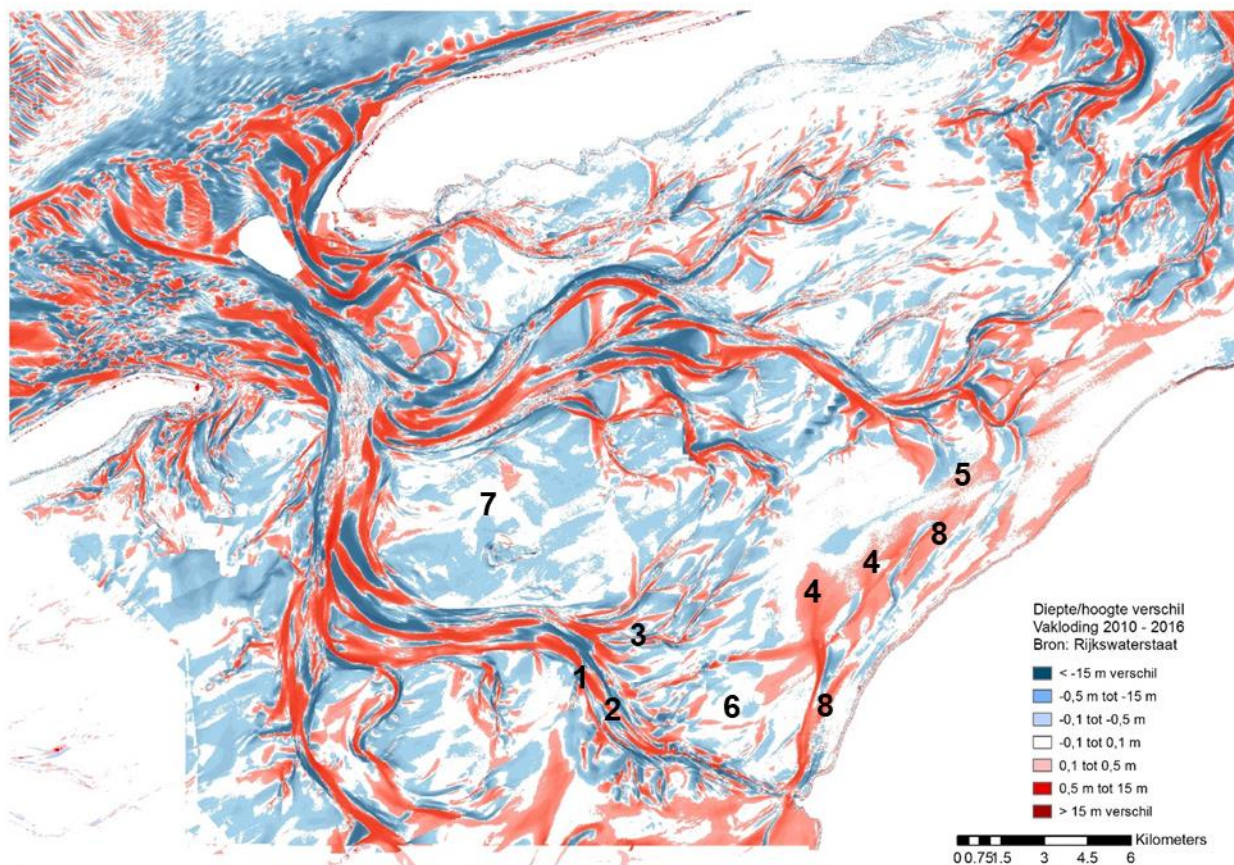
Hoogteverschil 2010-2016

De verschilkaart in Figuur 0-5 geeft het hoogteverschil tussen de bodem van 2010 en 2016 weer. De kaart omvat vrijwel het gehele kombergingsgebied van het Vlie en dat is een groter gebied dan dat is getoond in (Figuur 0-4). In de kaart zijn dezelfde ontwikkelingen gemarkeerd als in de verschilkaart 2004-2010, die hieronder worden uitgelegd:

1&2: De combinatie van flinke sedimentatie (1) en erosie (2), die wordt veroorzaakt doordat een geul verplaatst is in deze kaart op veel plekken zichtbaar, omdat vrijwel alle geulen in het kombergingsgebied op de een of de andere manier verplaatsen. Deze grote veranderingen domineren het kaartbeeld, maar leveren voor het overgrote deel geen structurele veranderingen op in het plaatareaal, omdat het areaal dat door erosie aan de ene zijde verdwijnt door de sedimentatie aan de andere zijde wordt aangevuld.

De overige ontwikkelingen zijn:

3. Verplaatsing, vormverandering en opvulling en vorming geultjes;
4. Sedimentatie op de Ballastplaat, aan de zuidzijde in de nabijheid van het Kimstergat;
5. Sedimentatie aan de oostzijde van Ballastplaat/ Vlake van Oosterbierum;
6. Marginale erosie aan de westzijde van de Ballastplaat;
7. Erosie op de Grienderwaard;
8. Aangroei van de Ballastplaat door sedimentatie in het Kimstergat.



Figuur 0-5 Kaart met de verschillen in bodemhoogte tussen de vaklodgingen 2010 en 2016 (Blauw: de bodem ligt lager; Rood: de bodem ligt hoger).

Verschillen en overeenkomsten 2004-2010 en 2010-2016

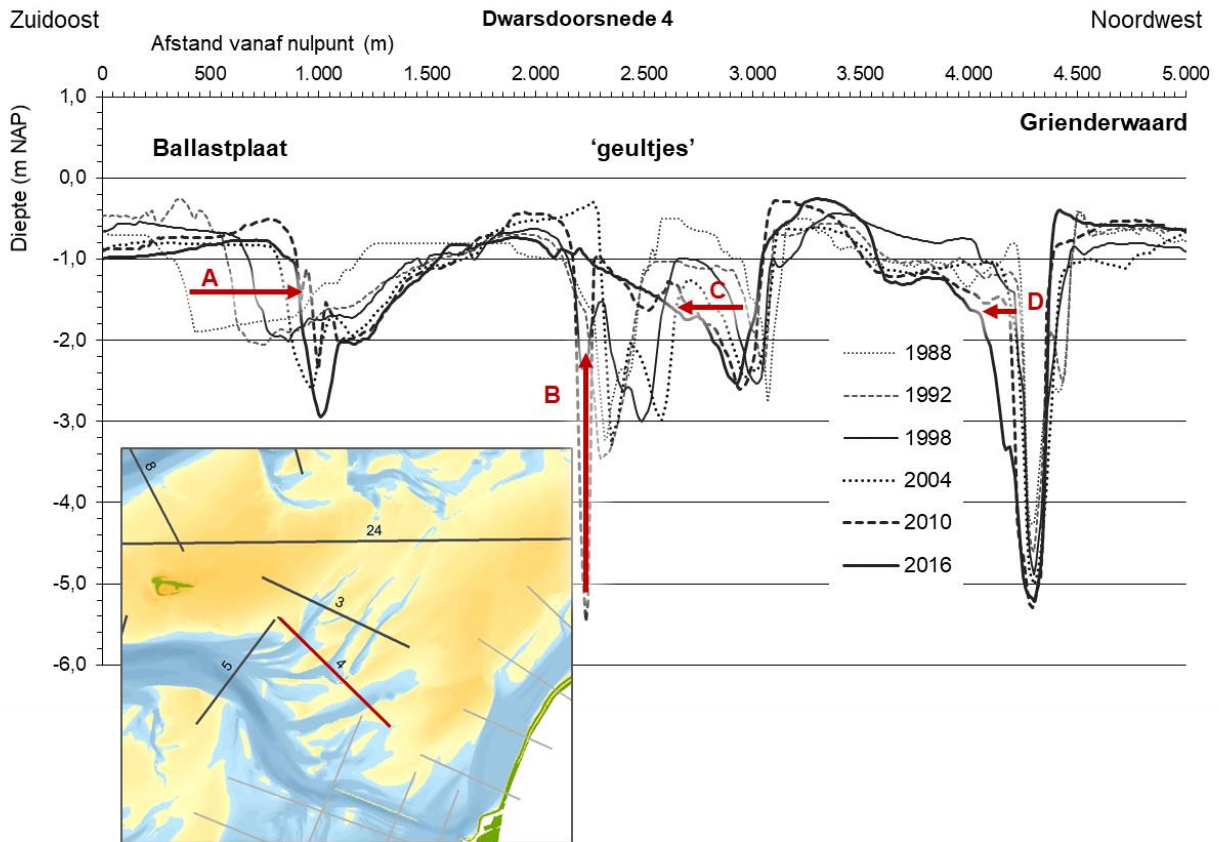
Beide verschilkaarten vertonen duidelijke overeenkomsten in de ontwikkelingen en verschillen. Deze veranderingen zijn ook zichtbaar in de verschilkaart over de langere periode, van 1933-2015 in Figuur 0-3. Voor de beschouwing wordt de nummering gehanteerd die in Figuur 0-4 en Figuur 0-5 is opgenomen.

Geuldynamiek (1, 2 en 3): Geuldynamiek is in beide kaarten verantwoordelijk voor de gros van de veranderingen, waarbij in veel gevallen de uitkomst neutraal is: het sediment dat aan de ene zijde van de geul wordt geërodeerd, komt er aan de andere zijde weer bij. De ontwikkelingen bij **3** zijn ook een voorbeeld van geuldynamiek. Figuur 0-6 toont een dwarsdoorsnede die is opgesteld voor het rapport van Oost et al. (2018) door deze geultjes, waar vooral verschillen zichtbaar zijn tussen de geultjes. Het geultje aan de zuidzijde (A in Figuur 0-6) is naar het noordwesten verplaatst. Omdat de zuidoostelijke geulwand veel sneller naar het noordwesten is verplaatst dan de overzijde van de geul is deze veel smaller geworden. Onder heeft ook een verdieping plaatsgevonden. Bij de middelste geul (B en C in Figuur 0-6) was eerder sprake van twee geultjes, maar hiervan is een opgevuld (B), zodat nu nog een geultje over is (C). Dat geultje verplaatst naar het zuidoosten. Ook het meest noordwestelijke geultje, dat tevens de diepste is, verplaatst naar het zuidoosten (D).

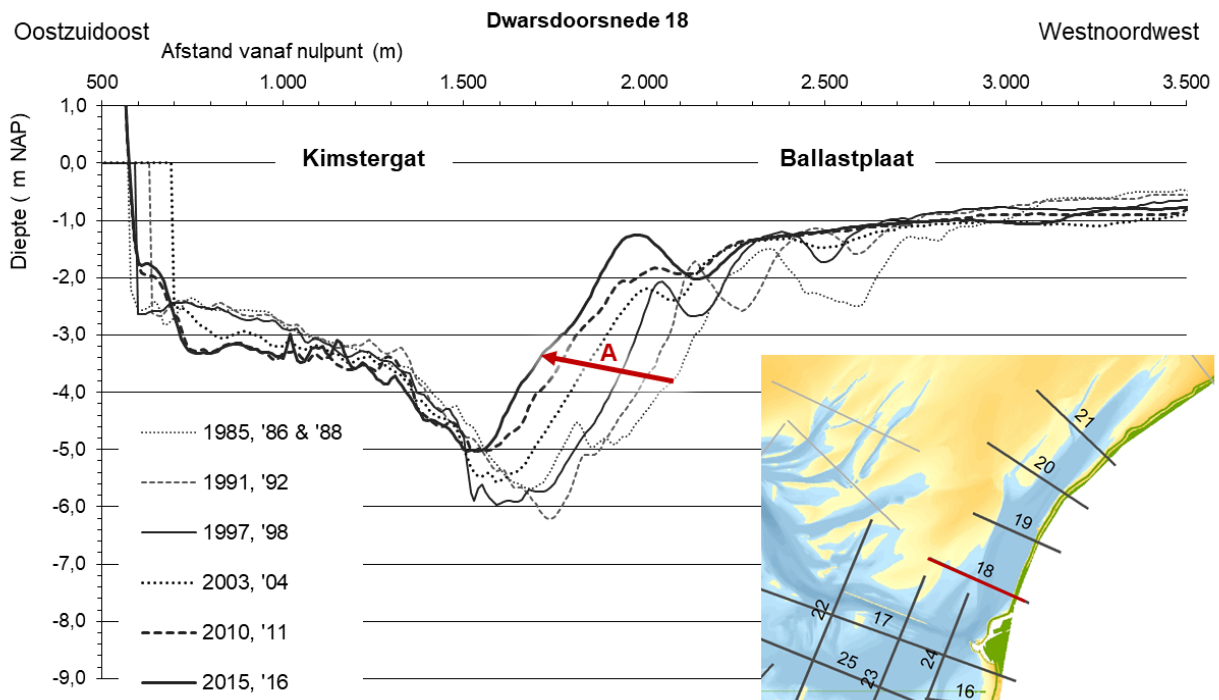
Sedimentatie op de Ballastplaat en de Vlakte van Oosterbierum (4, 5 en 8). Deze sedimentatie manifesteert zich op verschillende plekken op de Ballastplaat aan de zuidzijde in de nabijheid van het Kimstergat bij 4, aan de oostzijde van Ballastplaat/ Vlakte van Oosterbierum bij 5 en ook in de vorm van aangroei van de Ballastplaat ten koste van de geul Kimstergat bij 8. De ontwikkelingen aan de zuidzijde bij het Kimstergat zijn zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 0-7, waarbij duidelijk is dat de Ballastplaat zich gestaag uitbreidt naar het zuiden, ten koste van het Kimstergat. Het resultaat van deze trendmatige ontwikkeling is een gestage afname van de doorstroomoppervlakte van het Kimstergat, zoals getoond in Figuur 0-8.

Zuidwestzijde Ballastplaat (6): Aan de zuidwestzijde van de Ballastplaat zijn de ontwikkelingen minder uitgesproken. Tussen 2004 en 2010 vond hier enige verlaging van de plaat plaats, maar tussen 2010 en

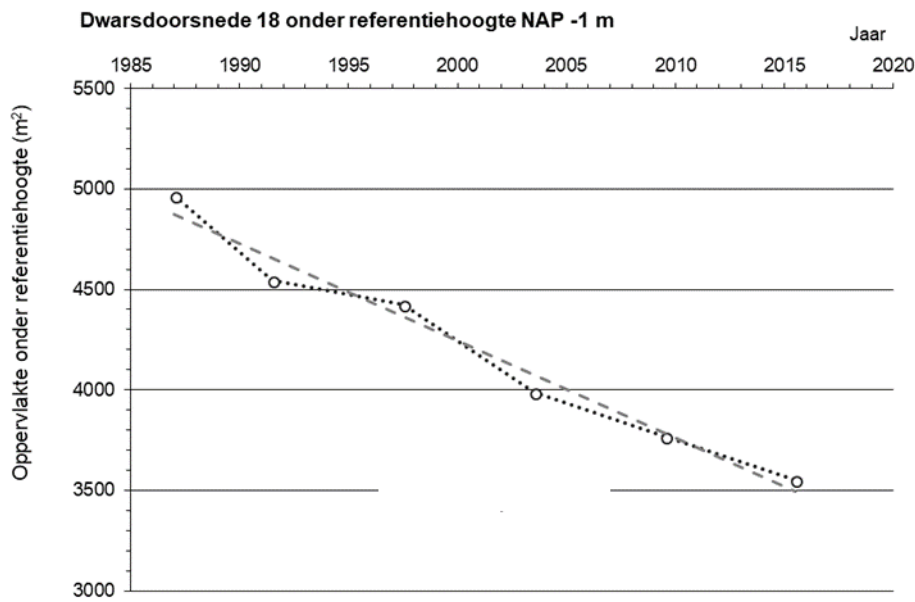
2016 is slechts op een klein gedeelte nog sprake van verlaging, terwijl langs de verhoging heeft plaatsgevonden.



Figuur 0-6 Dwarsdoorsnede door de geultjes in het gebied tussen de Grienderwaard en de Ballastplaat.

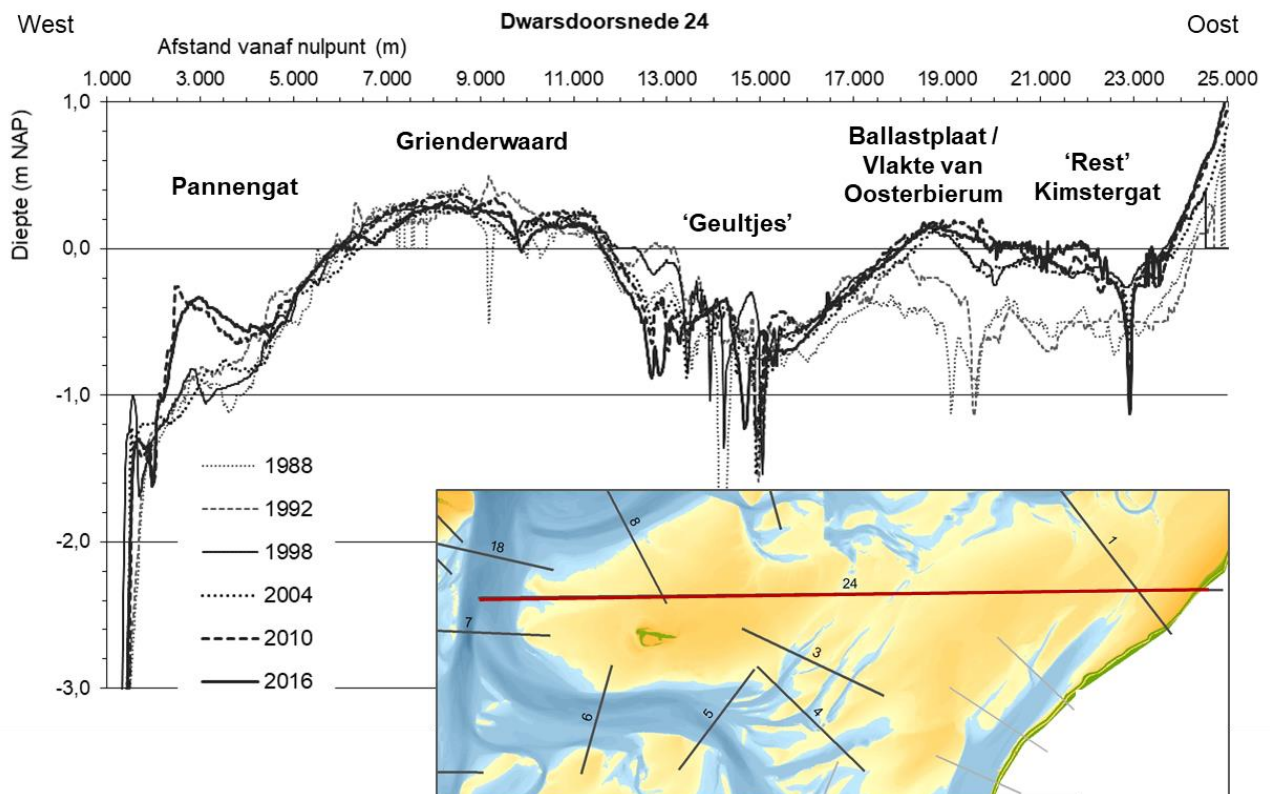


Figuur 0-7 Dwarsdoorsnede door de geul Kimstergat ten noorden van Harlingen met de aanliggende Ballastplaat (uit Oost et al., 2018).



Figuur 0-8 Doorstroomoppervlakte van het Kimstergat onder NAP -1 m van de dwarsdoorsnede in Figuur 0-7.

Variatie op de Grienderwaard (7): Op de Grienderwaard laat voornamelijk hoogtetoename zien tussen 2004 en 2010 en hoogteafname tussen 2010 en 2016. In de dwarsdoorsnede in Figuur 0-9 is zichtbaar dat de hoogte variatie zich voor het grootste deel van de plaat afspeelt binnen een beperkte bandbreedte van tussen de 10 en 20 cm (de spikes in de opnames zijn waarschijnlijk foutjes in de metingen). De bolle vorm van de plaat blijft hierdoor ongewijzigd in alle opnames, van 1988 tot en met 2016. Veranderingen in de vorm doen zich wel voor aan de randen van de Grienderwaard, waar bij het Pannengat areaal droogvallende plaat is ontstaan en bij de 'geultjes' een verlaging is opgetreden.



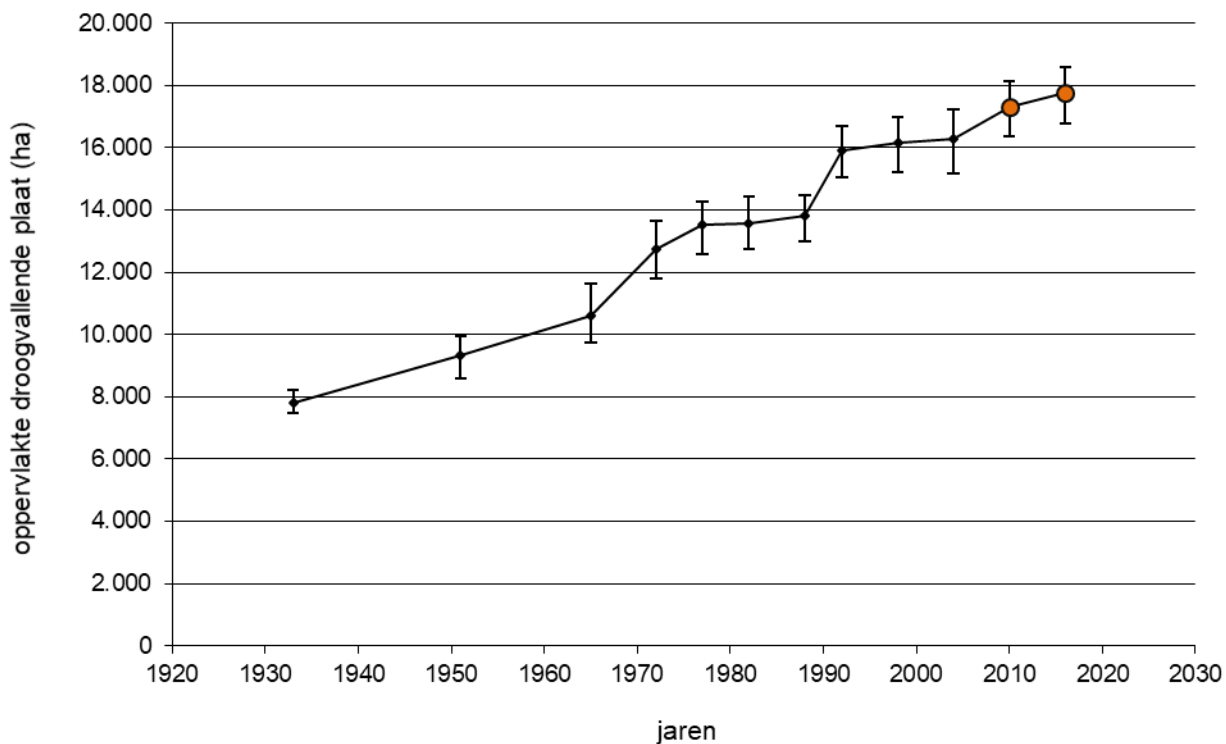
Figuur 0-9 Dwarsdoorsnede door de droogvallende platen Grienderwaard en de Ballastplaat /Vlakte van Oosterbierum.

Bij de Ballastplaat/Vlakte van Oosterbierum is in de dwarsdoorsnedes in Figuur 0-9 zichtbaar dat de vorm van de plaat is gewijzigd, van vlak en laag in de jaren '80 naar bol in de jaren '90. Na de jaren '90 zijn de veranderingen in dit deel van de Ballastplaat/Vlakte van Oosterbierum beperkt. Voor de Grienderwaard stellen we vast dat variaties in de hoogte bij dit gebied horen.

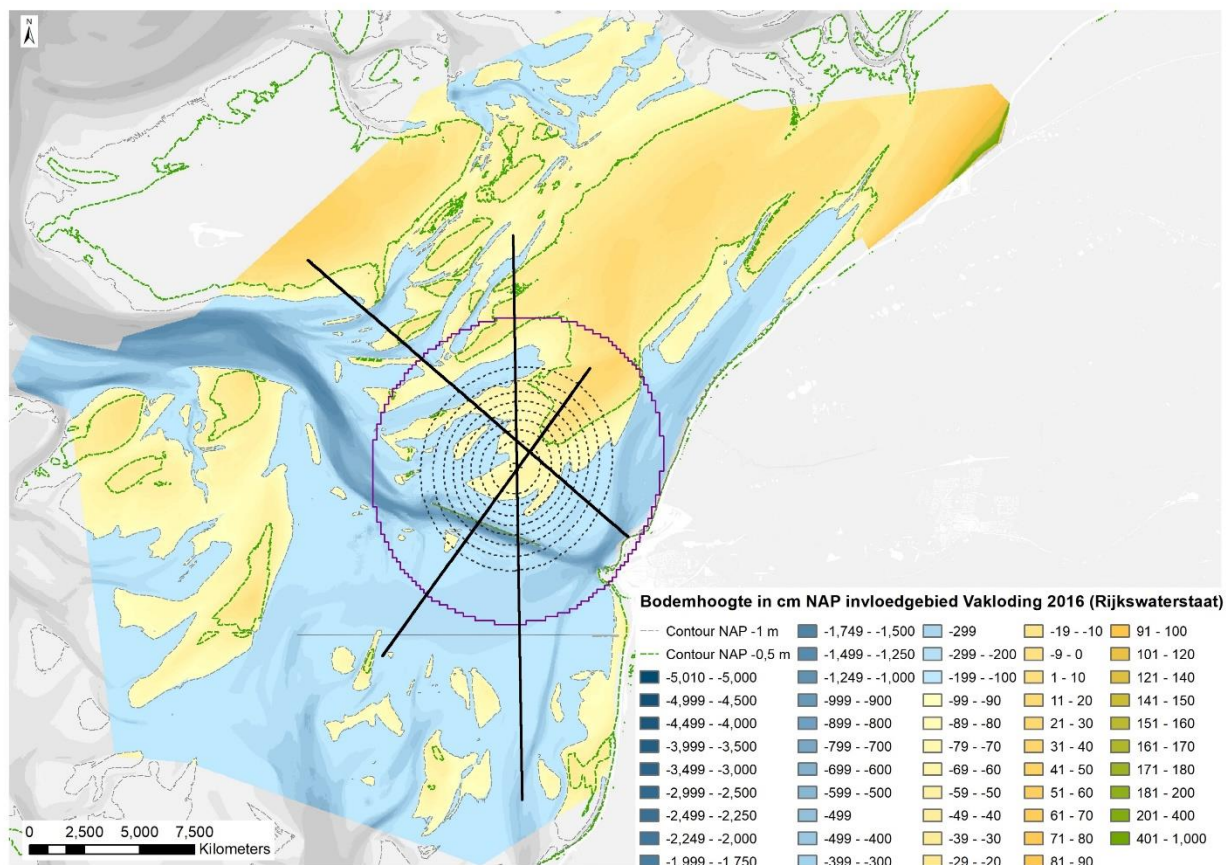
Areaal droogvallende wadplaten

In het kombergingsgebied Vlie is het areaal van de droogvallende platen als gevolg van de forse sedimentatie aanzienlijk is toegenomen. Het areaal droogvallende plaat wordt begrensd op het niveau van laagwater, zoals dat bij de definitie van het habitatype droogvallende platen vanwege Natura-2000 wordt gehanteerd. Dit niveau is LAT (= Lowest Astronomical Tide) van NAP -1,34 m. Voor alle jaren is dezelfde waarde gehanteerd.

Dat de trend in de sedimentatie en de aangroei van het plaatareaal onverminderd doorzet, wordt bevestigd door de resultaten van vaklodingen. Dit is inzichtelijk gemaakt in de onderstaande grafiek (Figuur 0-10), waarin de vakloding van 2016 is verwerkt. Het plaatareaal is steeds toegenomen bij de opeenvolgende vaklodingen. De toename van het oppervlakte droogvallende platen in de periode 1992-2016 bedroeg gemiddeld 80 ha/jaar.



Figuur 0-10 Grafiek van de ontwikkeling van het areaal droogvallende plaat (tussen LAT en GHWS) in het studiegebied (Figuur 0-11).



Figuur 0-11 Kaart met de bodemligging van het studiegebied (het gebied met de heldere kleuren) in 2016.