

# Onderzoek suppletievolumes Houtribdijk

28 november 2022



## Contactpersonen

### KLAAS LENSTRA

Arcadis Nederland B.V.  
Postbus 220  
3800 AE Amersfoort  
Nederland

### VINCENT VUIK

HKV lijn in water B.V.  
Botter 11-29  
8232 JN Lelystad  
Nederland

## Auteurs

### Arcadis

Klaas Lenstra  
Sanne van der Heijden  
Henk Steetzel (+interne review)

### HKV

Vincent Vuik (+interne review)  
Paula Lambregts

## Documentversie

Versie	Datum	Status	Opmerking
0.1	11-08-2022	Tussenrapportage	Externe review
1.0	03-10-2021	Concept	Interne review
1.1	11-10-2022	Concept	Externe review
2.0	28-11-2022	Definitief	

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b>	<b>6</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1 Algemeen	7
1.2 Doelstellingen van het project	7
1.3 Opzet rapportage	7
<b>2 Basisanalyse bodemligging</b>	<b>9</b>
2.1 Inleiding	9
2.2 Gebruikte data en ordening	9
2.2.1 Overzicht beschikbare data	9
2.2.2 Gebruikte meettechnieken	10
2.2.3 Constructies	11
2.2.4 Gebruik van meetdata	12
2.3 Analyse profielontwikkeling	12
2.3.1 Inleiding	12
2.3.2 Dwarsprofielen	13
2.3.3 Volumeveranderingen	19
2.3.4 Aanwezigheid insteleffecten	27
2.3.5 Ontwikkeling profielvorm (plateau)	27
2.3.6 Indicatie dwarstransport	30
2.4 Analyse ontwikkeling oeverlijn	31
2.4.1 Inleiding	31
2.4.2 Positie momentane oeverlijn	31
2.4.3 Indicatie langstransport	33
<b>3 Basisanalyse forcering</b>	<b>35</b>
3.1 Inleiding	35
3.2 Analyse hydrodynamica	37
3.2.1 Algemeen	37
3.2.2 Locatie FL67 (Detailgebied 3; Markermeerzijde)	37
3.2.3 Locatie FL68 (Detailgebied 4; Markermeerzijde)	40
3.2.4 Locatie FL69 (Detailgebied 2; IJsselmeerzijde)	42
3.2.5 Locatie FL70 (Detailgebied 1; IJsselmeerzijde)	44
3.3 Vergelijking langjarig klimaat	46

<b>4</b>	<b>Systemanalyse morfologische ontwikkelingen</b>	<b>49</b>
4.1	Inleiding	49
4.2	Integratie profiel- en oeverlijnontwikkeling	49
4.2.1	IJM hoog	49
4.2.2	IJM laag	50
4.2.3	MM NW hoog	50
4.2.4	MM NW laag	50
4.2.5	MM Trintelzand	50
4.2.6	MM Natuurstrand	51
4.3	Verklaring morfologische ontwikkelingen	51
4.3.1	Zetting	51
4.3.2	Constructies	53
4.3.3	Forcering	53
4.3.4	Plateau	54
4.3.5	Vergelijking MM NW hoog en laag	54
4.4	Toekomstige morfologische ontwikkeling	54
4.4.1	IJM hoog	54
4.4.2	IJM laag	55
4.4.3	MM NW hoog	55
4.4.4	MM NW laag en MM Trintelzand	55
4.4.5	MM Natuurstrand	55
4.5	Evenwichtsprofiel	56
4.6	Samenvatting per deelgebied	56
4.6.1	IJM hoog	56
4.6.2	IJM laag	57
4.6.3	MM NW hoog	57
4.6.4	MM NW laag	57
4.6.5	MM Trintelzand	57
4.6.6	MM Natuurstrand	57
<b>5</b>	<b>Advies suppletie-ontwerp</b>	<b>59</b>
5.1	Inleiding	59
5.2	Benodigde suppletievolumes	59
5.3	Dwarsverdeling	60
5.4	Langsverdeling	60
5.5	Effect vegetatie	61
5.5.1	Inleiding	61

5.5.2	Eolische transporten	61
5.5.3	Hydraulische transporten	61
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>64</b>
6.1	Deelvragen	64
6.2	Hoofdvraag	65
	<b>Referenties</b>	<b>66</b>
	<b>Bijlagen</b>	<b>67</b>
	<b>Colofon</b>	<b>84</b>

## Samenvatting

De Houtribdijk tussen Trintelhaven en Enkhuizen is recent aan beide zijden versterkt met een zandige oever tegen de bestaande dijk. Het is nog onduidelijk of bij dergelijke zandige waterkeringen structurele periodieke suppleties nodig zijn. In dit onderzoek is de eventuele suppletiebehoefte van de zandige waterkering van de Houtribdijk in kaart gebracht. Hiertoe zijn eerst de morfologische ontwikkelingen van de zandige waterkering in kaart gebracht voor de periode november 2019 tot maart 2022. De trends in de data zijn vervolgens verklaard aan de hand van zetting, forcering, en andere fysische processen. Tot slot zijn de geanalyseerde ontwikkelingen doorvertaald naar verwachte toekomstige ontwikkelingen.

De beschouwde ontwikkelingen op het gebied van profielvorm en aanwezig zandvolume kwamen uit de analyse van de bodemligging. Gedurende ruim twee jaar is elk half jaar de bodemligging van de gehele waterkering ingemeten met LiDAR, Ping DSP, SBES en GNSS-meettechnieken; bij vier detailgebieden is de bodemligging frequenter ingemeten. Daarnaast zijn bij de detailgebieden regelmatig stroming, golven en waterstanden gemeten.

De resultaten laten zien dat aan de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk de morfologische ontwikkelingen worden gedomineerd door plateauontwikkelingen. Over de gehele zijde is een onderwaterplateau ontstaan op een diepte van ongeveer NAP-0,8 m, met zowel aan het begin (richting dijk) als aan het eind (richting meer) een relatief steile helling. Er is sprake van erosie rond de waterlijn in de helling boven het plateau (tussen het plateau en NAP+1 m). Daarentegen vindt er depositie plaats op het onderwatertalud onder het plateau (rond NAP-1 m). Door deze erosie aan de bovenkant en depositie aan de onderkant wordt het plateau geleidelijk breder. Deze processen gaan sneller aan de noordwestkant van de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk dan aan de zuidoostkant. Dit verschil kan worden verklaard door 1) verschil in forcering door oriëntatie dijk en verschil in waterdiepte, en 2) netto langstransport in zuidoostelijke richting.

Aan de Markermeerzijde zijn de resultaten minder uniform. Het Natuurstrand in het zuidoosten (tegenover Trintelhaven) wordt gekenmerkt door dezelfde plateauontwikkelingen als aan de IJsselmeerzijde. Daarnaast zorgt langstransport voor een verplaatsing van zand vanuit het midden richting de dwarsdammen aan weerszijden van het Natuurstrand. Achter het Trintelzand zijn geen significante morfologische veranderingen gemeten. Tussen Trintelzand en Enkhuizen is een golfbreker (vooroeverdam) aangelegd voor de zandige waterkering. Door de verminderde golfwerking is de erosie hier een factor tien lager dan bij het Natuurstrand en aan de IJsselmeerzijde. Hierdoor is het plateau ook minder breed of, waar de golfbreker relatief dicht bij de dijk ligt, überhaupt niet aanwezig.

Uit de analyse blijkt verder dat er geen vertraging of versnelling van de erosie is waargenomen binnen de meetperiode. Ook zijn er nog geen aanwijzingen dat het dwarsprofiel zich tot een evenwichtsprofiel ontwikkelt. Voor de vertaling naar verwachte toekomstige ontwikkelingen is de forcering tijdens de meetperiode vergeleken met het langjarig gemiddelde. Op hoofdlijnen is het windklimaat tijdens de meetperiode gelijk aan het langjarige windklimaat. Alleen waren er tijdens de meetperiode gemiddeld minder dagen met sterke noordwestenwind, wat vooral relevant is voor het noordwestelijke gedeelte van de IJsselmeerzijde. Daarom is bij dit gedeelte van de zandige waterkering een correctiefactor van 10% toegepast bij de vertaling van gemeten naar verwachte erosie. Voor alle andere gebieden is de verwachte erosie gelijkgesteld aan die tijdens de meetperiode (na aftrek van zetting).

De totale verwachte van de suppletiebehoefte van de zandige waterkering is minder dan 100.000 m<sup>3</sup>/jaar, opgesplitst in 85% voor de IJsselmeerzijde en 15% voor de Markermeerzijde. Het advies is om toekomstige suppleties rond de waterlijn aan te leggen, omdat hier de meeste erosie optreedt en zand niet door natuurlijke processen vanuit diepere delen richting de waterlijn wordt getransporteerd. Verder is het advies om in de langsrichting uniform te suppleren, met twee uitzonderingen. De eerste is aan de IJsselmeerzijde bij het noordwestelijke knikpunt. Hier is extra zandvolume nodig om te compenseren voor een lokale herverdeling van zand. De tweede is het natuurstrand waar de suppletie geheel in het midden kan worden uitgevoerd.

Vergelijking met de in de ontwerpnota beschouwde onderhoudsvolumes is het aandeel van het verlies door langstransport qua orde van grootte correct ingeschat. In de ontwerpnota werd achteraf gezien dominante verlies in dwarsrichting onterecht verwaarloosd.

Vegetatie kan in twee gebieden een positieve bijdrage leveren aan het vasthouden van zand. Ten eerste verdwijnt de suppletiebehoefte achter de golfbrekers aan de Markermeerzijde grotendeels als (riet)vegetatie tot ontwikkeling komt. Echter, de waterdiepte is momenteel te groot, waardoor (slib)sedimentatie achter de golfbrekers nodig is voordat riet op grote schaal tot ontwikkeling kan komen. Ten tweede kan vegetatie mogelijk tot ontwikkeling komen aan de IJsselmeerzijde nabij Trintelzand en ook daar leiden tot een sterke reductie van de suppletiebehoefte.



# 1 Inleiding

## 1.1 Algemeen

Bij de recente versterking van de Houtribdijk zijn tussen Trintelhaven en Enkhuizen aan beide zijden zandige versterkingsmaatregelen gerealiseerd tegen de bestaande dijk. Na de aanleg van de zandige oevers is een uitgebreide monitoringscampagne uitgevoerd, waarbij onder andere de bodemligging periodiek is ingemeten en de hydrodynamische forcering (golven, stroming, wind) continu is gemonitord. Het voorliggende onderzoek analyseert deze meetgegevens (november 2019 – maart 2022) om zo de morfologische ontwikkeling van de zandige oevers te onderzoeken en de sedimentatie- en erosieprocessen langs de dijk/oever in kaart te brengen. Het hoofdonderzoeksdoel van dit onderzoek is om, in het geval van structurele erosie, tot een goede inschatting te komen van benodigde suppletievolumes en deze te vertalen in richtlijnen/handvatten voor ontwerp van deze suppleties. Met eventuele suppleties wordt geborgd dat de zandlichamen hun beoogde (waterveiligheids-)functies behouden.

Dit project kent daarmee veel raakvlakken met andere onderzoeks-, planfase- en uitvoeringsprojecten die in de afgelopen jaren zijn uitgevoerd, zoals 'Versterking Markermeerdijken (oeverdijk)', 'Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk', 'Marker Wadden' en 'Versterking Houtribdijk'. De uitkomsten van deze projecten zullen dan ook worden meegenomen in dit onderzoek.

## 1.2 Doelstellingen van het project

Dit onderzoek bevat meerdere onderzoeksvragen die beantwoord worden om inzicht te verkrijgen in de suppletie-behoefte van de zandige oever van de Houtribdijk. Het onderzoeksdoel is dus niet om een geplande suppletie te ontwerpen, maar om de jaarlijkse benodigde volumes in kaart te brengen en conceptueel een toekomstige suppletie vorm te geven (hoeveel, waar, hoe?). Dit onderzoek betreft een kwantitatieve analyse van de volumes om (structurele) erosie te compenseren en niet van het gewenste volume van een specifieke suppletie.

De aanpak op hoofdlijnen is als volgt. De analyse van de gemeten bodemligging is opgesplitst in de profielontwikkeling (dwarsrichting) en de oeverlijnontwikkeling (langsrichting). Om tot een onderbouwd suppletieadvies te komen volgt een nadere duiding hiervan, net als een inschatting van de toekomstige morfologische ontwikkeling van de zandige oevers en de rol van een mogelijk evenwichtsprofiel hierbij.

De hoofdvraag die in dit onderzoek wordt beantwoord is dan ook:

Wat zijn de benodigde suppletievolumes voor periodieke onderhoud voor de Houtribdijk en hoe ziet een efficiënt suppletie-ontwerp eruit?

De onderliggende onderzoeksvragen die hiertoe leiden zijn:

1. Wat zijn de historische (i.e., gemeten) en verwachte trends in volumeontwikkeling en dwarstransport?
2. Wat zijn de kustlangse variaties in oeverlijnpositie en volumeontwikkeling die wijzen op langstransport?
3. Hoe kunnen de gevonden morfologische ontwikkelingen verklaard worden?
4. Wat zijn de verwachte toekomstige morfologische ontwikkelingen en is een evenwichtsprofiel mogelijk?

## 1.3 Opzet rapportage

Voorliggend document heeft betrekking op de suppletiebehoeften van de zandige versterking van de Houtribdijk.

Na dit inleidende hoofdstuk (Hoofdstuk 1) is in Hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van alle uitkomsten van de morfologische analyse. Hierin zijn primair onderzoeksvragen 1 en 2 beschouwd.

Hoofdstuk 3 en 4 gaan specifiek in op de duiding van de resultaten. Het eerstgenoemde hoofdstuk geeft een overzicht van de gemeten forcering (golven, stroming en wind) tijdens de meetperiode en een doorvertaling naar een langjarig klimaat. In het volgende hoofdstuk is aan de hand hiervan de morfologische resultaten geduid in de systeemanalyse. In

Hoofdstuk 4 is dan ook onderzoeksvraag 3 beantwoord. In hoofdstuk 4 zijn ook de verwachte toekomstige morfologische ontwikkelingen en een eventueel evenwichtsprofiel gepresenteerd. Onderzoeksvraag 4 is hiermee afgerond.

In Hoofdstukken 2 t/m 4 is de beschrijving van de analyses steeds geclusterd per deelgebied of zijde van de Houtribdijk.

Hoofdstuk 5 beschrijft de suppletiebehoeftes van de zandige oevers en geeft waar mogelijk handvatten voor een efficiënt suppletie-ontwerp. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de verwachte zandbehoeften en handvatten voor een suppletie.



## 2 Basisanalyse bodemligging

### 2.1 Inleiding

De basis van de analyse is het analyseren en vaststellen van de historische trends. Hiertoe worden primair de bodemhoogtegegevens gebruikt. De analyse wordt opgesplitst in de dwarsrichting (dwarsprofiel, sectie 2.3) en langsrichting (oeverlijn, sectie 2.4). De resultaten van deze analyses worden geïntegreerd en geduid in de overkoepelende systeemanalyse (Hoofdstuk 4). Daarbij wordt mede gebruik gemaakt van de resultaten van de basisanalyse van de forcering (Hoofdstuk 3).

### 2.2 Gebruikte data en ordening

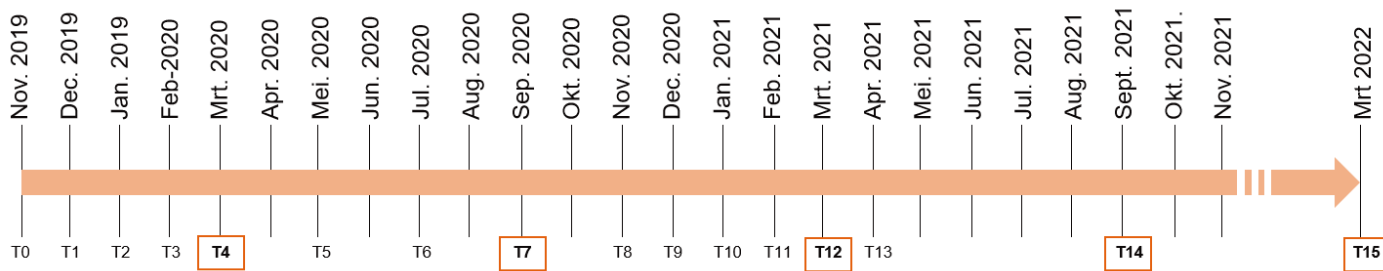
#### 2.2.1 Overzicht beschikbare data

Er zijn bodemhoogtegegevens tussen november 2019 en maart 2022 beschikbaar. In deze periode is zestien keer gemeten, waarvan vijf keer het gehele zandige gedeelte van de Houtribdijk (halfjaarlijks) en elf keer enkel de vier detailgebieden. De Houtribdijk en deze vier detailgebieden zijn weergegeven in Figuur 2-1. Hierin is het gehele zandige gedeelte van de Houtribdijk geel gemarkeerd. Detailgebied 1 en 2 bevinden zich aan de IJsselmeerzijde (kustvak 50) en detailgebied 3 en 4 aan de Markermeerzijde (kustvak 51) van de dijk. Detailgebied 3 is een natuurstrand, grenzend aan Trintelzand. Bij detailgebied 4 is een vooroeverdam parallel aan de dijk aanwezig.



Figuur 2-1 Locatie van de detailmeetgebieden Houtribdijk met detailgebied 1 en 2 aan de IJsselmeerzijde en detailgebied 3 en 4 aan de Markermeerzijde.

In Figuur 2-2 staan de meetmomenten in een tijdlijn gevisualiseerd. De eerste meting was in november 2019 (T0) en de meest recente in maart 2022 (T15). De meetmomenten omkaderd met oranje zijn de halfjaarlijkse metingen van de gehele Houtribdijk. Per meetmoment (T0-T15) zijn er verspreid over enkele weken metingen uitgevoerd. De maand die bij het meetmoment vermeld staat is de maand waarin het gemiddelde van de meetmomenten ligt.

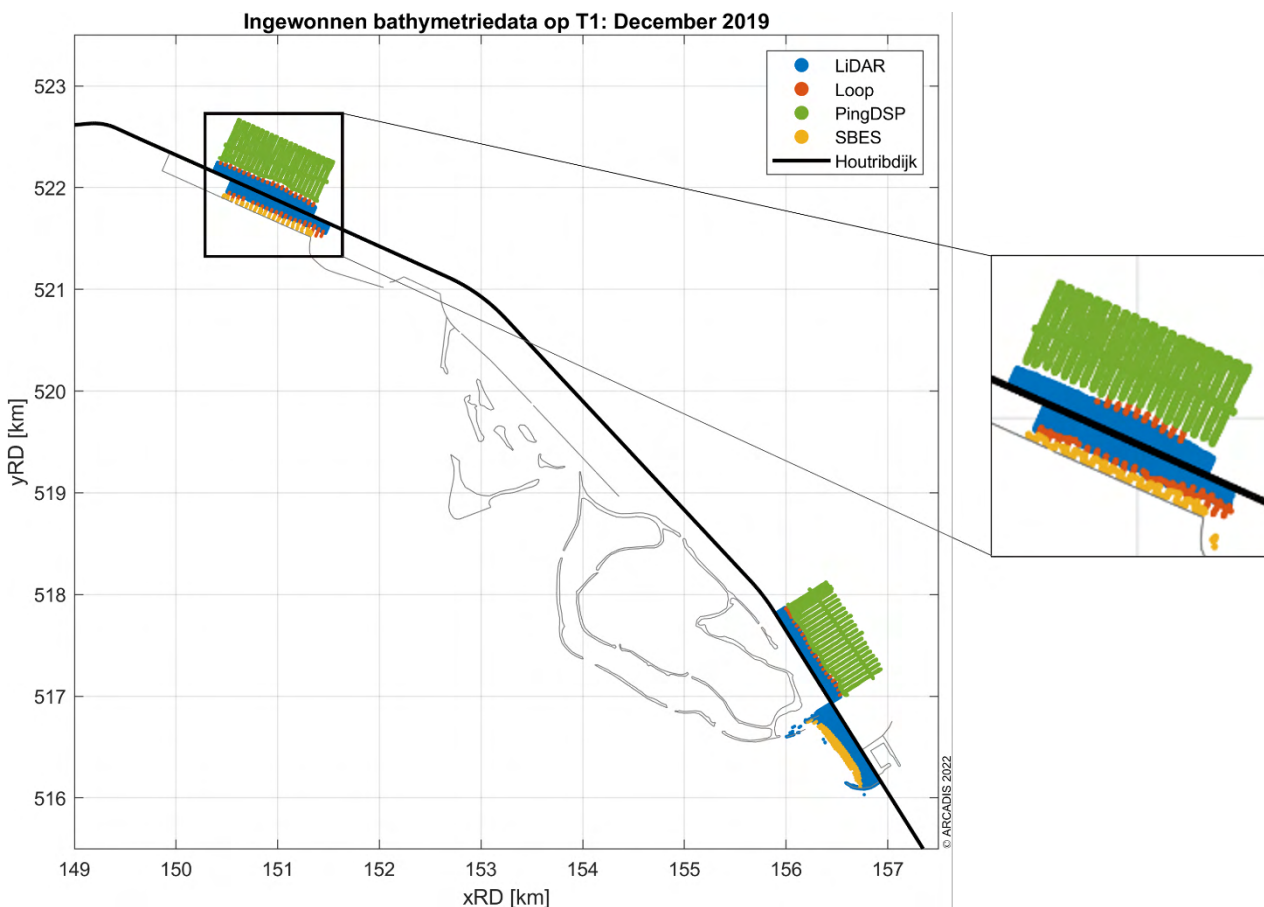


Figuur 2-2 *Tijdljn bathymetriemetingen. De omkaderde meetmomenten T4, T7, T12, T14 en T15 zijn de halfjaarlijkse metingen van de gehele Houtribdijk. Op de andere meetmomenten zijn alleen de 4 detailgebieden ingemeten.*

## 2.2.2 Gebruikte meettechnieken

Voor de bodemhoogtemetingen zijn vier surveytechnieken gebruikt, die elk een andere diepte/hoogte van de zandige oever van Houtribdijk inmeten:

- LiDAR (Light Detection and Ranging)
- Ping DSP (op basis van SONAR - Sound Navigation And Ranging)
- SBES (Single Beam Echo Sounding)
- Loopdata (GNSS-kruiwagen)



Figuur 2-3 *Ingewonnen bathymetriedata op T0, November 2019. In het ingezoomde gedeelte zijn gaten te zien tussen de PingDSP en de LiDAR data.*

LiDAR is gebruikt om de bodemhoogte boven water in te meten. PingDSP en SBES zijn gebruikt om de delen onder water in te meten d.m.v. een vaartuig. Omdat LiDAR geen bodemdiepte kan meten onder water en een boot niet te dicht

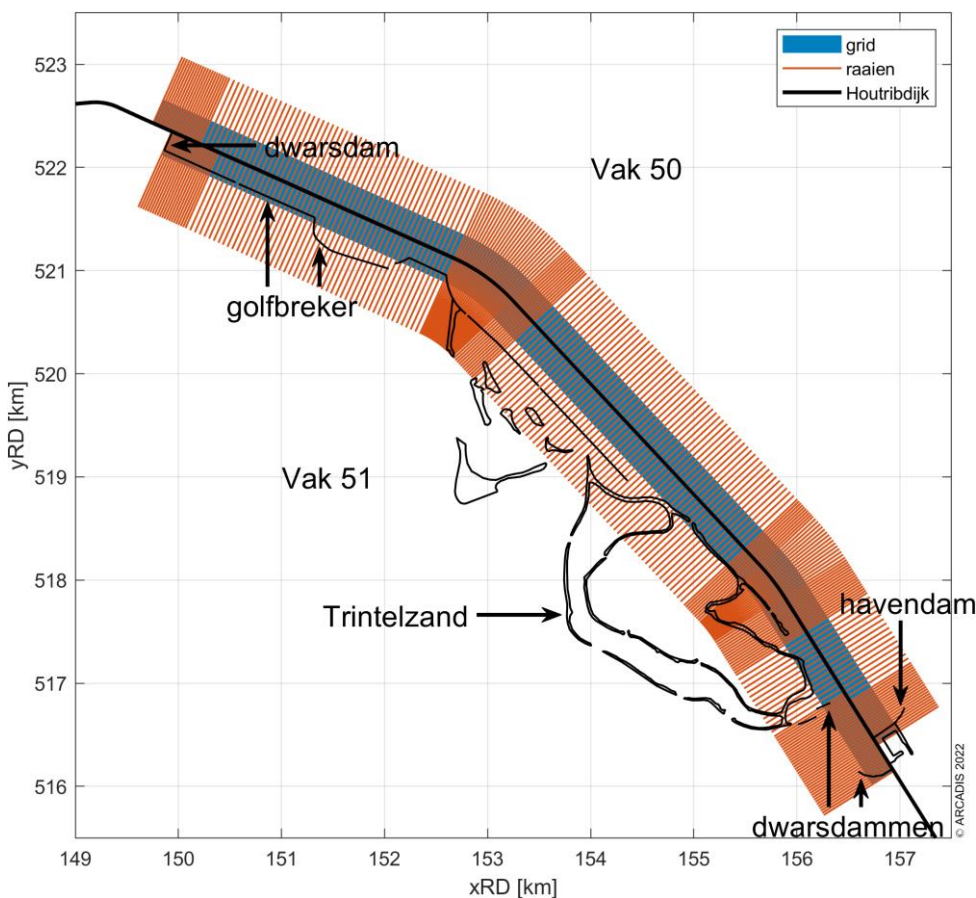
langs de kust kan meten (tot 75 cm diepte) is dit tussengebied handmatig met een GNSS-kruiwagen ingemeten ('loopdata').

Figuur 2-3 laat als voorbeeld de ingewonnen bodemhoogte datapunten zien, onderverdeeld in de surveytechnieken op T0 (november 2019). Op dit meetmoment zijn alleen de detailgebieden ingemeten. Op sommige plekken zijn er echter ook gaten in de data te zien. Dit is zichtbaar in Figuur 2-3 (links) detailgebied 1 (IJsselmeerzijde) tussen de pingDSP data (groen) en de LiDAR data (blauw). Hier zijn niet geheel dekkend metingen gedaan met de GNSS-kruiwagen (loopdata, rood). Deze gaten zijn ook zichtbaar op andere meetmomenten. Figuren van de ingewonnen data onderverdeeld in de verschillende surveytechnieken op alle meetmomenten zijn te vinden in Bijlage A.

### 2.2.3 Constructies

Aan de IJsselmeerzijde zijn er kustlangs geen golfbrekers aanwezig. De enige harde structuur aangrenzend aan deze zijde van de Houtribdijk is gelegen aan de zuidoostkant. Hier wordt het zandige gedeelte van de Houtribdijk afgesloten met een havendam aangrenzend aan Trintelhaven. Trintelhaven is zichtbaar in Figuur 2-4 in de dunne zwarte lijnen bij raai 61100. Aan de noordwestzijde loopt het zandige gedeelte van de Houtribdijk aan de IJsselmeerzijde langzaam af (smaller wordende zandreep) en gaat het over in de harde waterkering. Dat de Houtribdijk kustlangs geen golfbrekers heeft aan de IJsselmeerzijde komt terug in de kustlangse uniformiteit van de dwarsprofielen in dit hoofdstuk.

Aan de Markermeerzijde zijn er, in tegenstelling tot de IJsselmeerzijde, kustlangs veel golfbrekers aanwezig. Daarnaast zorgt Trintelzand voor de afscherming van golven. Alleen bij het natuurstrand (Detailgebied 3) aan de zuidoostkant van de Houtribdijk zijn er geen golfbrekers aanwezig, alleen dwarsdammen aan beide zijden. Ook sluit een dam de zandige waterkering aan de Markermeerzijde in het noordwesten af. Dit is zichtbaar in Figuur 2-4 in de dunne zwarte lijnen. Dat de Houtribdijk kustlangs veel golfbrekers en andere harde structuren bevat komt in dit hoofdstuk terug in de non-uniformiteit van de hier aanwezige dwarsprofielen.



Figuur 2-4 Grid en raaien waarnaar de data is geïnterpoleerd. Alleen de halfjaarlijkse data is geïnterpoleerd naar het grid.

## 2.2.4 Gebruik van meetdata

### *Interpolatie naar raaien*

De data per meetmoment is geïnterpoleerd naar alle raaien (Figuur 2-4) langs de Houtribdijk voor zowel de IJsselmeer als de Markermeerzijde. De resultaten van deze interpolatie is de basis van veel analyse binnen deze studie. De raaidata is bijvoorbeeld gebruikt om dwarsprofielen te visualiseren (sectie 2.3.2), volumes tussen bepaalde dieptelijnen te bepalen (sectie 2.3.3) en de MOL (Momentane OeverLijn) te bepalen (sectie 2.4.2).

### *Interpolatie naar grid*

Daarnaast is de halfjaarlijkse data van de gehele Houtribdijk geïnterpoleerd naar een grid met een celgrootte van circa 2,5 m x 2,5 m (Figuur 2-4). Deze vlakdekkende data is voornamelijk gebruikt om de halfjaarlijkse bodemhoogte te visualiseren en cumulatieve erosie/sedimentatie tussen halfjaarlijkse data te visualiseren (sectie 2.3.5. en Bijlage D)

De celgrootte van circa 2,5 m x 2,5 m is gekozen omdat deze de beste balans geeft tussen hoeveelheid details/informatie en interpolatienauwkeurigheid. De halfjaarlijkse data is onderwater voornamelijk gemeten op alle raaien die circa 25-50 m uit elkaar liggen en niet in de gebieden ertussen. In de dwarsrichting is er veel dichter op elkaar gemeten, maximaal circa 0,25 m uit elkaar. Aangezien er kustlangs minder variatie in bodemhoogte is (zichtbaar in de data-analyse van de raaien, voornamelijk aan de IJsselmeerzijde) en om niet te veel informatie in de dwarsrichting te missen, is uitgekomen op de celgrootte van circa 2,5 m x 2,5 m.

### *Filtering*

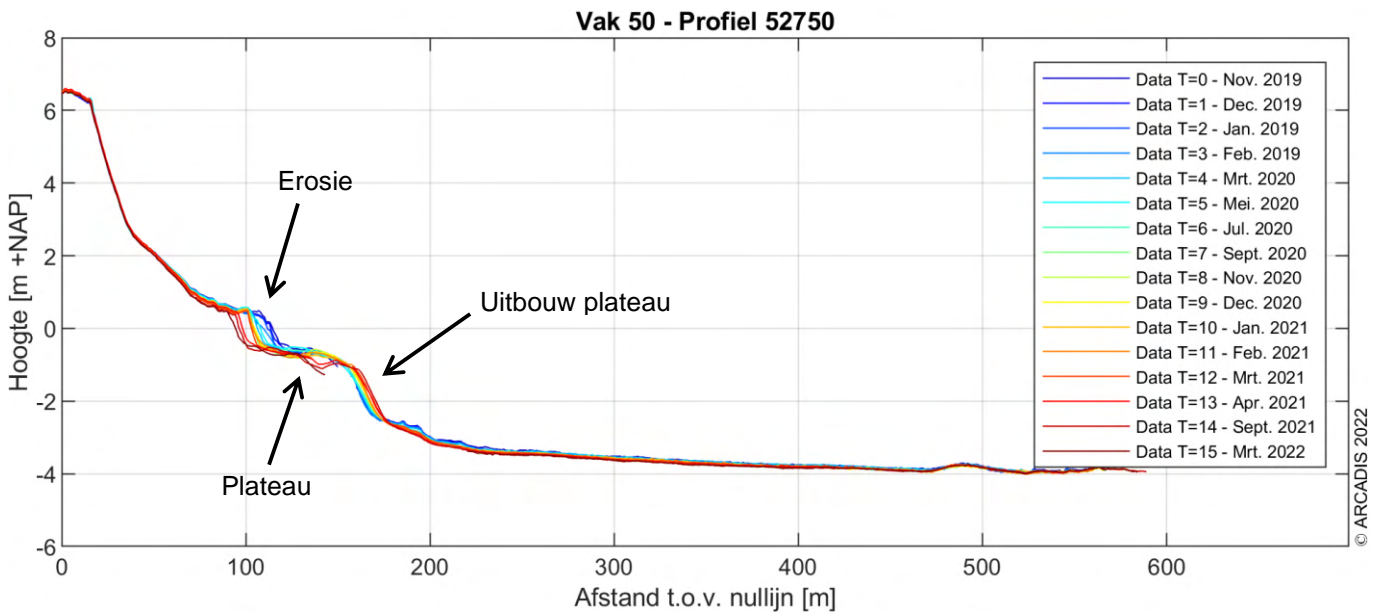
Na de interpolatie zijn er voor zowel het grid als de raaien datapunten gefilterd omdat de geïnterpoleerde waarde gebaseerd is op meetpunten die ver weg liggen (>55 m). Deze drempelwaarde van 55 m is gekozen omdat dit de maximale afstand tussen de gemeten raaien is met een kleine marge van +5 m. Een voorbeeld van deze filtering zijn de punten die vallen binnen de gaten in de data zichtbaar in Figuur 2-3. Hierdoor is op deze locaties een vreemd profiel/grid te zien wat niet overeenkomt met de werkelijkheid. Om die reden zijn deze plekken verwijderd uit de geïnterpoleerde data.

## 2.3 Analyse profielontwikkeling

### 2.3.1 Inleiding

Een voorbeeld van profielontwikkeling is te zien in Figuur 2-5, waarin de dwarsprofielen voor één enkele raai zijn getoond. De nullijn in de figuren is de as van de weg op de Houtribdijk. In deze analyse worden de dwarsprofielen (sectie 2.3.2) gebruikt om typische karakteristieken te duiden. Vervolgens worden de profielen vertaald in aanwezig zandvolume (sectie 2.3.3). De volumes worden bepaald voor verschillende diepteschijven. Dit geeft een kwantitatieve indicatie van de profielontwikkeling en geeft inzicht in de optredende sedimentuitwisseling tussen verschillende niveaus en eventuele insteoeffecten (sectie 2.3.4) van het profiel in de periode na aanleg.

Uit eerdere studies in deze omgeving (Steetzel et al, 2018; Ton et al, 2021) is nadrukkelijk naar voren gekomen dat in dit type oeverzones flauwe/vlakke onderwaterplateaus ontstaan bij zandige profielen. Het ontstaan van deze plateaus en de dimensies (niveau en breedte) ervan worden kwantitatief weergegeven in sectie 2.3.5. Tot slot, de analyse van de weergenomen profielontwikkeling draagt bij aan verbeterd inzicht in het netto sedimenttransport in de dwarsrichting (sectie 2.3.6).



Figuur 2-5. Voorbeeld van profielontwikkeling. Vak 50, IJsselmeerszijde, profiel 52750. Detailgebied 1.

## 2.3.2 Dwarsprofielen

### 2.3.2.1 Inleiding

De dwarsprofielen zijn in deze sectie op twee manieren gevisualiseerd:

1. Voor een specifiek meetmoment zijn alle profielen voor een zijde van de dijk over elkaar heen geplot om zo de kustlengte variatie van de profielvorm te kunnen zien per zijde (IJsselmeer/Markermeer).
2. Voor een representatieve selectie aan profielen is de ontwikkeling in de tijd gevisualiseerd. Binnen elk detailgebied zijn 2 of 3 profielen gekozen. Daarnaast zijn een aantal tussenliggende profielen geselecteerd waarvoor alleen halfjaarlijkse data beschikbaar was. Deze selectie is gevisualiseerd in Figuur 2-6. Van deze selectie zijn de enkele profielen in deze sectie verwerkt. Alle representatieve dwarsprofielen met de ontwikkeling door de tijd heen staat in Bijlage B (IJsselmeerszijde) en Bijlage C (Markermeerszijde).

### 2.3.2.2 Resultaten IJsselmeerszijde - vak 50

Figuur 2-7 laat de kustlengte variatie in dwarsprofielen zien op meetmoment T4 (maart 2020) voor de profielen aan de IJsselmeerszijde. In dit figuur is een select aantal profielen aan de zijkanten buiten beschouwing gelaten omdat deze afwijken in vorm door de aanwezigheid van een golfbreker (zuidwest, Trintelhaven) of door de afloop van het zandige gedeelte van de Houtribdijk (noordoost, overgang naar harde waterkering).

In Figuur 2-7 is zichtbaar dat de profielvorm kustlengte grofweg uniform is, maar ook een grote variatie vertoont in de dwarsrichting. Drie delen van het profiel zijn het meest kenmerkend en zullen nader worden toegelicht aan de hand van de geselecteerde dwarsprofielen:

- Het begin van het plateau
- Het plateau
- Het einde van het plateau

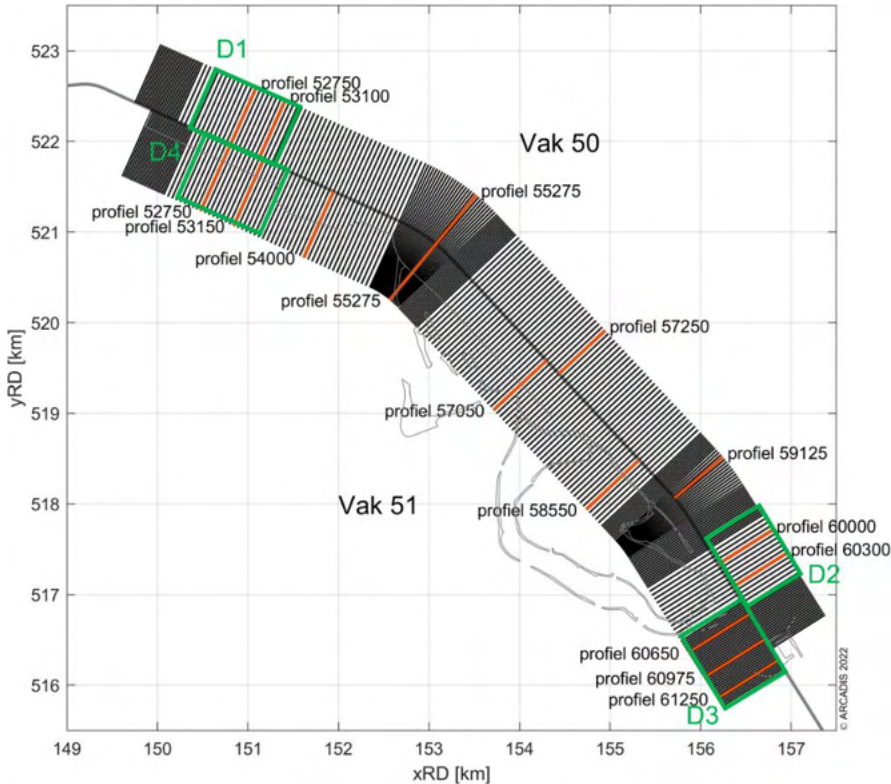
#### **Begin plateau**

Het begin van het plateau is gedefinieerd als de (relatief) steile helling rond de waterlijn. Dit begin is gelegen tussen 75 en 125 m t.o.v. de nullijn. Dit gebied wordt gekenmerkt door erosie tussen november 2019 en maart 2022. Dit is zichtbaar in alle representatieve dwarsprofielen langs de IJsselmeerszijde (Figuur 2-5, Figuur 2-8 en Bijlage B). De verdere kwantificering van de erosie (snelheid en hoeveelheid) in dit gebied wordt gedaan in sectie 2.3.3 door middel van een volumebenadering.

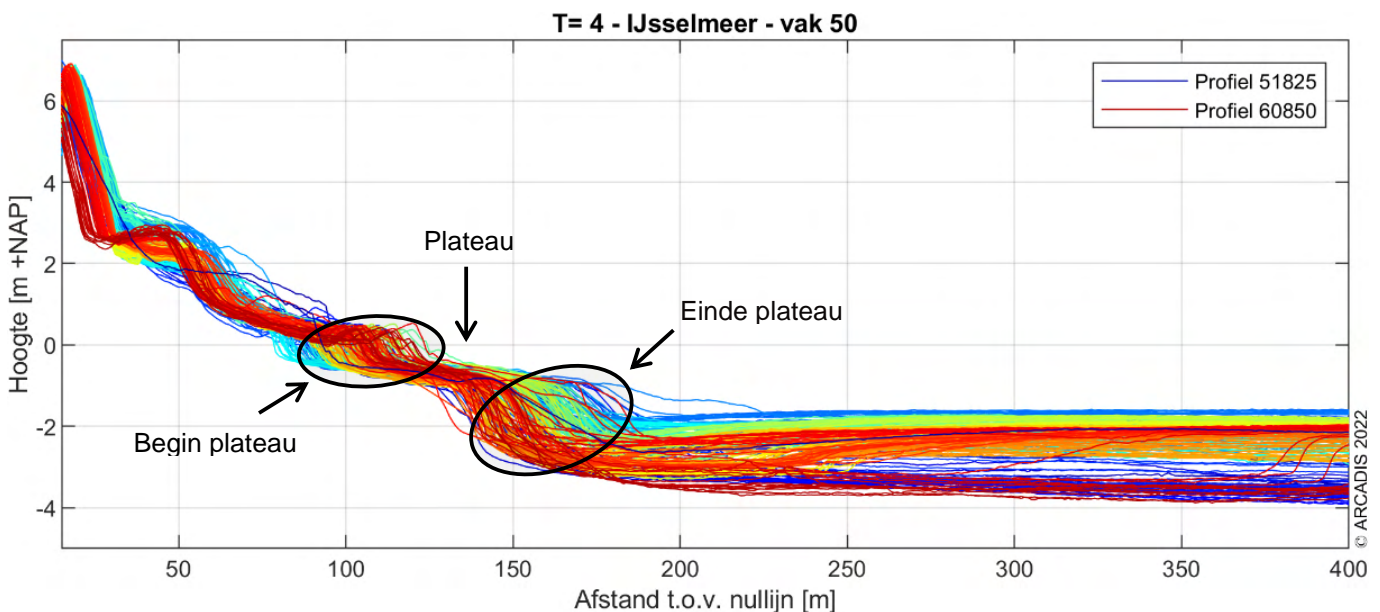


**Het plateau**

Rond 140 m t.o.v. de nullijn ligt het plateau op een diepte van circa NAP-0,80 m. Het niveau van het plateau verandert nauwelijks tussen november 2019 en maart 2022, maar de breedte van het plateau is wel toegenomen. In het noordelijke gedeelte van de Houtribdijk, te zien in raai 52750, 53100 en 55275 (Figuur 2-5 en Bijlage B) neemt de breedte tussen maart 2020 en maart 2022 toe van circa 55 m naar 75 m. Richting Trintelhaven (in zuidoostelijke richting) is het plateau wat minder breed en groeit deze ook minder hard. De breedte neemt in dit gebied toe van circa 45 m naar 55 m. Dit is zichtbaar bij raai 57250, 59125, 60000 en 60300 (Figuur 2-8 en Bijlage B).



Figuur 2-6 Selectie dwarsprofielen. Per detailgebied (D1, D2, D3 en D4) zijn er 2 raaien geselecteerd.

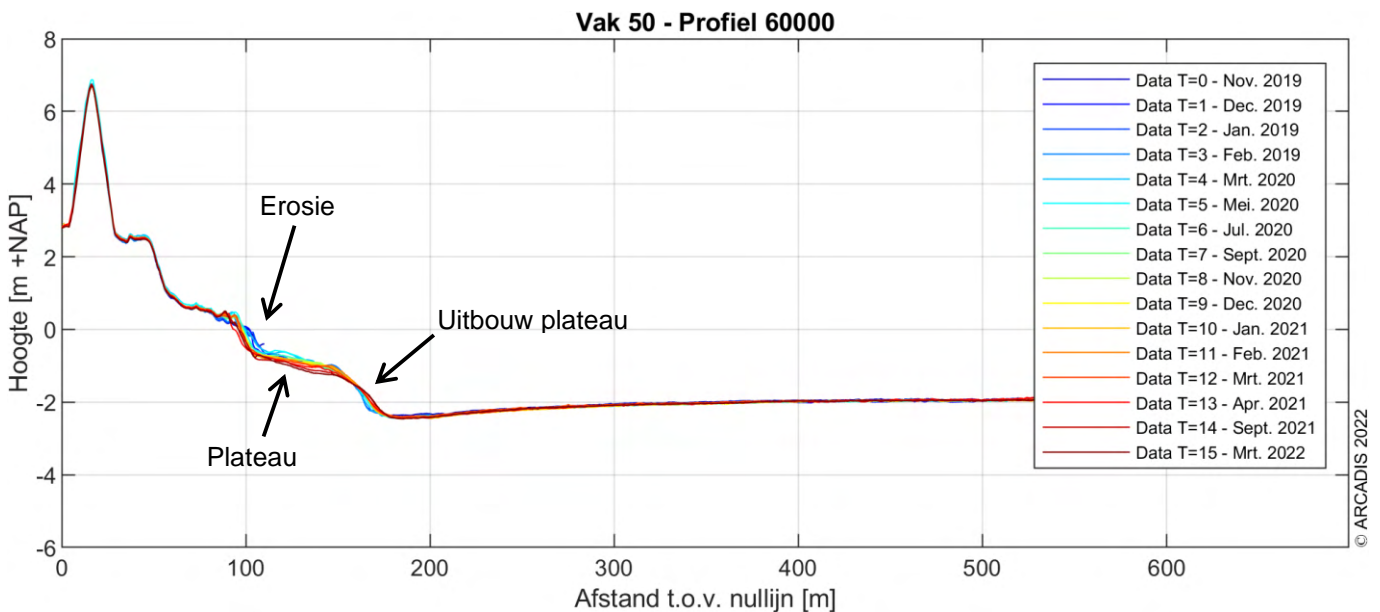


Figuur 2-7 Kustlangse variatie in dwarsprofielen, IJsselmeerzijde (vak 50) op meetmoment T4 (maart 2020). De raainummers van het eerste en laatste profiel zijn in de legenda getoond.



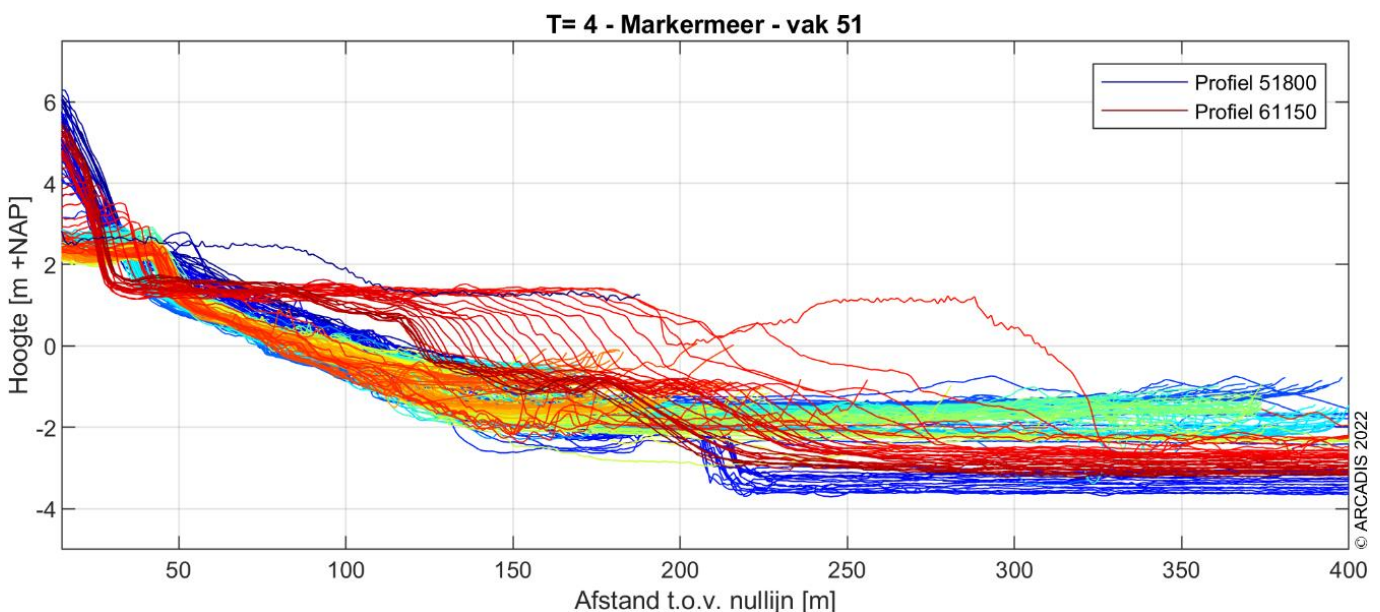
**Einde plateau**

Het einde van het plateau wordt (net als het begin) gekenmerkt door een relatief steile helling. Deze helling is het onderwatertalud richting de oorspronkelijke meerbodem. Dit onderwatertalud ligt tussen de 140 en 190 m t.o.v. de nullijn, afhankelijk van het profiel. Het einde van het plateau wordt gekenmerkt door sedimentatie. Dit is zichtbaar in alle representatieve dwarsprofielen langs de IJsselmeerzijde (Figuur 2-5, Figuur 2-8 en Bijlage B). De verdere kwantificatie van de sedimentatie (snelheid en hoeveelheid) in dit gebied wordt gedaan in sectie 2.3.3 door middel van een volumebenadering.



Figuur 2-8 Vak 50, IJsselmeerzijde, profiel 60000. Detailgebied 2.

**2.3.2.3 Resultaten Markermeerzijde - vak 51**

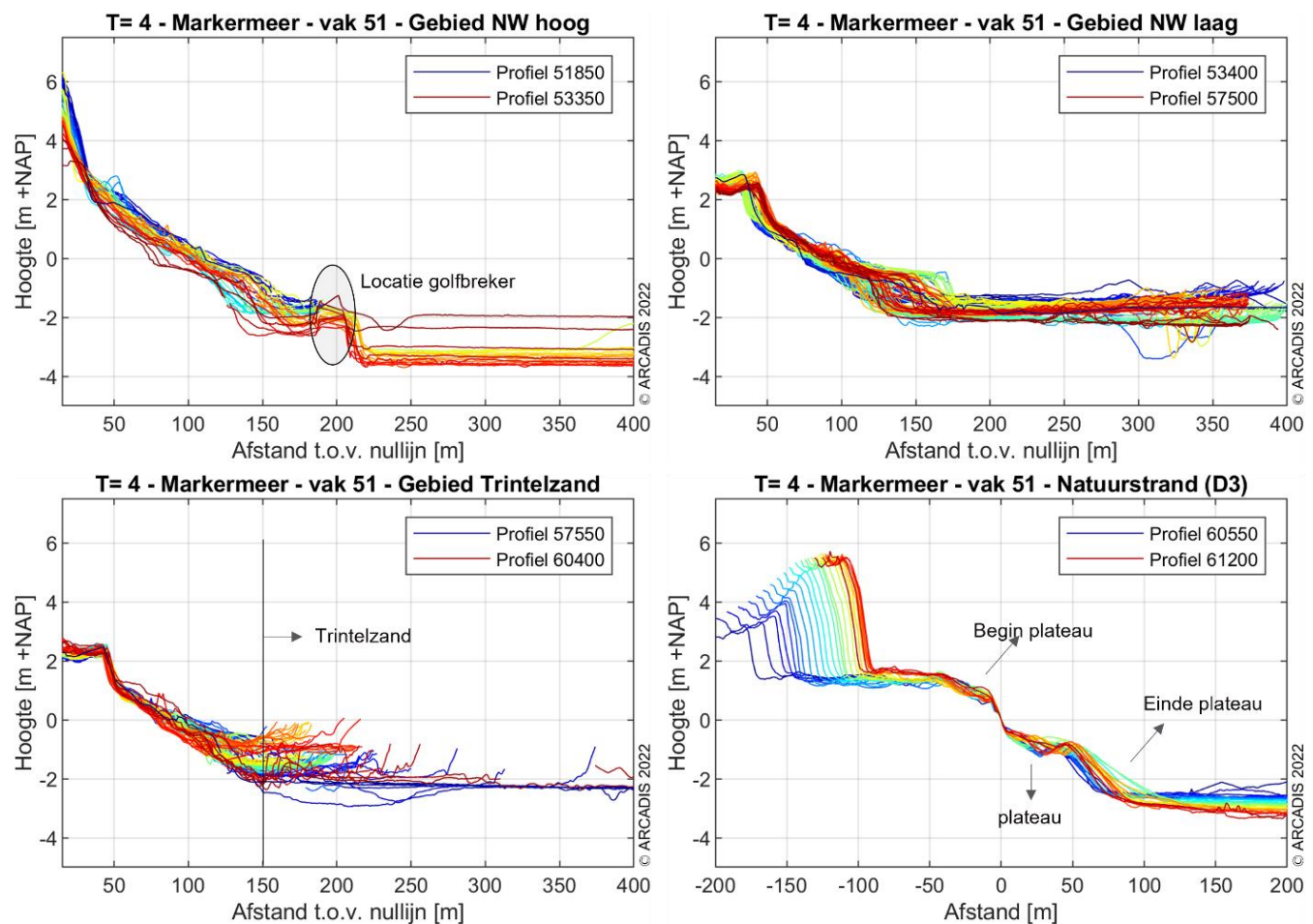


Figuur 2-9 Kustlangse variatie in dwarsprofielen, Markermeerzijde (vak 51) op meetmoment T4 (maart 2020). De raainummers van het eerste en laatste profiel zijn in de legenda getoond.

In Figuur 2-9 zijn alle profielen aan de Markermeerzijde op meetmoment T4 (maart 2020) over elkaar heen gelegd. De Markermeerzijde van de Houtribdijk is kustlangs minder uniform dan de IJsselmeerzijde (Figuur 2-7). Grofweg kunnen

de profielen op basis van de profielvorm opgedeeld worden in vier gebieden (zie Figuur 2-10 voor de profielen per gebied):

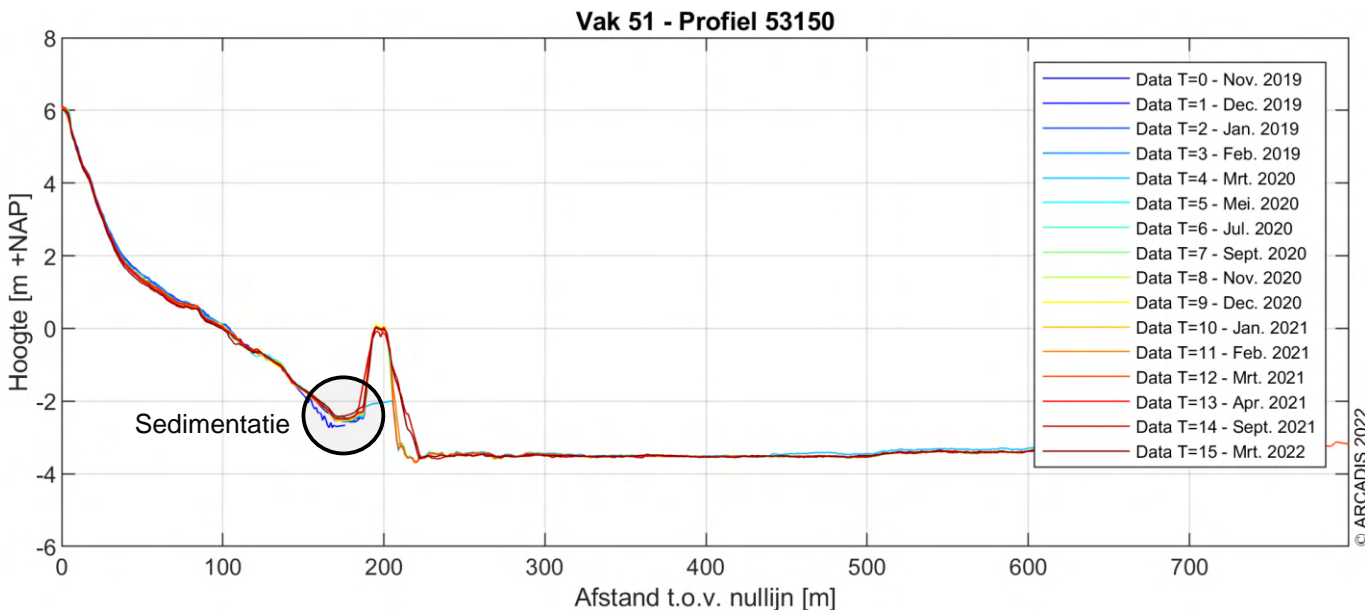
1. **MM NW hoog:** Het noordwestelijke gebied waarin Detailgebied 4 valt en wat gekenmerkt wordt door een hoog profielbegin ( $\pm$ NAP+6 m), en een golfbreker op 200 m t.o.v. de nullijn (wegdek).
2. **MM NW laag:** Het noordwest gebied wat gekenmerkt wordt door een laag profielbegin ( $\pm$ NAP+2,5 m), en een golfbreker tussen  $\pm$ 180 en  $\pm$ 400 m t.o.v. de nullijn. Er is hier een relatief smal plateau aanwezig.
3. **MM Trintelzand:** Het gebied wat gekenmerkt wordt door Trintelzand. In dit gebied is er ook een laag profielbegin ( $\pm$ NAP+3 m) en een zandige bredere barrière in plaats van een golfbreker aan de meerzijde van de profielen. Langs de buitenrand van Trintelzand is een harde constructie aanwezig die het gebied beschermt tegen golfaanval vanuit het Markermeer.
4. **MM Natuurstrand:** Detailgebied 3. Dit gebied wordt gekenmerkt door een hoog profielbegin ( $\pm$ NAP+5 m), een vlak strand rond NAP+1 m en een plateau rond de NAP-1 m. Hier is, als enige gebied langs de Markermeerzijde, kustlangs geen golfbreker of andere barrière aanwezig. Wel is er aan weerszijden kustdwars een strekdam aanwezig.



Figuur 2-10 De profielen van meetmoment T4 (maart 2020) langs de Markermeerzijde opgedeeld in 4 gebieden waarvan de profielvorm overeenkomt. De golfbrekers zijn niet duidelijk zichtbaar omdat deze niet zijn ingemeten op T4.

**MM NW hoog**

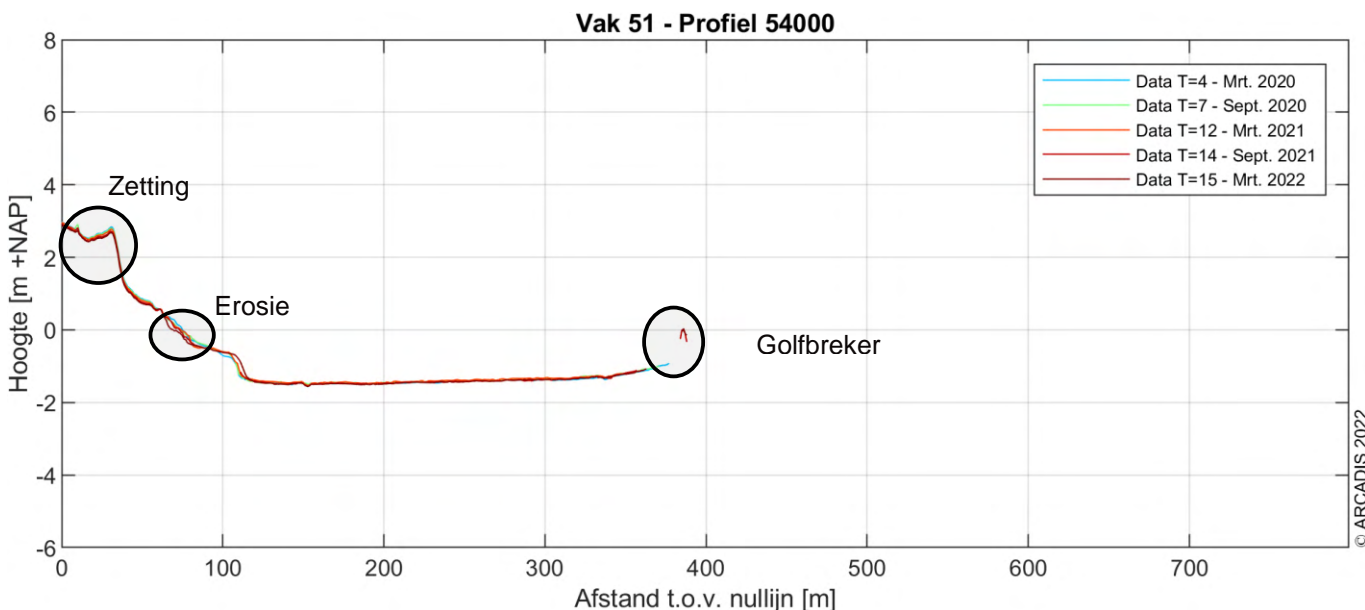
In Detailgebied 4 aan de noordwestzijde van de Houtribdijk is erosie zichtbaar in de profielen tussen NAP+2 m en NAP-1,5 m (Figuur 2-11 en Bijlage C, profiel 52750). Sedimentatie is zichtbaar aan de landzijde van de golfbreker. Dat deze erosie in dit hele gebied plaatsvindt is goed zichtbaar in de cumulatieve erosie en sedimentatie geplot in Figuur 2-27. Ook zal dit terugkomen in de volumeverandering in sectie 2.3.3.3.



Figuur 2-11 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 53150. Detailgebied 4.

**MM NW laag**

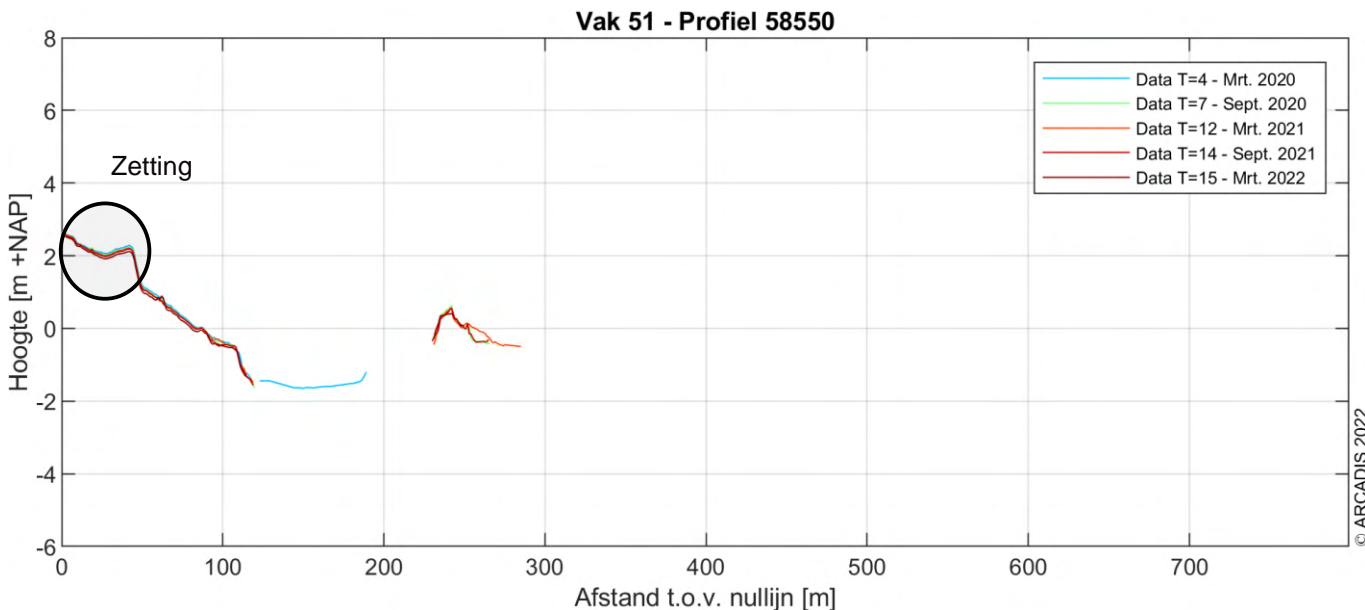
In het gebied ten zuiden van Detailgebied 4 vindt weinig morfologische verandering plaats, mede als gevolg van de aanwezigheid van de langsdammen/golfbrekers (Figuur 2-12 en Bijlage C, profiel 55275 en 57050). Er is enige erosie zichtbaar rond de NAP-contourlijn en aan de landzijde is enige zetting zichtbaar. De erosie rond de NAP-contourlijn zal ook terugkomen in de volumeverandering (sectie 2.3.3.3).



Figuur 2-12 Vak 51, Markermeer, profiel 54000.

**MM Trintelzand**

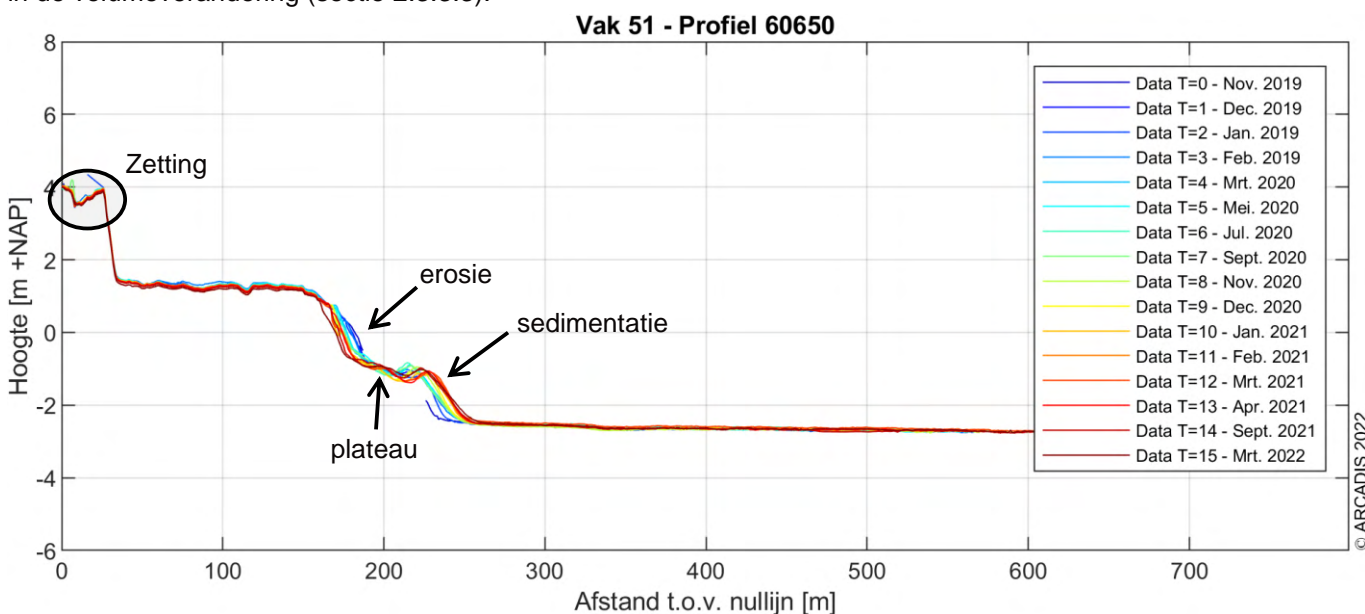
Het zandige gedeelte bij Trintelzand is rond de NAP-1,5 m dieptecontour alleen op T4 gemeten (Figuur 2-13). Hierdoor is er een groot gat zichtbaar voor de andere meetmomenten tussen 120 m en 220 m t.o.v. de nullijn waardoor de morfologische ontwikkeling daar niet bepaald kan worden. Hoger in het profiel, boven de NAP+1,5 m is enige erosie en/of zetting te zien. Tussen de 1 m en -1 m NAP er weinig tot geen erosie zichtbaar.



Figuur 2-13 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 58550.

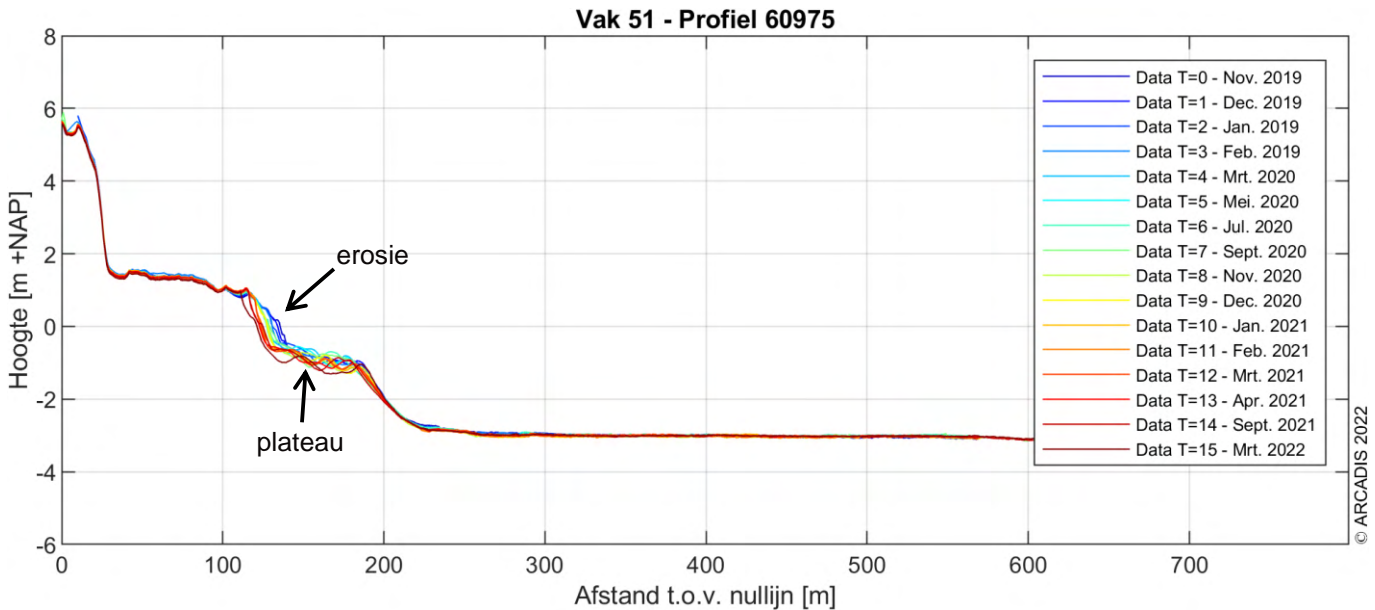
**MM Natuurstrand**

Het natuurstrand heeft als enige gebied langs de Markermeerzijde een duidelijk plateau in de dwarsprofielen (Figuur 2-14, Figuur 2-15 en Bijlage C, profiel 61250) dat zich, net zoals aan de IJsselmeerzijde, verbreedt in de meetperiode. Het plateau is gelegen rond een diepte van NAP-1 m en neemt gemiddeld genomen toe in breedte van ±50 naar ±60 m tussen maart 2020 en maart 2022. Aan de landzijde van het plateau is erosie zichtbaar in de dwarsprofielen. Aan de meerzijde van het plateau is sedimentatie zichtbaar voor alleen de profielen aan de flanken van het natuurstrand. Dit zijn de profielen dicht bij de dwarsdammen (Figuur 2-14 en Bijlage C, profiel 61250). In het midden van het natuurstrand is er dus geen sedimentatie zichtbaar (Figuur 2-15). Dit is ook goed zichtbaar in Figuur 2-28 en zal wederom terugkomen in de volumeverandering (sectie 2.3.3.3).



Figuur 2-14 Vak 51, Markermeer, profiel 60650. Detailgebied 3.



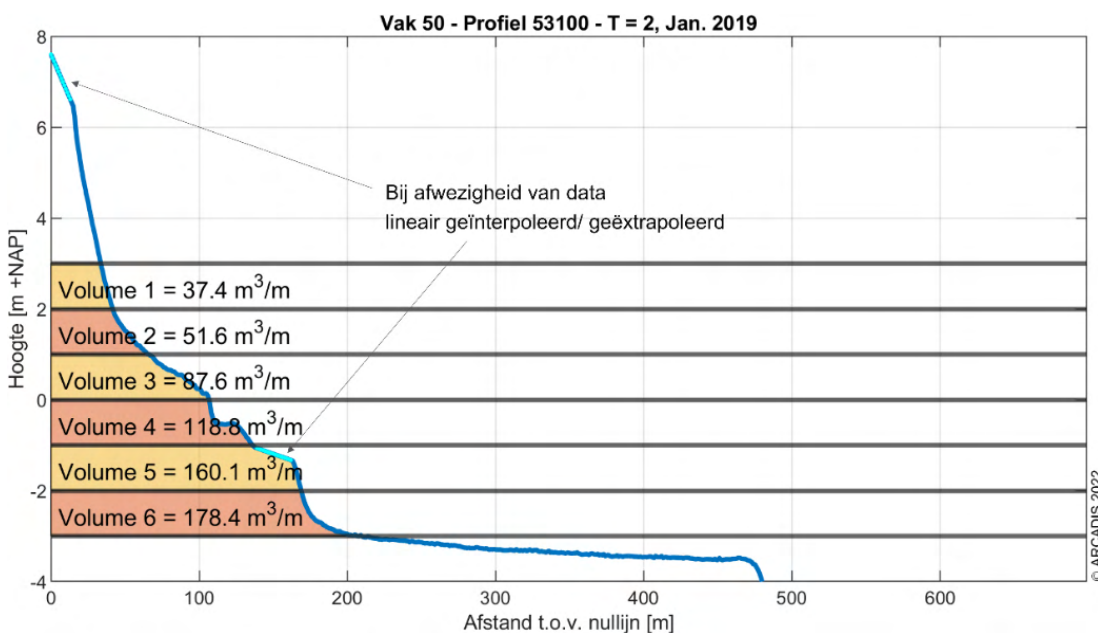


Figuur 2-15 Vak 51, Markermeer, profiel 60975. Detailgebied 3.

### 2.3.3 Volumeveranderingen

#### 2.3.3.1 Inleiding

In deze sectie is de volumeverandering bepaald ten opzichte van het volume in maart 2020 voor diepteschijven tussen 3 m, 2 m, 1 m, 0, -1 m, -2 m en -3 m NAP. Een voorbeeld van de bepaling van de volumes staat in Figuur 2-16. De horizontale dieptelijnen zijn hierin in het grijs afgebeeld met de berekende volumes gemeten ten opzichte van de nullijn tussen de lijnen. Bij de afwezigheid van bodemhoogtedata midden in het profiel is deze lineair geïnterpoleerd. Wanneer er bodemhoogte data miste aan de dijkzijde is deze geëxtrapoleerd. Er is geen data geëxtrapoleerd aan de meerzijde van de profielen. Wanneer er meer dan 20% data binnen een volumeschijf miste, is het volume niet meegenomen. Verder is voor de volumeverandering een voortschrijdend gemiddelde genomen, gebruikmakend van de twee naastgelegen waarden aan beide zijden.

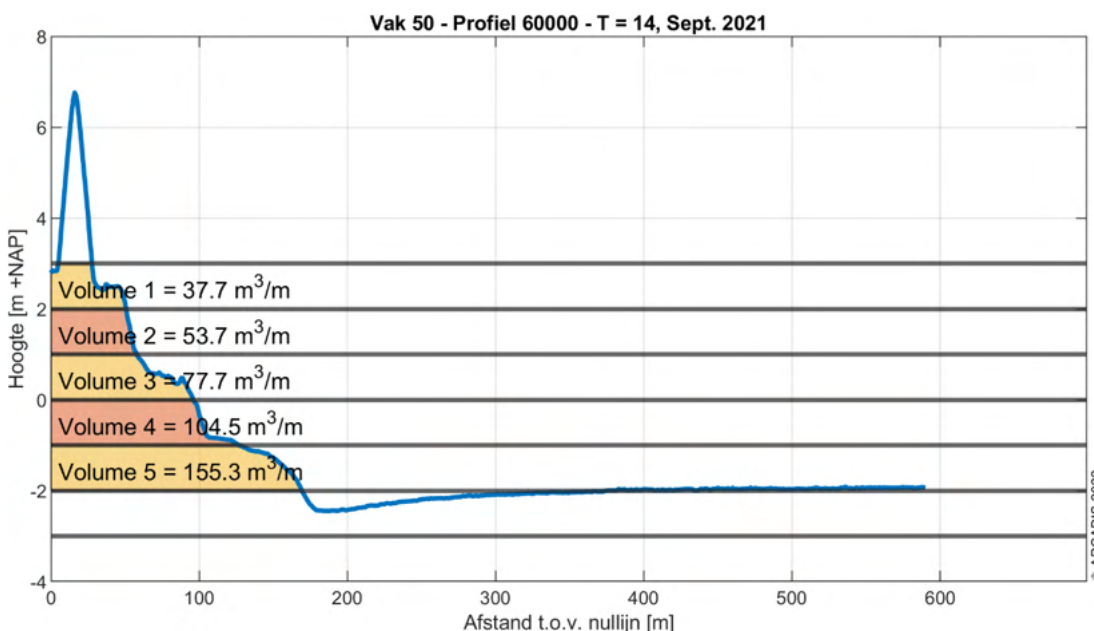


Figuur 2-16 Bepaling volumes binnen bepaalde volumeschijven.

Vervolgens is ook het bulkvolume per volumeschijf en per meetmoment bepaald. Met andere woorden, voor elke volumeschijf, bijvoorbeeld het volume tussen 2 m en 1 m NAP, is over de gehele Houtribdijk per zijde het cumulatieve volume berekend. Wanneer er voor meer dan 20% van de raaien op een bepaald meetmoment geen volume berekend kon worden (bijvoorbeeld door te veel missende datapunten) dan is het bulkvolume voor dit meetmoment buiten beschouwing gelaten. Daarnaast is ook nog specifiek gekeken naar de bulkvolumes binnen de Detailgebieden.

### 2.3.3.2 Resultaten IJsselmeerzijde – vak 50

Figuur 2-17 toont een typisch profiel aan de IJsselmeerzijde met de volumes in september 2021. Het is te zien dat het plateau grofweg is gelegen rond de overgang tussen volumeschijven 4 en 5 (rond de NAP-1 m). Deze hoogte is kenmerkend voor deze zijde van de Houtribdijk. Grofweg is er een afname in volume boven het plateau en een toename in volume onder het plateau. In Figuur 2-18 en Figuur 2-19 zijn respectievelijk de volumeschijven tussen de dieptelijnen tussen +1 m en 0 m NAP en tussen 0 en -1 m NAP getoond, dus de volumeschijven aan de bovenkant/boven het plateau. Er is een afname in volume door de tijd te zien waarvan de grootste afname is te zien direct boven het plateau, rond de waterlijn (tussen 0 en -1 m NAP). De volumeschijven onder het plateau, namelijk die tussen de dieptelijnen -1 m en -2 m NAP en tussen -2 m en -3 m NAP kennen een toename in de tijd. De volumeschijf direct onder het plateau (tussen -1 m en -2 m NAP, Figuur 2-20) laat de grootste toename zien.



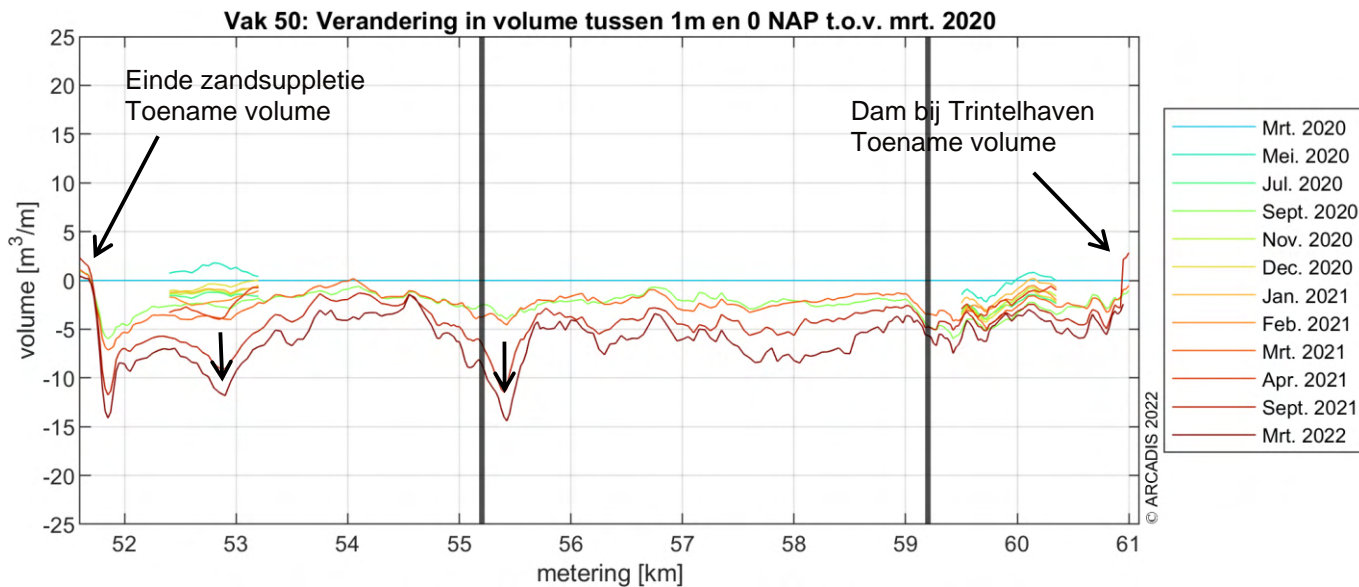
Figuur 2-17 Typisch profiel aan de IJsselmeerzijde (hetzelfde profiel als Figuur 2-8) met volumes op T-14 (september 2021).

De toename en afname per volumeschijf is duidelijk locatieafhankelijk. In het noordwesten van de Houtribdijk aan de IJsselmeerzijde (rond metering 51,9) is over alle volumeschijven tussen 1 m en -3 m NAP namelijk een kleine toename in volume te zien. Dit is het gebied waar het zandige gedeelte van de Houtribdijk afloopt en overgaat in de harde waterkering. Ditzelfde geldt ook voor het gebied richting het zuidoosten (richting Trintelhaven, rond metering 61). Hier is ook over alle volumeschijven een toename te zien.

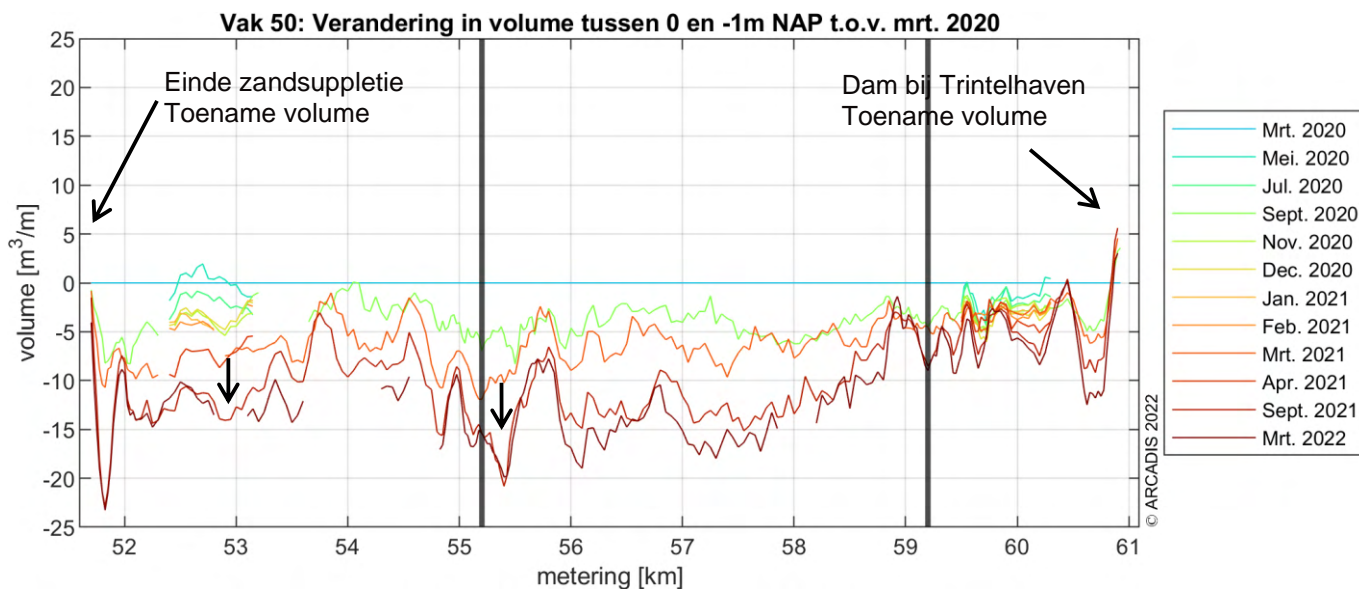
Verder is de verandering in volume tussen de dieptelijnen 1 m en 0 m NAP tussen metering 51,9 – 53,5 en rond metering 55,5 relatief groot (weergegeven met pijlen in Figuur 2-18). Hier is de afname in volume met name sneller tussen maart 2021 en september 2021. Een belangrijk gegeven hierbij is dat net ten noordwesten van metering 55,5 precies een knikpunt van de Houtribdijk aanwezig is (grijze verticale lijn in de figuren). Dezelfde trend is zichtbaar in de volumeschijf tussen 0 en -1 m NAP (Figuur 2-19). De volumetoename is echter niet op deze locaties te zien in de volumeschijf tussen de dieptelijnen -2 m en -1 m NAP (Figuur 2-20), maar juist wel in de gebieden naast metering 55,5. Dit suggereert een lokale herverdeling waarbij het zand zowel in de dwars- als in de langsrichting wordt getransporteerd. Een vergelijkbaar resultaat is te zien rond metering 52,9 waar een grote afname is te zien in volume tussen het plateau en de dijk (boven NAP-1 m), met juist een kleine toename in de volumeschijven onder het plateau (onder NAP-1 m, Figuur 2-20).



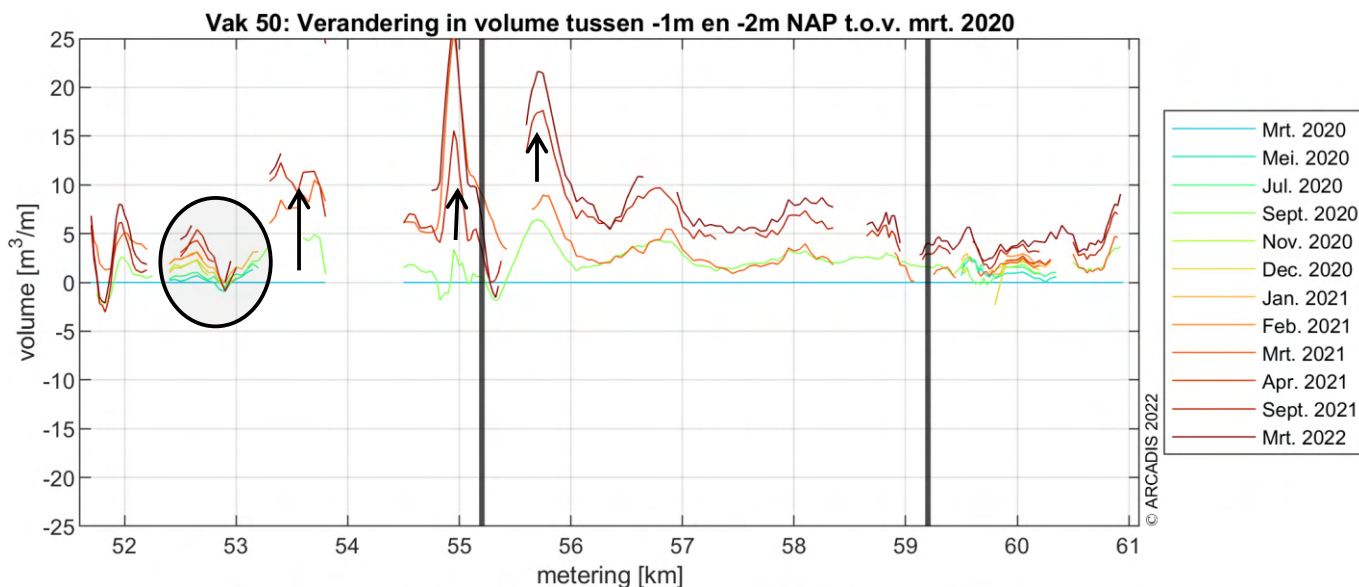
Tussen metering 59 en 61 (grotendeels Detailgebied 2) is relatief de minste volumeverandering aanwezig (ten opzichte van andere gedeelten van de Houtribdijk aan de IJsselmeerszijde). Dit correspondeert met het gebied tussen het knikpunt in de Houtribdijk rond metering 59 en een dwarsdam bij metering 61.



Figuur 2-18 De verandering in volume aan de IJsselmeerszijde tussen 1 m en 0 NAP t.o.v. het volume van maart 2020. Van de volumeverandering is hier een voortschrijdend gemiddelde gevisualiseerd gebruikmakend van de 2 naastgelegen punten aan beide zijden.



Figuur 2-19 De verandering in volume aan de IJsselmeerszijde tussen 0 en -1 m NAP t.o.v. het volume van maart 2020. Van de volumeverandering is hier een moving average gevisualiseerd gebruikmakend van de 2 naastgelegen punten aan beide zijden.



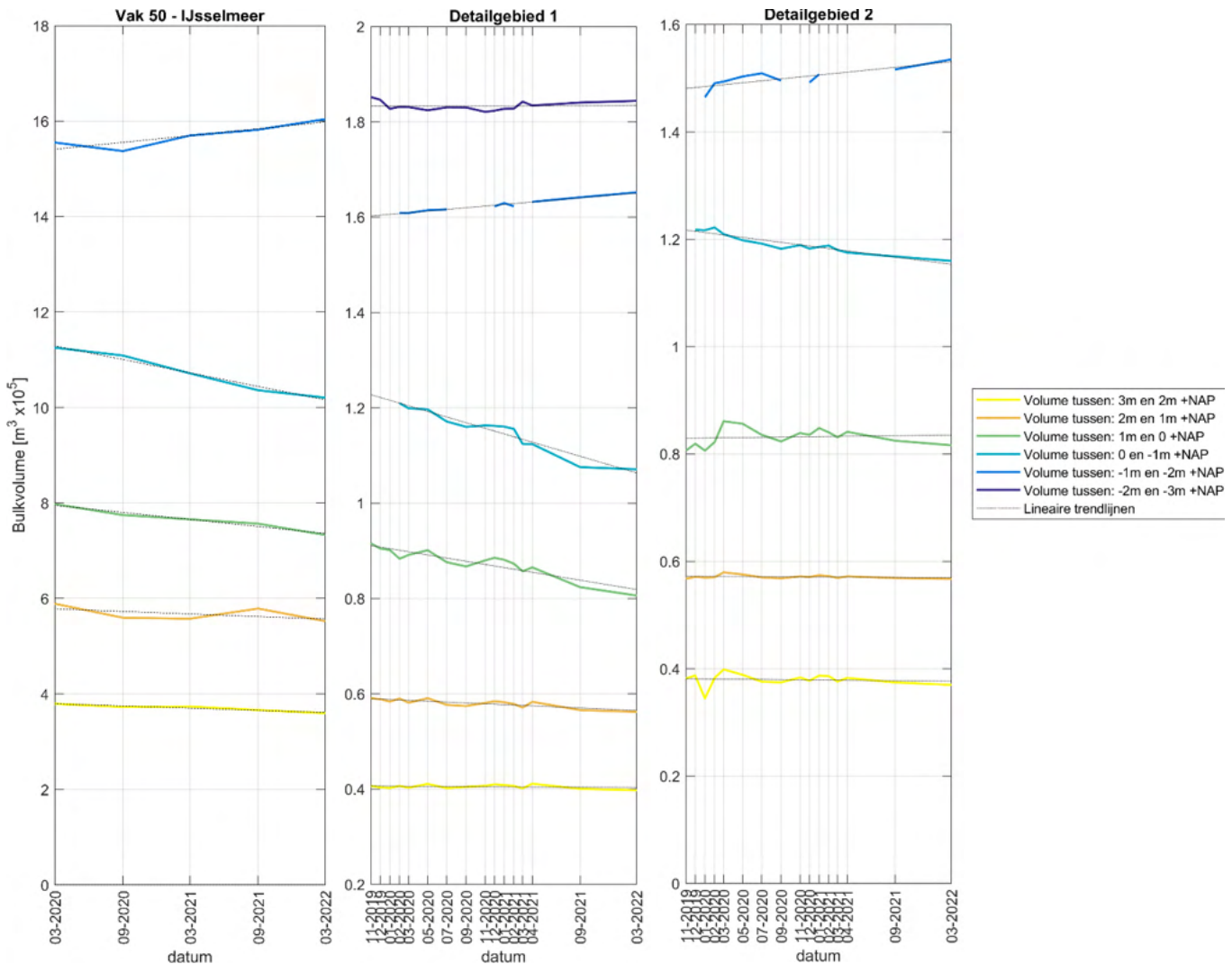
Figuur 2-20 De verandering in volume aan de IJsselmeerszijde tussen -1 m en -2 m NAP t.o.v het volume van maart 2020. Van de volumeverandering is hier een moving average gevisualiseerd gebruikmakend van de 2 naastgelegen punten aan beide zijden.

Figuur 2-21 toont de bulkvolumes per volumeschijf van de gehele Houtribdijkzijde en van detailgebied 1 en 2. Het is zichtbaar dat de bulkvolumes toenemen tussen -1 m en -3 m NAP (onder het plateau) en afnemen tussen 3 m en 1 m NAP-1 m (boven het plateau).

Door de verandering in bulkvolumes is een lineaire trend gefit, zie Figuur 2-21. Deze trendlijn maakt het mogelijk om de volumeverandering te kwantificeren voor de gehele meetperiode, ook als er bulkvolumes ontbreken. In Tabel 2-1 staat een overzicht van de verandering in bulkvolume op basis van de lineaire trendlijnen tussen maart 2020 en maart 2022. De keuze voor een lineaire trendlijn is gemaakt omdat dit de beste fit gaf. Er zijn dus geen indicaties voor een versnellende of vertragende morfologische verandering. In Tabel 2-1 is duidelijk zichtbaar dat tussen -1 m en -2 m NAP (onderwatertalud onder het plateau) de grootste toename aan volume plaatsvindt (~57.000 m<sup>3</sup>, over de gehele Houtribdijk). Tussen 0 en -1 m NAP (direct boven het plateau, rond de waterlijn) is de grootste afname te zien (-113.000 m<sup>3</sup>, over de gehele Houtribdijk). Voor de volumeschijven tussen 2 m en 0 NAP vindt cumulatief een afname van 81.000 m<sup>3</sup> plaats tussen maart 2020 en maart 2022. De volumeschijf tussen 3 m en 2 m NAP (afname van 18.000 m<sup>3</sup>) wordt verondersteld (een deel van) de zetting te zijn. In totaal is er meer erosie dan depositie, wat suggereert dat dit volumeverschil in zand in (nog) dieper water is terechtgekomen of ook zetting is.

Tabel 2-1 De totale volumeverandering in 1000 m<sup>3</sup> per volumeschijf tussen maart 2020 en maart 2022 voor de hele Houtribdijk aan de IJsselmeerszijde en de twee detailgebieden. Tussen haakjes is de gemiddelde volumeverandering in m<sup>3</sup>/m.

Dieptelijnen waartussen het bulkvolume is bepaald	$\Delta$ Volume [ $10^3$ m <sup>3</sup> ] (m <sup>3</sup> /m) Maart 2020 – 2022 Hele HRD	$\Delta$ Volume [ $10^3$ m <sup>3</sup> ] (m <sup>3</sup> /m) Maart 2020 – 2022 D1	$\Delta$ Volume [ $10^3$ m <sup>3</sup> ] (m <sup>3</sup> /m) Maart 2020 – 2022 D2
3 m en 2 m NAP	-18 (-1,9)	< -1 (-0,3)	< -1 (-0,4)
2 m en 1 m NAP	-22 (-2,3)	-2 (-1,9)	< -1 (-0,2)
1 m en 0 NAP	-59 (-6,2)	-8 (-7,2)	< +1 (+0,5)
0 en -1 m NAP	-113 (-11,9)	-14 (-12,8)	-5 (-5,5)
-1 m en -2 m NAP	+57 (+6,0)	+4 (+3,7)	+4 (+4,3)
-2 m en -3 m NAP	-	<1 (+0,1)	-

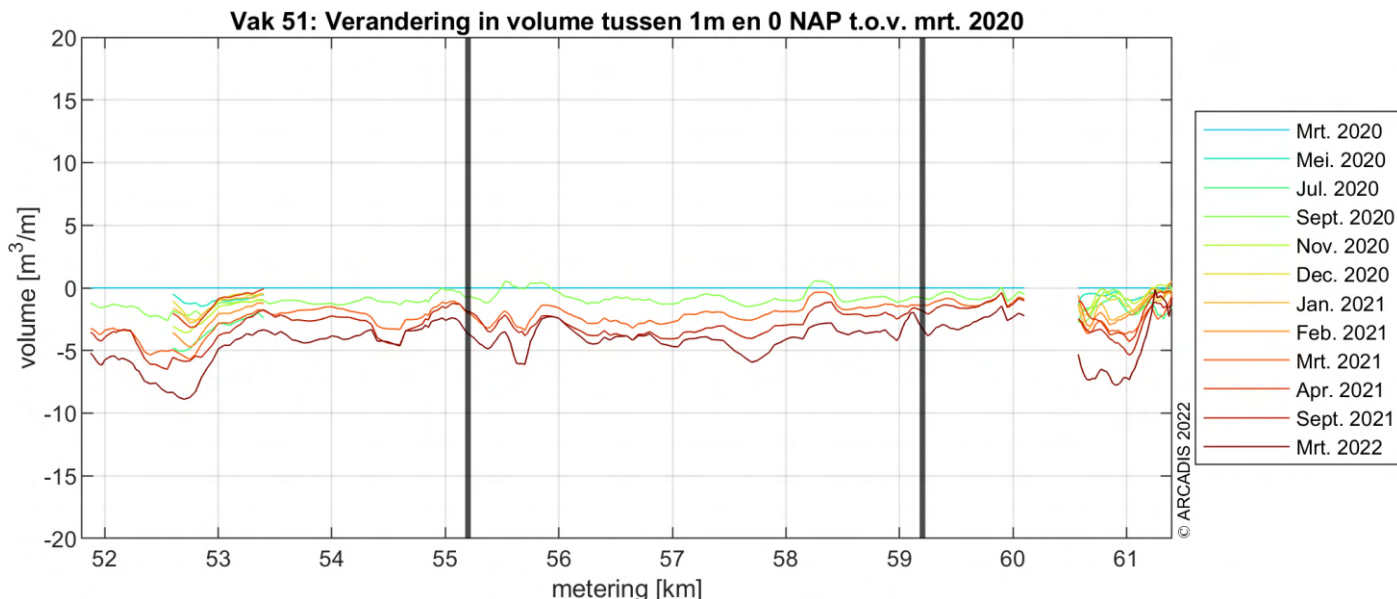


Figuur 2-21 De bulkvolumes per volumeschijf van de gehele Houtribdijk aan de IJsselmeerzijde per halfjaarlijks meetmoment (links). De bulkvolumes per volumeschijf van Detailgebied 1 en 2 per meetmoment (midden en rechts).

In Tabel 2-1 is tussen haakjes ook de gemiddelde volumeverandering in m³/m weergegeven. Hiermee kunnen de detailgebieden vergeleken worden met die van de gehele IJsselmeerzijde van de Houtribdijk. In detailgebied 1 zijn de gemiddelde volumeveranderingen vergelijkbaar met die van de hele dijk. Daarentegen is in detailgebied 2 gemiddeld minder erosie boven het plateau (boven NAP+1 m). Er is zelfs sprake van gemiddelde depositie in de volumeschijf tussen 1 m en 0 NAP, waarbij moet worden opgemerkt dat er door een trendbreuk relatief veel verschil zit tussen de lineaire trend en de gefitte data (rechter plot in Figuur 2-21, licht groene lijn): er lijkt hier sprake van depositie tot maart 2020 gevolgd door erosie.

### 2.3.3.3 Resultaten Markermeerzijde – vak 51

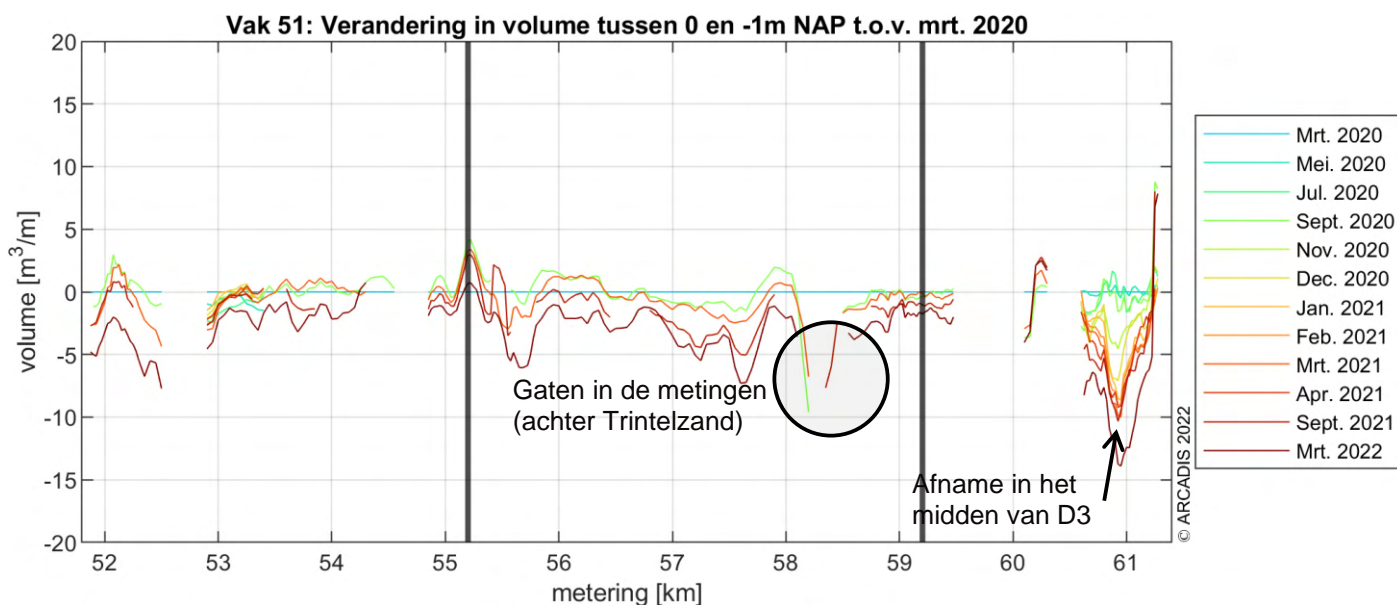
Over de gehele Markermeerzijde is een continue afname aan volume te zien tussen 1 m en 0 NAP (Figuur 2-22). Deze afname is relatief groot tussen metering 52 en 53 (Detailgebied 4) en metering 60,6 en 61,2 (Detailgebied 3) dan in het tussengelegen gedeelte van de Houtribdijk (tussen metering 53 en 60,4).



Figuur 2-22 De verandering in volume aan de Markermeerzijde tussen 1 m en 0 NAP t.o.v het volume van maart 2020. Van de volumeverandering is hier een moving average gevisualiseerd gebruikmakend van de 2 naastgelegen punten aan beide zijden.

Tussen de dieptelijnen 0 en -1 m NAP is kustlangs de verandering in volume op de meeste plekken beperkt (<5 m<sup>3</sup>/m) (Figuur 2-23). Alleen rond Trintelzand is er rond metering 58,2 een grotere afname in volume te zien. Dit is echter ook een locatie waar er weinig is gemeten rond deze diepte waardoor er veel gaten in de data zitten (Bijlage A). Daarom zal dit gebied niet verder meegenomen worden in de beschouwing.

Rond Detailgebied 3, tussen metering 60,5 en 61,5 is er wel een relatief grote afname in het volume te zien. De meeste afname is zichtbaar in het midden van Detailgebied 3 (metering 60,9; zie pijl), wat ook zichtbaar is in de dwarsprofielen van sectie 2.3.2.3.



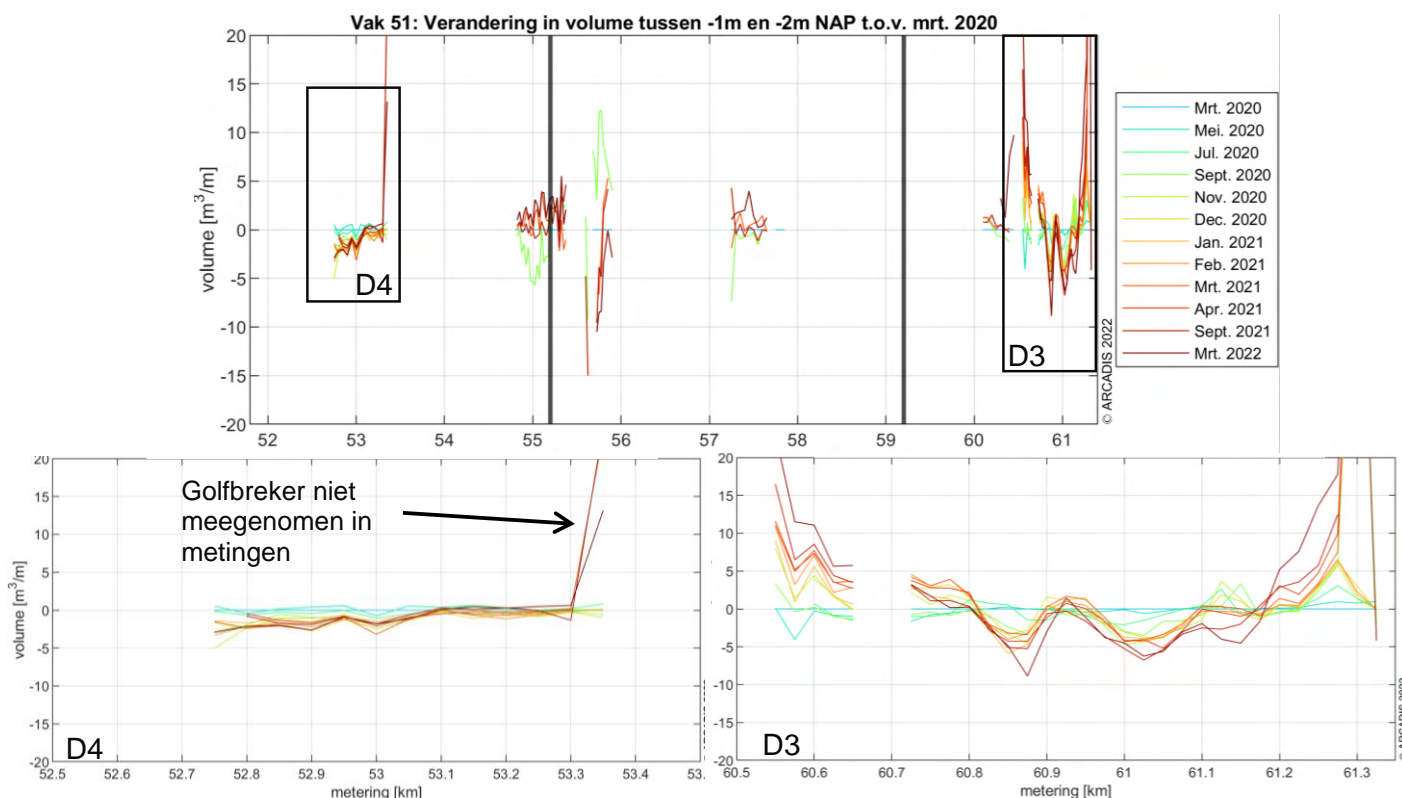
Figuur 2-23 De verandering in volume aan de Markermeerzijde tussen 0 en -1 m NAP t.o.v het volume van maart 2020. Van de volumeverandering is hier een moving average gevisualiseerd gebruikmakend van de 2 naastgelegen punten aan beide zijden.



In Figuur 2-24 is te zien dat de volumeschijf tussen -1 m en -2 m NAP op veel plekken in het midden van de Houtribdijk niet kon worden bepaald. Hier lopen de dwarsprofielen niet voldoende diep door (zie sectie 2.3.2.3). Voor de beide detailgebieden zijn de dwarsprofielen wel tot minstens -2 m NAP ingemeten, en zijn daarom uitgelicht in Figuur 2-24.

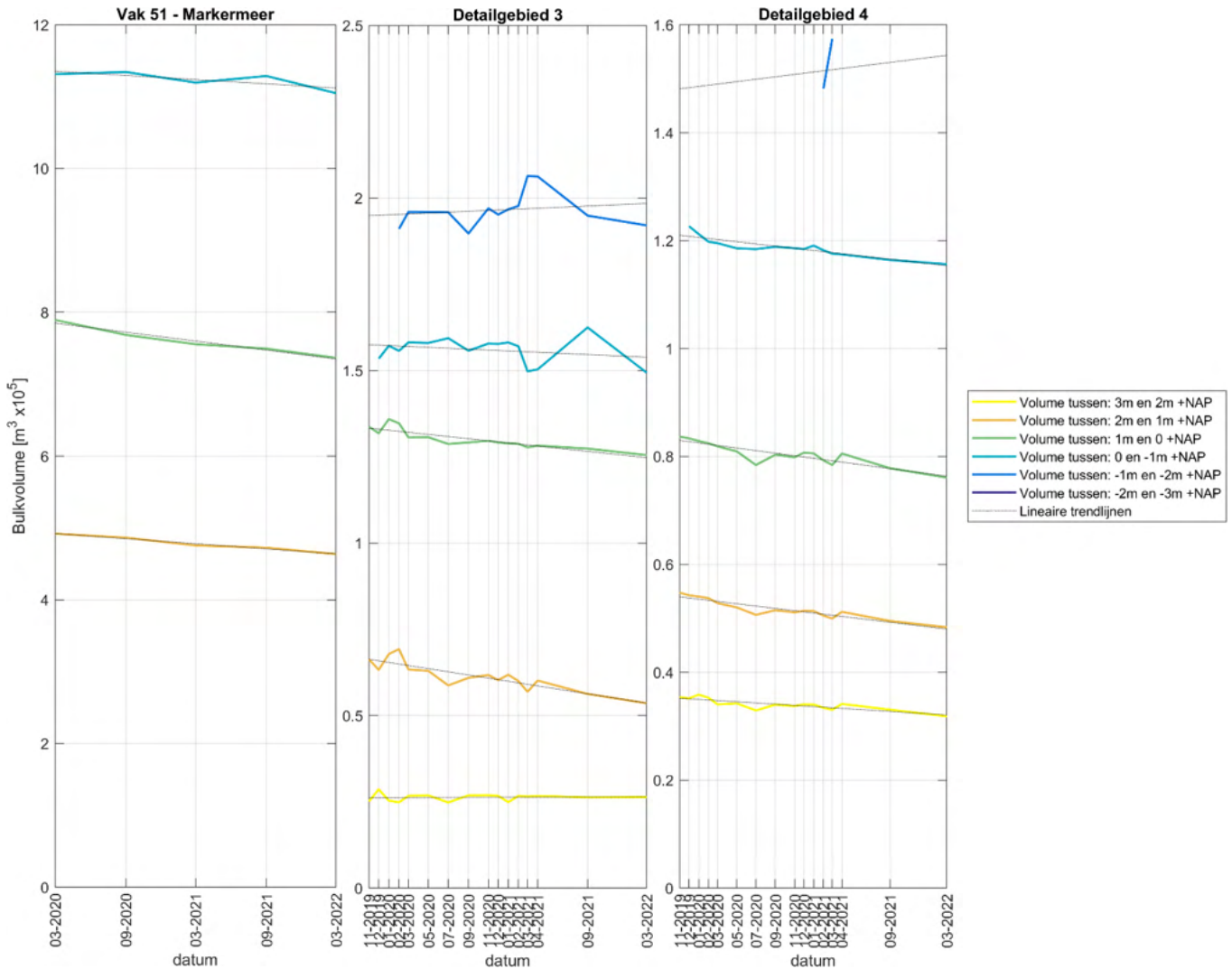
In Detailgebied 4 is rond metering 53,35 een toename in het volume te zien ten opzichte van maart 2020. Dit is geen morfologische verandering, maar komt doordat in maart 2020 de golfbreker niet is meegenomen in de metingen. In detailgebied 4 vindt dus een afname aan volume in deze volumeschijf tussen -1 m en -2 m NAP plaats.

In detailgebied 3 is, net zoals bij de profielen, een toename in volume te zien aan de flanken van het gebied. In het midden is er een kleine afname in het volume. De toename in het volume komt overeen met de uitbouw van het plateau zoals te zien in de dwarsprofielen van sectie 2.3.2.3.



Figuur 2-24 De verandering in volume aan de Markermeerzijde tussen -1 m en -2 m NAP t.o.v het volume van maart 2020. De detailgebieden zijn daarnaast uitgelicht.

Figuur 2-25 toont tenslotte de bulkvolumes van de gehele Houtribdijk aan de Markermeerzijde en Detailgebied 3 en 4. Tabel 2-2 toont de cumulatieve en gemiddelde verandering over de gehele meetperiode op basis van een lineaire fit. In dit figuur is zichtbaar dat over de gehele Houtribdijk de bulkvolumes afnemen tussen 2 m en -1 m NAP. Dit beeld is ook zichtbaar in Detailgebied 3 en 4, waarbij de erosie in Detailgebied 3 gemiddeld grofweg twee keer zo snel gaat. Voor de gehele Houtribdijk was het helaas niet mogelijk om het bulkvolume tussen -1 en -2 m NAP te bepalen omdat er te veel profielen te ondiep zijn (>10%). Dit was wel mogelijk voor detailgebied 3. In dit gebied is een toename te zien voor deze volumeschijf, wat overeenkomt met de uitbouw van het plateau (~3.000 m<sup>3</sup>, Tabel 2-2). Ook is het bulkvolume tussen 3 m en 2 m NAP, welke een deel van de zetting vertegenwoordigt, enkel te bepalen voor de detailgebieden 3 en 4 omdat hier de dwarsprofielen voldoende hoog genoeg doorlopen. In detailgebied 4 is een afname in het bulkvolume te zien (-3.000 m<sup>3</sup>, Tabel 2-2) en in detailgebied 3 een verwaarloosbare toename (minder dan 1.000 m<sup>3</sup>, Tabel 2-2).



Figuur 2-25 De bulkvolumes per volumeschijf van de gehele Houtribdijk aan de Markermeerzijde per halfjaarlijks meetmoment (links). De bulkvolumes per volumeschijf in detailgebied 3 en detailgebied 4 voor alle meetmomenten (midden en rechts).

Tabel 2-2 De volumeverandering in 1000 m³ per volumeschijf tussen maart 2020 en maart 2022 voor de hele Houtribdijk aan de Markermeerzijde en de twee detailgebieden. Tussen haakjes is de gemiddelde volumeverandering in m³/m.

Dieptelijnen waartussen het bulkvolume is bepaald	$\Delta$ Volume [ $10^3$ m <sup>3</sup> ] (m <sup>3</sup> /m) Maart 2020 – 2022 Hele HRD	$\Delta$ Volume [ $10^3$ m <sup>3</sup> ] (m <sup>3</sup> /m) Maart 2020 – 2022 D3	$\Delta$ Volume [ $10^3$ m <sup>3</sup> ] (m <sup>3</sup> /m) Maart 2020 – 2022 D4
3 m en 2 m NAP	-	< 1 (0,3)	-3 (-2,3)
2 m en 1 m NAP	-28 (-3,0)	-11 (-12,1)	-5 (-4,5)
1 m en 0 NAP	-50 (-5,2)	-7 (-8,2)	-6 (-5,0)
0 en -1 m NAP	-23 (-2,4)	-3 (-3,5)	-5 (-4,2)
-1 m en -2 m NAP	-	+3 (+3,4)	+5 (+4,6)
-2 m en -3 m NAP	-	-	-



### 2.3.4 Aanwezigheid insteffecten

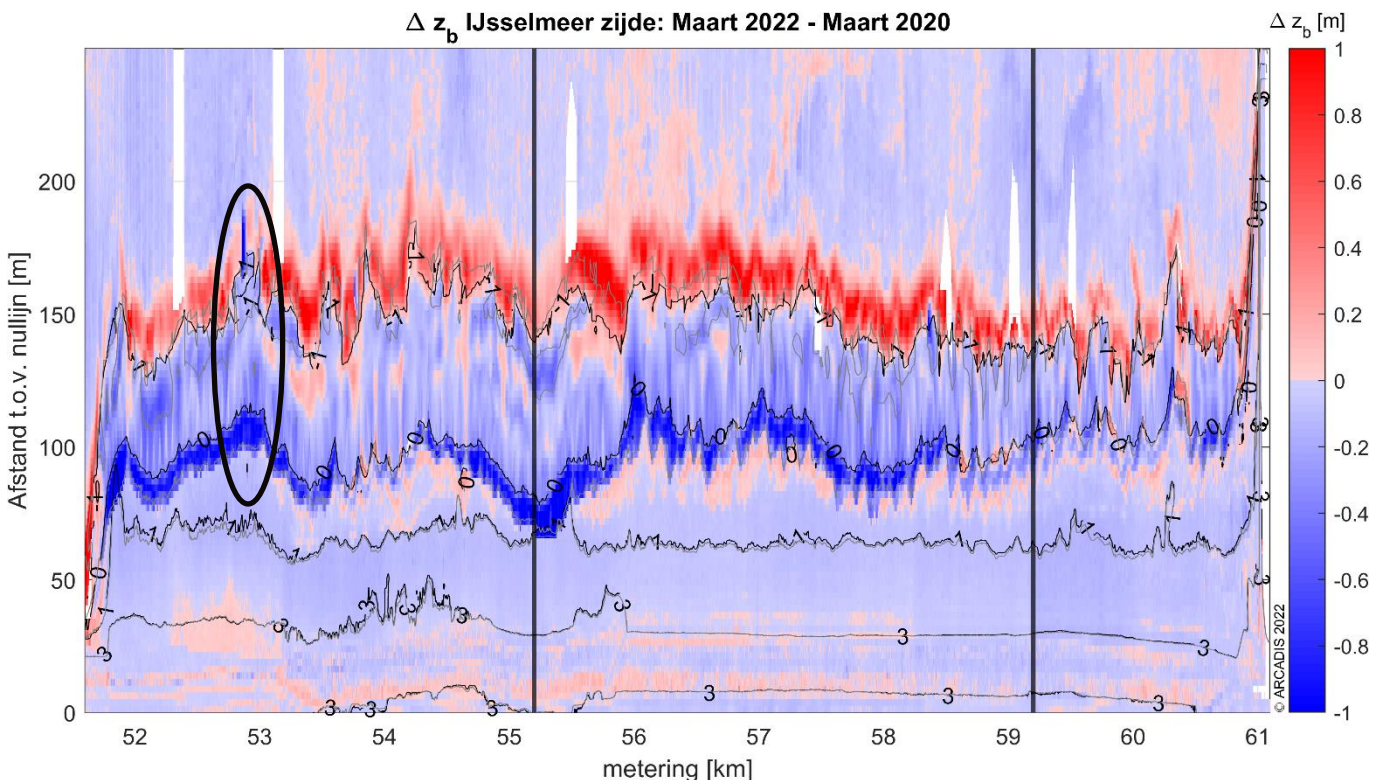
Er zijn geen indicaties van inste-effecten in de bodemhoogte data tussen november 2019 en maart 2022. Aan beide zijden van de Houtribdijk is structurele erosie te zien. Dit is het beste zichtbaar in de bulkvolumeveranderingen per volumeschijf in Figuur 2-21 en Figuur 2-25. Hierin is aan het begin van de meetperiode geen duidelijk snellere volumeverandering zichtbaar ten opzichte van het einde van de meetperiode. De trend is redelijk lineair wat overeenkomt met structurele erosie, zonder duidelijk waarneembare inste-effecten.

### 2.3.5 Ontwikkeling profielvorm (plateau)

#### 2.3.5.1 Resultaten IJsselmeerzijde – vak 50

Aan de IJsselmeerzijde bevindt zich over het gehele zandige gedeelte een plateau. Dit is het relatief vlakke deel van het profiel onder de waterlijn, rond NAP-1 m, op ±140 m t.o.v. de nullijn. Grofweg is er een afname in volume aan de bovenkant van het plateau (talud rond de waterlijn) en een toename in volume op het onderwatertalud richting de oorspronkelijke meerbodem. Het plateau wordt breder gedurende de periode november 2019 (T0) en maart 2022 (T15) van ±50 naar ±65 m. Dit is zowel in de dwarsprofielen zichtbaar als in de volumeveranderingen (secties 2.3.2.3 en 2.3.3.2). De oorzaak van de plateauverbreding is de erosie aan de bovenkant van het plateau en de sedimentatie op het onderwatertalud onder het plateau. Richting het noordwesten van deze zijde van de Houtribdijk verbreedt het plateau zich sneller dan richting het zuidoosten omdat de erosie en depositie hier hoger is.

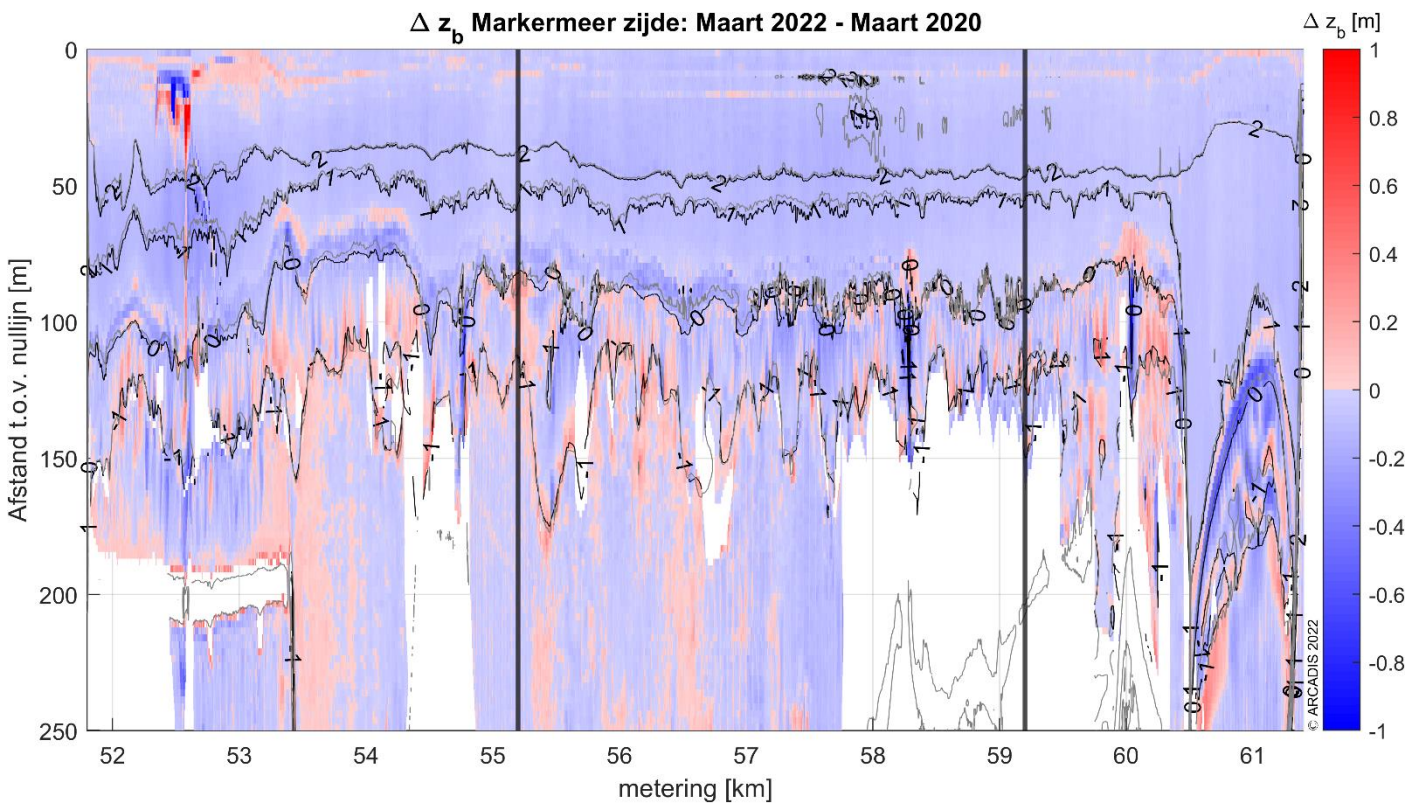
In Figuur 2-26 is de cumulatieve erosie en sedimentatie zichtbaar tussen maart 2020 en september 2021. Hierin is de sedimentatie aan de IJsselmeerzijde, de rode band, duidelijk zichtbaar. De erosie aan de bovenkant van het plateau is duidelijk zichtbaar als de donkerblauwe band. Het plateau ligt tussen de donkerblauwe en donkerrode band.



Figuur 2-26 De cumulatieve erosie en sedimentatie aan de IJsselmeerzijde tussen meetmoment T4 (maart 2020) en T15 (maart 2022) geïnterpoleerd naar het grid. De verticale dikke zwarte lijnen representeren de knikpunten van de Houtribdijk. De zwarte lijnen zijn contourlijnen van de bodemhoogte op meetmoment T4 en de grijze lijnen zijn contourlijnen van de bodemhoogte op meetmoment T15.

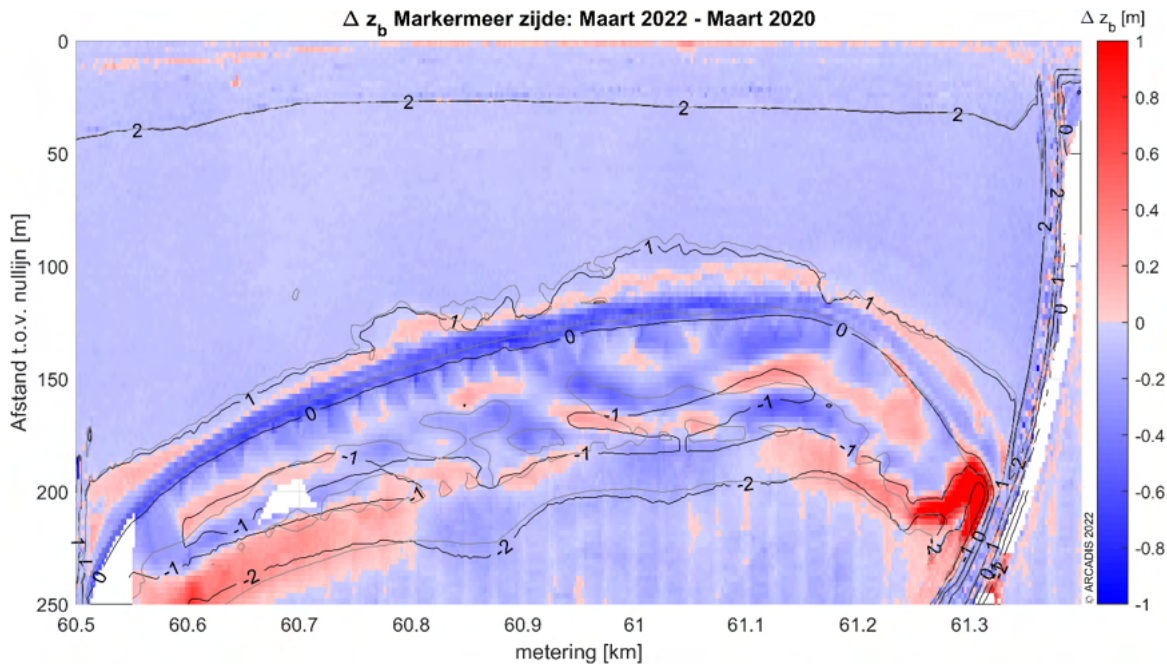
### 2.3.5.2 Resultaten Markermeerzijde - vak 51

Over de gehele Markermeerzijde is er erosie boven de NAP-1 m. Er is weinig sedimentatie zichtbaar. Buiten detailgebied 3 is alleen in het meest vlakke gebied in de profielen een minieme hoeveelheid sedimentatie zichtbaar (lichtrode vlakken in Figuur 2-27). De meest duidelijke sedimentatie is in detailgebied 3 (het natuurstrand). In dit detailgebied is ook, als enige gebied langs deze zijde van de Houtribdijk een duidelijk plateau aanwezig. Dit plateau ligt op een diepte van NAP-1 m tussen 150 en 220 m t.o.v. de nullijn en is in Figuur 2-29 conceptueel weergegeven. De afstand ten opzichte van de nullijn verschilt omdat het natuurstrand in een boog loopt. Dit is duidelijk zichtbaar in de cumulatieve erosie en sedimentatie tussen maart 2020 en september 2021 (Figuur 2-28). Het plateau neemt toe in breedte van ±50 naar ±60 m tussen maart 2020 en maart 2022. Dit is zichtbaar in Figuur 2-28 als de donkerrode plekken.

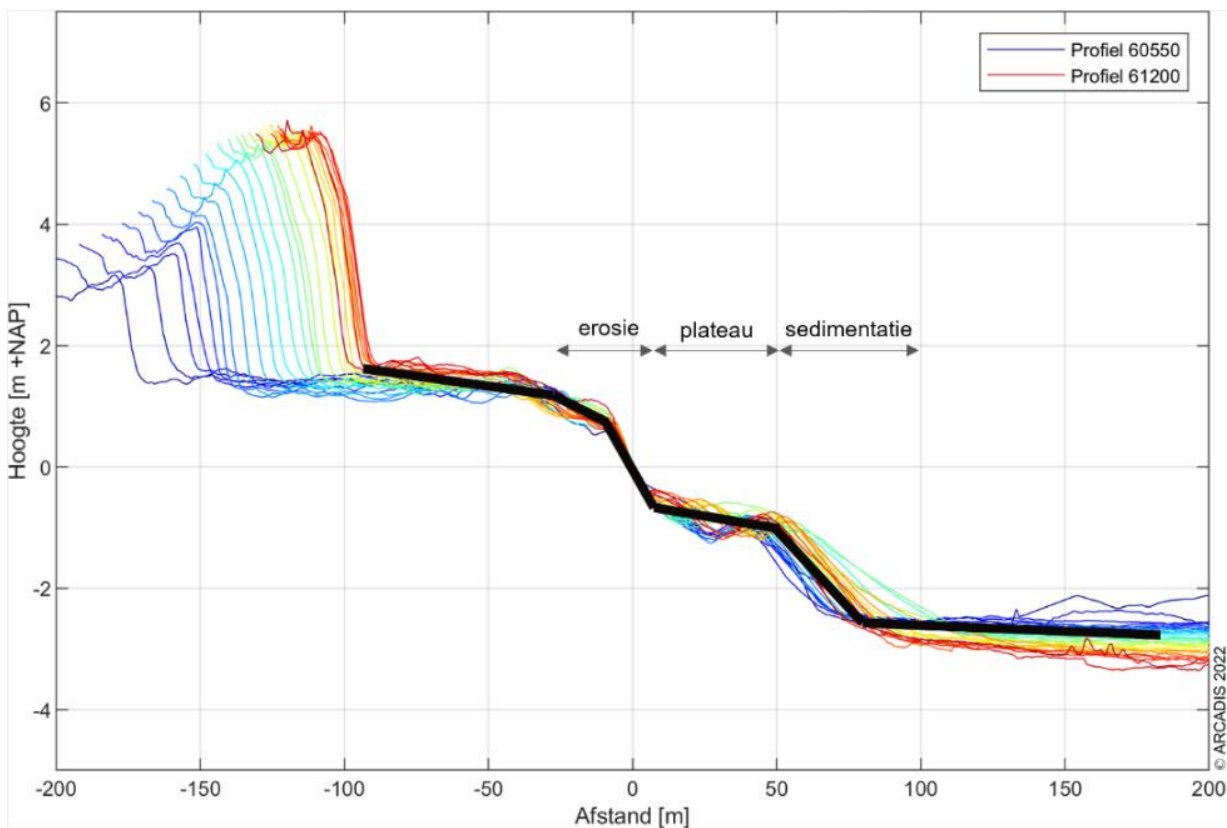


*Figuur 2-27 De cumulatieve erosie en sedimentatie aan de Markermeerzijde tussen meetmoment T4 (maart 2020) en T15 (maart 2022) geïnterpoleerd naar het grid. De verticale dikke zwarte lijnen representeren de knikpunten van de Houtribdijk. De zwarte lijnen zijn contourlijnen van de bodemhoogte op meetmoment T4 en de grijze lijnen zijn contourlijnen van de bodemhoogte op meetmoment T15.*





Figuur 2-28 De cumulatieve erosie en sedimentatie aan de Markermeerzijde (detailgebied 3) tussen meetmoment T4 (maart 2020) en T15 (maart 2022) geïnterpoleerd naar het grid. De verticale dikke zwarte lijnen representeren de knikpunten van de Houtribdijk. De zwarte lijnen zijn contourlijnen van de bodemhoogte op meetmoment T4 en de grijze lijnen zijn contourlijnen van de bodemhoogte op meetmoment T15.



Figuur 2-29 Het plateau in detailgebied 3 o.b.v. de profielen van meetmoment T4 (maart 2020). De gebieden waar erosie en sedimentatie plaats vindt is conceptueel weergegeven. De profielen zijn over elkaar heen gelegd ten opzichte van het snijpunt met de NAP-contour.

## 2.3.6 Indicatie dwarstransport

### 2.3.6.1 Resultaten IJsselmeerzijde – vak 50

Erosie treedt op aan de bovenkant van het plateau rond de waterlijn en depositie treedt op bij het onderwatertalud onder het plateau. Dit proces geeft een indicatie voor dwarstransport. Tabel 2-3 geeft de volumeverandering per strekkende meter per jaar. Tussen 1 m en -1 m NAP erodeert tussen maart 2020 en maart 2022 ongeveer 172.000 m<sup>3</sup> langs de gehele Houtribdijk aan de IJsselmeerzijde (Zie Tabel 2-1). Dit komt neer op circa -9,1 m<sup>3</sup>/m/jaar. Nog hoger in het profiel, tussen de 3 m en 1 m NAP is er een kleinere afname in volume, circa -2,1 m<sup>3</sup>/m/jaar. Dit is een deel van de zetting, wat zal worden uitgewerkt in sectie 4.3.1. Tussen de dieptelijnen -1 m en -2 m NAP komt er in dezelfde periode ongeveer 57.000 m<sup>3</sup> bij, wat neerkomt op +3,0 m<sup>3</sup>/m/jaar.

Onder -2 m NAP vindt ook een toename in volume plaats. Deze is echter niet te kwantificeren omdat de metingen niet ver genoeg doorlopen.

**Detailgebied 1:** Tussen 1 m en -1 m NAP neemt het volume met 10,0 m<sup>3</sup>/m/jaar af (direct boven plateau). Tussen NAP+1 en NAP+3 m neemt het volume minder af, met -1,1 m<sup>3</sup>/m/jaar. Tussen de dieptelijnen -1 m en -2 m NAP neemt het volume met 1,9 m<sup>3</sup>/m/jaar toe (op het onderwatertalud onder plateau). Deze trends komen grofweg overeen met de gemiddelde waarden aan de IJsselmeerzijde. Het belangrijkste verschil is dat er relatief minder depositie is onder het plateau en dus meer zand naar diepere gebieden wordt getransporteerd.

**Detailgebied 2:** In dit gebied is de erosie aan de bovenkant van het plateau (tussen 1 m en -1 m NAP) met -2,5 m<sup>3</sup>/m/jaar veel minder sterk dan gemiddeld aan deze zijde van de Houtribdijk. Daarentegen is de depositie op het onderwatertalud onder het plateau (tussen -1 m en -2 m NAP) vergelijkbaar. Waarschijnlijk zorgt de havendam (zie Figuur 2-4) hier voor een gradiënt in langstransport, waardoor de erosie (deels) gecompenseerd wordt. Daardoor is er waarschijnlijk ook geen sprake van volumebalans in de dwarsrichting.

De gemiddelde waarden voor de IJsselmeerzijde en detailgebied 1 representeren de gemiddelde toename en afname in de dwarsrichting en worden verondersteld grofweg gelijk te zijn aan het netto dwarstransport. Hier wordt de aanname gedaan dat kustlangse variaties in de volumeveranderingen – bijvoorbeeld bij detailgebied 2 - worden veroorzaakt door of (1) kustlangse variatie in netto dwarstransport (bijvoorbeeld andere hydraulische belasting) of (2) gradiënten in langstransport. Deze kustlangse variatie in volumeveranderingen, bijvoorbeeld in detailgebied 2, komen dan ook terug in de systeemanalyse (hoofdstuk 4) en in de indicatie langstransport (sectie 2.4.3).

Tabel 2-3 De volumeverandering per strekkende meter per jaar [m<sup>3</sup>/m/jaar] tussen maart 2020 en maart 2022 voor beide zijdes van Houtribdijk en de vier detailgebieden.

Volumeschijf	IJM	D1	D2	MM	D3	D4
3 m en 1 m NAP (zetting)	-2,1	-1,1	-0,3	-1,5	-5,9	-3,4
1 m en -1 m NAP (bovenkant plateau)	-9,1	-10,0	-2,5	-3,8	-5,8	-4,6
-1 m en -2 m NAP (onderwatertalud onder plateau)	+3,0	+1,9	+2,2	-	+1,7	+2,3
Onder -2 m NAP	-	-	-	-	-	-

### 2.3.6.2 Resultaten Markermeerzijde - vak 51

Aan de Markermeerzijde is voornamelijk erosie zichtbaar en weinig sedimentatie (zie Figuur 2-27). Tussen 2 m en -1 m NAP is de volumeafname 101.000 m<sup>3</sup> tussen maart 2020 en maart 2022 (zie Tabel 2-2). Dit komt neer op een volumeafname van 5,3 m<sup>3</sup>/m/jaar, gemiddeld over de gehele zijde van de Houtribdijk (Tabel 2-3). Onder de NAP-1 m is een klein beetje sedimentatie te zien langs de gehele Houtribdijk (zie zwarte dieptelijn in Figuur 2-27). In het noordwesten is sedimentatie zichtbaar net landwaarts van de golfbreker. Verder richting Trintelzand vindt sedimentatie plaats in het vlakke gedeelte van de profielen. Dit is echter zo weinig dat dit in de dwarsprofielen niet zichtbaar is en dus ook geen gemiddelde volumeverandering bepaald is.

De aanwezigheid van golfbrekers en Trintelzand over de gehele Markermeerzijde (zie Figuur 2-4) – met uitzondering van het natuurstrand – zorgt er waarschijnlijk voor dat het geërodeerde zandvolume tussen de Houtribdijk en deze constructies blijft liggen. Mede door de verschillen in profielen en voorliggende constructies (zie Figuur 2-10) is niet in te schatten welk volume op het onderwatertalud onder het plateau en welk volume in diepere gedeeltes terecht is gekomen, hierdoor zijn ook geen volumes gegeven in Tabel 2-3.

Bij detailgebied 3 (natuurstrand) is net zoals aan de IJsselmeerzijde een plateau zichtbaar dat zich uitbouwt in de periode tussen maart 2020 en maart 2022. Wat opvalt is de relatief grote erosie boven NAP+1 m. Hierdoor is de totale volumeverandering tussen 3 m en -1 m NAP -11,7 m<sup>3</sup>/m/jaar. Dit is vergelijkbaar met de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk. Hetzelfde geldt voor de volumetoename van 1,7 m<sup>3</sup>/m/jaar tussen -1 m en -2 m NAP. De volumetoename onder NAP-2 m is wederom niet te kwantificeren.

## 2.4 Analyse ontwikkeling oeverlijn

### 2.4.1 Inleiding

Voor de oeverlijnanalyse wordt gebruik gemaakt van de posities van de Basis en Momentane OeverLijn (BOL en MOL), als equivalent van de Basis en Momentane Kustlijn (BKL en MKL) zoals deze langs de kust worden gehanteerd. Hierin is de BOL-positie gedefinieerd als het minimaal benodigde/gewenste profielvolume binnen een specifieke rekenschijf (tussen 1 m en -1 m NAP). Er is op dit moment voor de Houtribdijk nog geen BOL vastgesteld. Echter, analyse van de tijdsontwikkeling van de MOL-positie (sectie 2.4.2) langs de zandige oevers geeft - samen met de absolute volumeveranderingen binnen verschillende volumeschijven - inzicht in langsvariatie in oeverlijnontwikkeling en (gradiënten in) netto sediment transport in de langsricting (sectie 2.4.3). Daarnaast is de ontwikkeling van de MOL in de dwarsrichting een aanvulling op de analyse van de profielontwikkeling. Gecombineerd vormen deze analyses de basis voor onze systeemanalyse.

### 2.4.2 Positie momentane oeverlijn

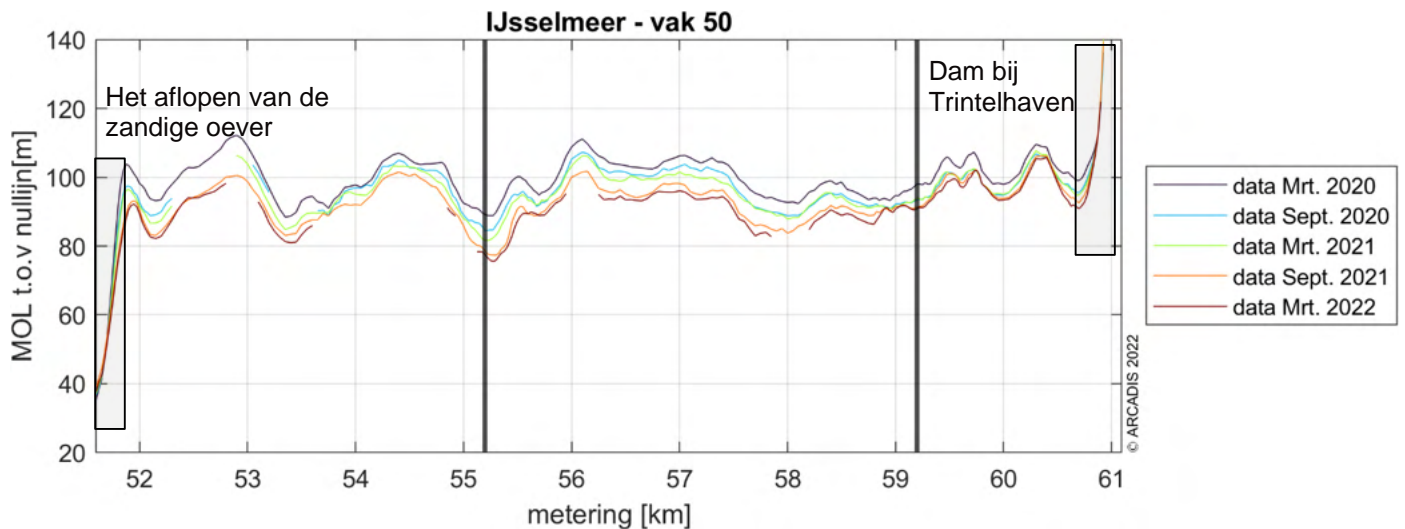
#### 2.4.2.1 Inleiding

De MOL is in deze sectie bepaald tussen de 1 m en -1 m NAP en is als volgt gedefinieerd:  $MOL = \frac{volume}{+1 - -1}$

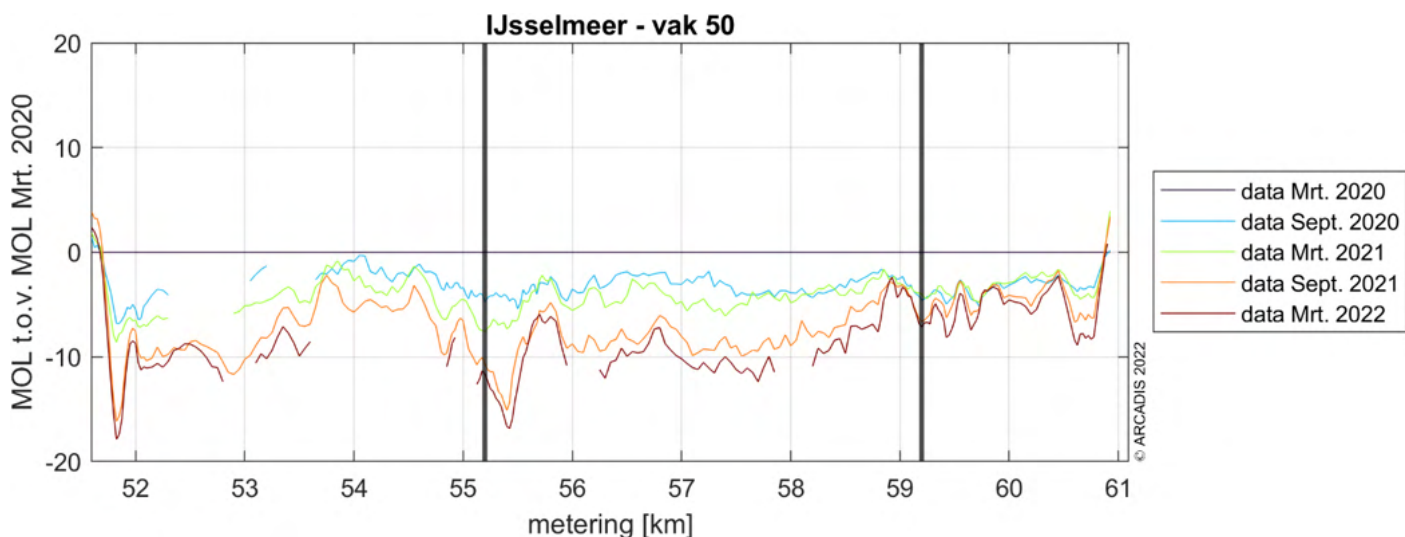
Hierin is het volume bepaald tussen 1 m en -1 m NAP. Omdat de MOL bepaald is over een periode van twee jaar (maart 2020 tot maart 2022) en omdat de volumeschijf waarover deze bepaald 2 m dik is, staat een MOL-verandering (in m) gelijk aan de volumeverandering in m<sup>3</sup>/m/jaar.

#### 2.4.2.2 IJsselmeerzijde

In Figuur 2-30 is de MOL ten opzichte van de nullijn aan de IJsselmeerzijde voor alle halfjaarlijkse meetmomenten geplot. Rond metering 51,5 is het aflopen van de Houtribdijk zichtbaar en rond metering 61 is de overgang naar de gekromde dam bij Trintelhaven zichtbaar waardoor de MOL verder van de nullijn komt te liggen. Tussen deze flanken van de Houtribdijk (metering 52 tot 60,5) varieert de MOL tussen 75 m en 110 m t.o.v. de nullijn. Daarnaast is zichtbaar dat de MOL over tijd richting de dijk beweegt. Dit is nog beter zichtbaar in Figuur 2-31 waarin de MOL relatief ten opzichte van de MOL van maart 2020 geplot is. Het is zichtbaar dat de MOL tussen de 3 m en 18 m landwaarts opschuift tussen maart 2020 en september 2021. Tussen metering 59 en 61 schuift de MOL minder snel dijkwaarts dan gemiddeld.



Figuur 2-30 Momentane oeverlijn (MOL) voor de IJsselmeerszijde, voortschrijdend gemiddelde van de 2 aangrenzende datapunten.

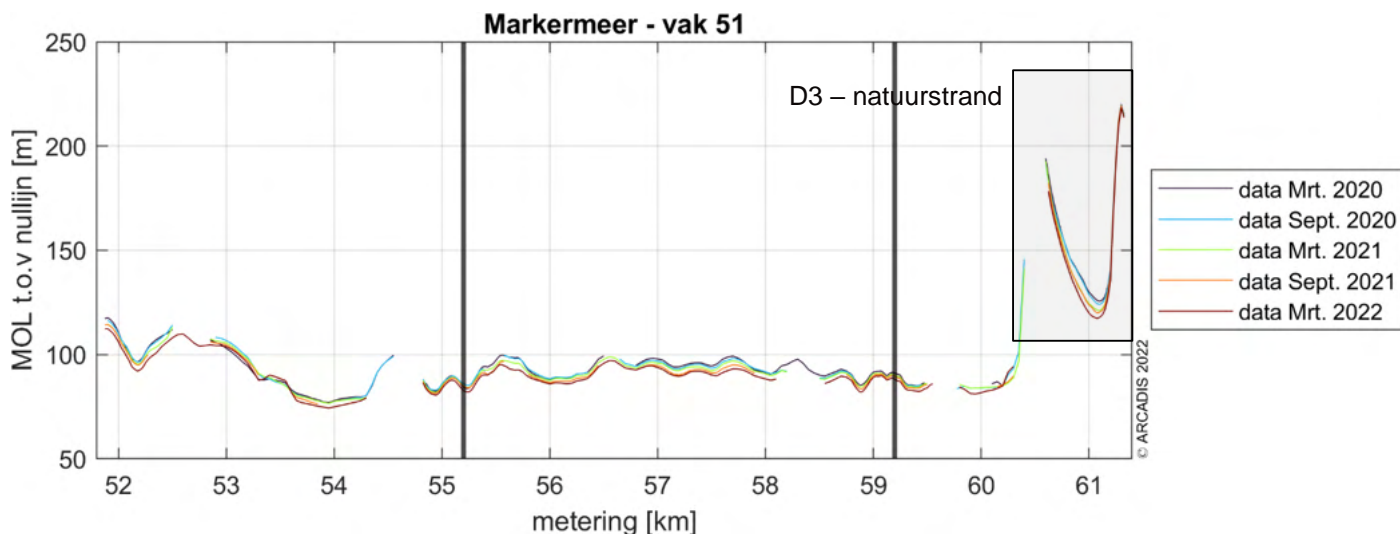


Figuur 2-31 MOL voor de IJsselmeerszijde geplot t.o.v. de MOL van maart 2020. Dit figuur kan ook worden gezien als volumeverandering in m<sup>3</sup>/m/jaar.

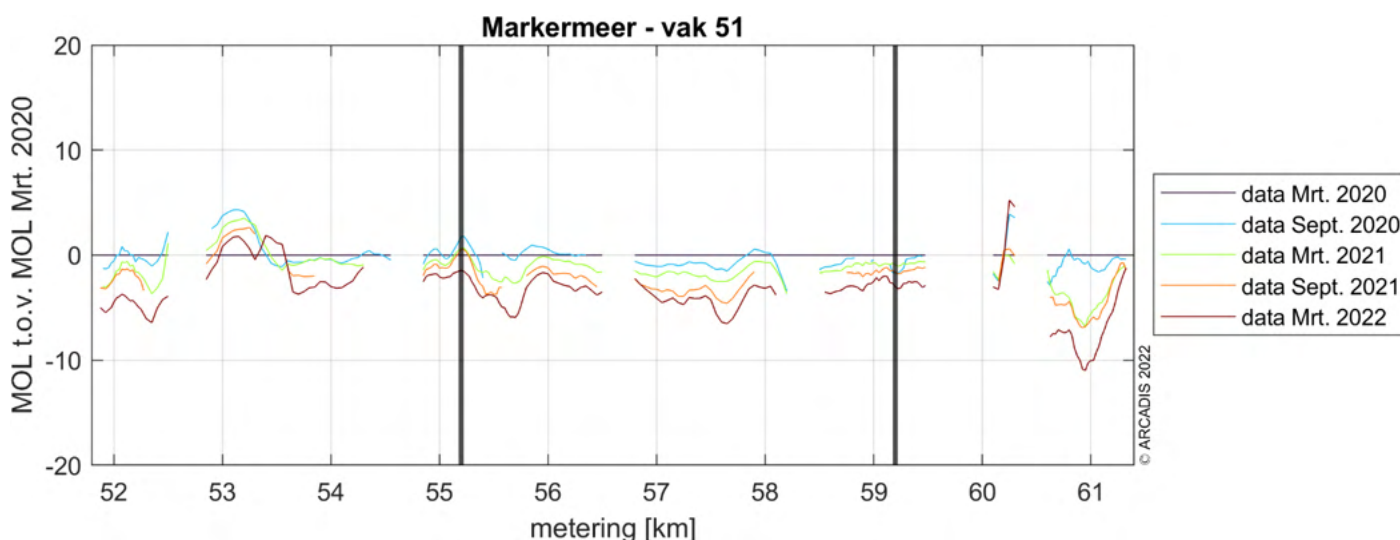
### 2.4.2.3 Markermeerszijde

In Figuur 2-32 is de MOL ten opzichte van de nullijn aan de Markermeerszijde voor alle halfjaarlijkse meetmomenten geplot. De vorm van het natuurstrand is duidelijk terug te zien tussen metering 60,5 en 61,2 (detailgebied 3). Buiten detailgebied 3 ligt de MOL tussen 75 m en 120 m t.o.v. de nullijn. De MOL is relatief stabiel in de meetperiode. Dit is beter zichtbaar in Figuur 2-33 waarin de MOL relatief tot de MOL van maart 2020 is geplot. Rond metering 61 schuift de MOL het meest dijkwaarts, ruim 10 m, tussen maart 2020 en maart 2022. Rond metering 52,5 verschuift de MOL zo'n 7 m dijkwaarts tussen maart 2020 en maart 2022.





Figuur 2-32 Momentane oeverlijn (MOL) voor de Markermeerzijde, voortschrijdend gemiddelde van de 2 aangrenzende datapunten.



Figuur 2-33 MOL voor de Markermeerzijde geplot t.o.v. de MOL van maart 2020. Dit figuur kan ook worden gezien als volumeverandering in  $m^3/m/jaar$ .

## 2.4.3 Indicatie langtransport

### 2.4.3.1 IJsselmeerzijde

Binnen de volumeschijven (sectie 2.3.3.2) en in de bepaalde MOL (sectie 2.4.2) is kustlangs variatie te zien. Rond het noordelijke knikpunt van de Houtribdijk bij metering 55,2 is in Figuur 2-31 een relatief sterke MOL-verschuiving te zien die correspondeert met de relatief grote afname in Figuur 2-18 en Figuur 2-19. De relatief grote toename in volume in de volumeschijf tussen -1 m en -2 m NAP aan weerszijden van het knikpunt is logischerwijs niet terug te zien in de MOL. Het hoger gelegen sediment dat erodeert rond het knikpunt wordt dus direct naast het knikpunt herverdeeld in een dieper gedeelte van het profiel (Figuur 2-20). Vergelijkbaar is in Figuur 2-31 rond metering 52,9 een relatief sterke MOL-verschuiving duidelijk; initieel ligt de MOL hier relatief ver van de lijn (Figuur 2-30). Dit sediment wordt lokaal herverdeeld naar diepere schijven (rond metering 53,5, Figuur 2-20). De gemiddelde verschuiving in MOL-positie is per definitie gelijk aan de volumeverandering in deze schijf en dus aan het netto dwarstransport uit deze schijf. Kustlangse variaties in de MOL worden dus veroorzaakt door of (1) kustlangse variatie in netto dwarstransport (bijvoorbeeld andere hydraulische belasting) of (2) netto langtransport.

**Detailgebied 2:** In Figuur 2-31 is te zien dat detailgebied 2 (tussen metering 59 en 61) de MOL-positie sinds september 2020 relatief stabiel is. Dit is ook het gebied waarin de erosie aan de bovenkant van het plateau ongeveer in balans is met de sedimentatie op het onderwatertalud onder het plateau (zie Tabel 2-1). Hierin verschilt dit detailgebied aanzienlijk ten opzichte van de gemiddelde waarden van de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk. Tussen 1 m en -1 m NAP neemt het volume in dit detailgebied met 2,5 m<sup>3</sup>/m/jaar af (gemiddeld over deze zijde Houtribdijk -9,1 m<sup>3</sup>/m/jaar, Tabel 2-3). Tussen 3 m en 1 m NAP neemt het volume nihil af met 0,3 m<sup>3</sup>/m/jaar (gemiddeld -2,1 m<sup>3</sup>/m/jaar). Tussen -1 m en -2 m NAP neemt het volume met 2,2 m<sup>3</sup>/m/jaar toe (gemiddeld +3,6 m<sup>3</sup>/m/jaar). Het verschil met de gemiddelde waarden is een indicatie van gradiënten in langtransport of een verschil in forcering. We kunnen aannemen dat een groot gedeelte toe te schrijven is aan langtransport. Als het verschil volledig komt door gradiënten in langtransport is het langtransport in de richting van het detailgebied is maximaal 7 m<sup>3</sup>/m/jaar. Vanwege de dam bij Trintelhaven is dit logischerwijs zandtransport in zuidoostelijke richting.

### 2.4.3.2 Markermeerzijde

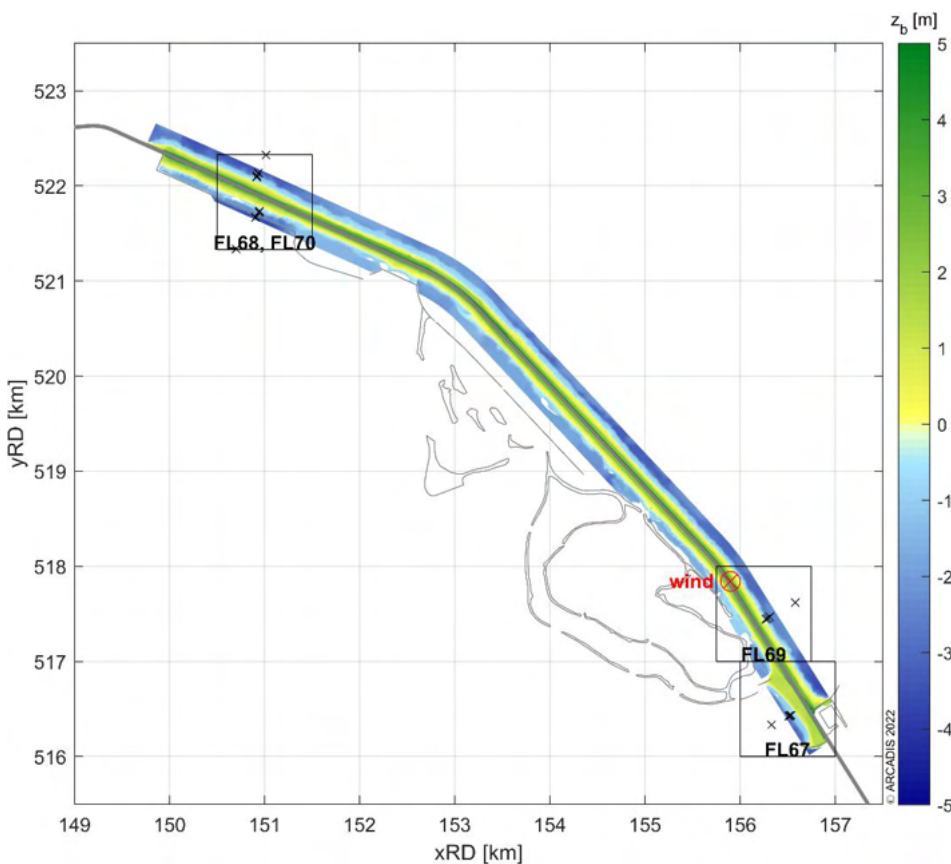
Ten opzichte van de IJsselmeerzijde is bij de Markermeerzijde minder verschuiving van de MOL-positie te zien (Figuur 2-33). Daardoor is de kustlangse variatie ook relatief klein. Enkel in detailgebied 3 (het natuurstrand) is een duidelijke variatie in oeverlijnontwikkeling zichtbaar. Ook is voor dit gebied tussen de 0 en -1 m NAP een variatie in volumeafname zichtbaar (Figuur 2-23). In het midden van het detailgebied is de meeste volumeafname en aan de flanken de minste. De volumetoename vindt plaats tussen de -1 m en -2 m NAP (Figuur 2-24). Hier is aan de flanken juist een flinke toename in volume te zien, maar in het midden is er bijna geen toename. Dit suggereert een lokale herverdeling waarbij een bepaald zandvolume per jaar kustlangs naar de flanken wordt getransporteerd, grofweg gelijk verdeeld tussen langtransport naar het zuidoosten en het noordoosten.

### 3 Basisanalyse forcering

#### 3.1 Inleiding

Onder de forcering van de morfologische veranderingen verstaan we de aandrijvende krachten: wind, waterstand, stroming en golven. De hydrodynamische parameters (waterstand, stroming en golven) zijn binnen de monitoringscampagne gemeten op vier locaties, getoond in Figuur 3-1. Deze locaties hebben binnen het totale meetprogramma van Rijkswaterstaat de volgende codes gekregen:

- FL67: een meetlocatie bij het natuurstrand aan de Markermeerzijde van de dijk, nabij Trintelhaven
- FL68: een meetlocatie bij de vooroeverdammen aan de Markermeerzijde van de dijk
- FL69: een meetlocatie aan de IJsselmeerzijde van de dijk bij Trintelhaven, tegenover FL67
- FL70: een meetlocatie aan de IJsselmeerzijde van de dijk, tegenover FL68



Figuur 3-1 Locaties meetinstrumenten, de zwarte vierkanten zijn de gebieden waarop in de detailgebieden zijn ingezoomd. Bodemligging is van maart 2020 (T4)

Bij deze locaties was een vaste meetpaal aanwezig, waar de volgende instrumenten aan bevestigd waren:

- FL67 en FL69: stappenbaak, ADCP, multi parameter probe (MPP), vector ADV
- FL68 en FL70: stappenbaak en ADCP

Met een stappenbaak kunnen waterstandsfluctuaties worden geregistreerd, op basis waarvan ook de eigenschappen van de golven kunnen worden bepaald (zonder richtingsinformatie). Met een ADCP wordt de gemiddelde stroming gemeten op verschillende dieptes. Een multi parameter probe registreert waterkwaliteitsparameters zoals de troebelheid, watertemperatuur, zuurstofgehalte en geleidendheid. Een vector ADV meet met een hoge frequentie de druk en stroming in 3 richtingen op één afgebakende positie. Op basis van deze hoogfrequente data is richtingsafhankelijke golf informatie afgeleid en opgeslagen binnen de dataset van het monitoringsprogramma. Meer informatie is te vinden in het datarapport over het monitoringsprogramma (HKV en Tauw, 2021).

Behalve de vaste meetpalen zijn ook instrumenten bevestigd aan kleinere meetpalen, dicht bij de kust. Deze locaties zijn aangeduid met de toevoegingen A, B en C, waarbij locatie A zich het dichtst bij de oever bevindt. Bij deze locaties waren roulerend meetinstrumenten actief. Tabel 3-1 laat zien waar de roulerende meetopstellingen zich op welk moment bevonden. FL65 was een meetlocatie bij de Marker Wadden.

Tabel 3-1 Overzicht van wanneer op welke locatie gemeten is. Getallen in tabel zijn dag in de maand waarin meting begint/eindigt. Bron: HKV en Tauw (2021).

jaar	maand	FL65ABC	FL67ABC	FL68ABC	FL69ABC	FL70ABC
2019	2	14			14	
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9		9	16		
	10					
	11					
	12					
	2020	1				
2						
3						
4						
5						19
6					10	
7						
8						
9						
10						
11						3
12		14				
2021	1	26	26			
	2		26			
	3		29	1-30		

Bij deze locaties waren de volgende instrumenten aanwezig:

- A en C: Vector ADV en altimeter
- B: Aquadopp HR en altimeter

Een altimeter meet de bodemhoogte onder het instrument op een relatief hoge frequentie. De Aquadopp HR is een ADCP met hoge resolutie, waardoor dit instrument met dunnere laagdiktes en hogere frequentie kan meten dan een normale ADCP. Uit de Aquadopp-data is ook golfinformatie afgeleid.

## 3.2 Analyse hydrodynamica

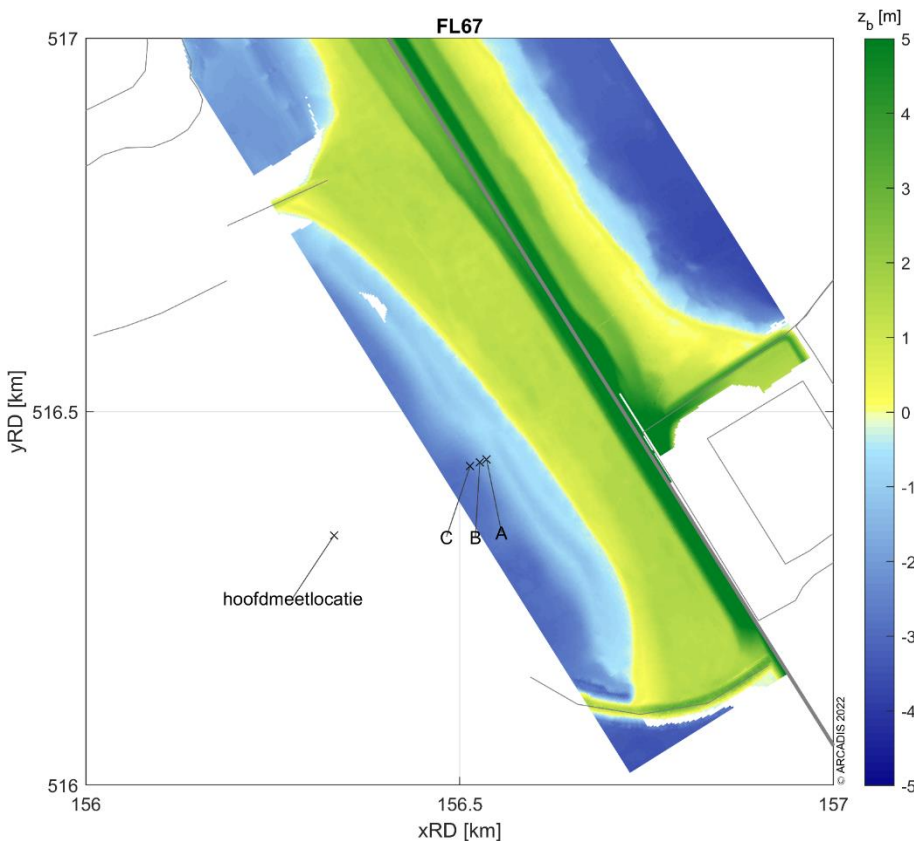
### 3.2.1 Algemeen

De hydrodynamica laat zich op hoofdlijnen als volgt karakteriseren:

- De stroming beweegt aan weerszijden van de Houtribdijk overwegend in tegenovergestelde richting omdat het grootschalige windgedreven circulatiepatroon in het Markermeer en het IJsselmeer in dezelfde richting beweegt (met de klok mee of tegen de klok in)
- De significante golfhoogte (zowel gemiddeld als maximaal) is kleiner dicht bij de oever door golfbreking.
- De golven buigen dicht bij de oever af richting de dijknormaal vanwege refractie. Hierdoor is de spreiding in golfrichtingen dicht bij de oever vaak kleiner.
- De gemeten golven zijn aan de Markermeerzijde van de Houribdijk gemiddeld hoger dan aan de IJsselmeerzijde. Dit komt doordat er vaker sprake is van (krachtiger) wind uit het zuidwesten dan uit het noorden.

In de volgende paragrafen volgt een beschrijving van de forcering per meetlocatie.

### 3.2.2 Locatie FL67 (Detailgebied 3; Markermeerzijde)



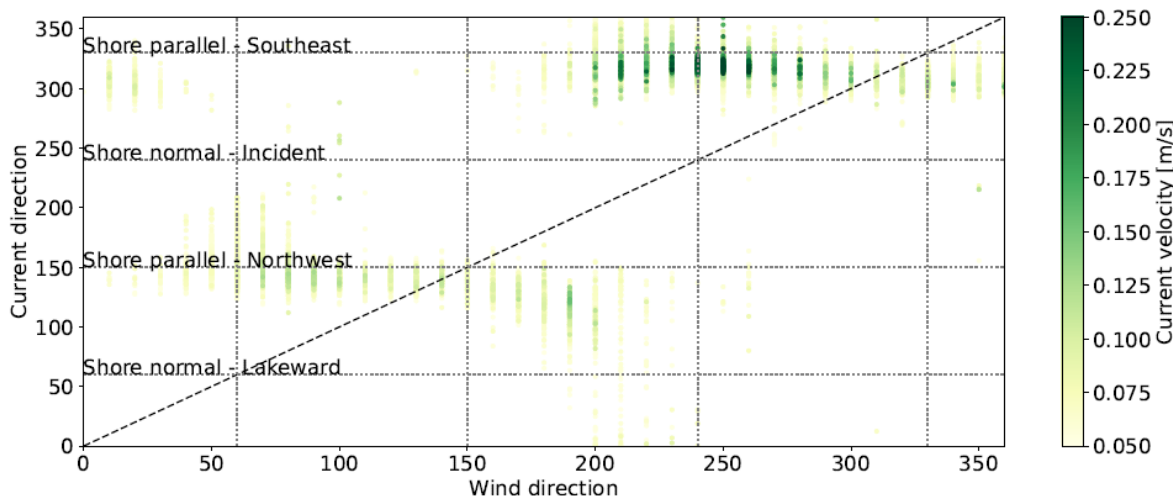
Figuur 3-2 Als Figuur 3-1, ingezoomd op locatie FL67 (Detailgebied 3; Markermeerzijde). Bodemligging is van maart 2020 (T4)

#### Stroming:

Er is voornamelijk stroming vanuit het noordwesten bij de hoofdlocatie en locatie C. Bij locatie A is de verdeling ongeveer gelijk tussen stroming uit het noordwesten en zuidoosten.

De dominante stromingsrichting vanuit het noordwesten suggereert dat de grootschalige circulatie op het Markermeer meestal met de klok mee beweegt. Dit volgt ook uit onderstaande figuur, overgenomen uit het conceptartikel van Ton et al. (2022). Bij de veelvoorkomende windrichtingen rond zuidwest is de stroming het sterkst en beweegt deze in het Markermeer met de klok mee. Bij de Houtribdijk beweegt de stroming dan van noordwest naar zuidoost (van Enkhuizen naar Lelystad).

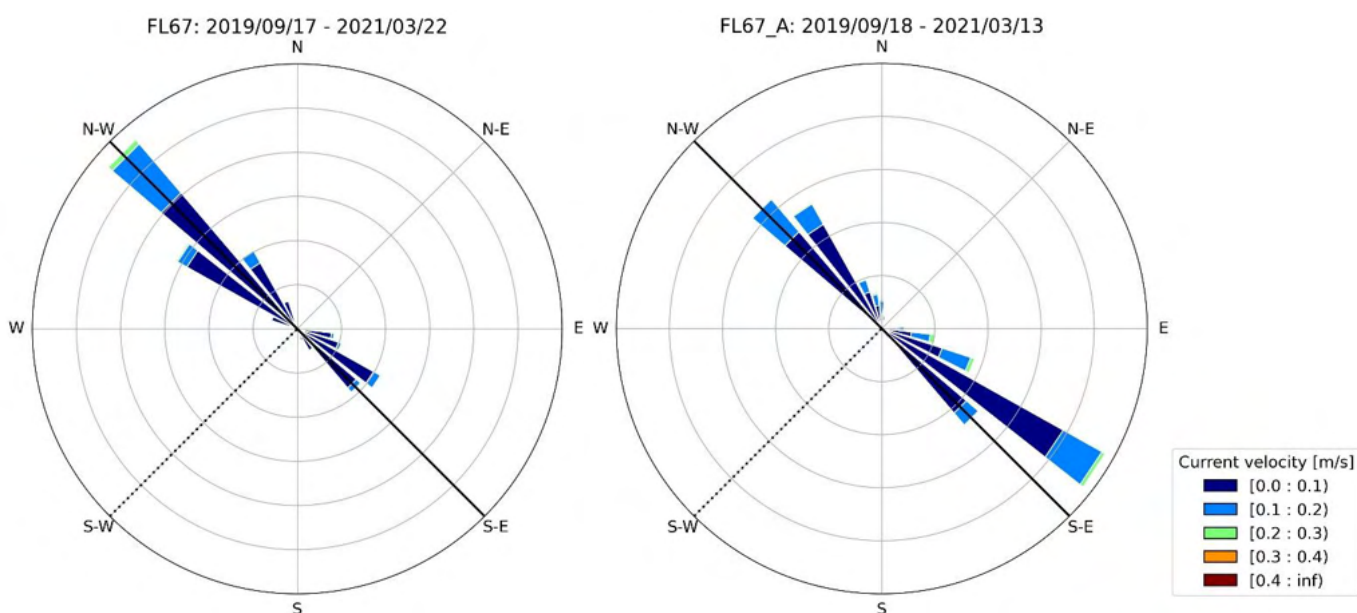




**Figuur 3-3:** Relatie tussen windrichting en stroomrichting voor locatie FL67. Getallen langs de assen: komend vanuit deze richting in graden t.o.v. Noord. Kleurschaal: stroomsnelheid in m/s. Bron: Ton et al. (2022).

De stroming bij locatie A is soms in de tegenovergestelde richting ten opzichte van de overige meetlocaties (hoofdlocatie en locaties B en C). Dit is duidelijk zichtbaar bij vergelijking tussen de stromingsrozen (Figuur 3-4, gebaseerd op de ADV-metingen voor gemiddelde stroomsnelheden hoger dan 0,05 m/s) voor de hele meetperiode bij locatie C en de hoofdlocatie ten opzichte van de stromingsroos bij locatie A. Bij de locaties die verder uit de kust liggen (hoofdlocatie en C) komt de stroming bijna altijd uit het noordwesten terwijl dit bij locatie A ongeveer gelijk verdeeld is over het noordwesten en zuidoosten. Dit impliceert dat er op het strand bij locatie FL67 bij bepaalde windcondities sprake is van neervorming. Voor meer details over deze kleinschalige circulatiepatronen, zie Ton et al. (2022).

Bij windrichtingen tussen ongeveer 30 graden (NNO) en 200 graden (ZZW) (de oostelijke sectoren) beweegt de stroming in het Markermeer tegen de klok in. Bij de Houtribdijk is de stroomrichting dan ongeveer 150 graden (van Lelystad naar Enkhuizen). Deze stroming trad op tijdens grote delen van de winter van 2020-2021. Bij de meer dominante windrichtingen tussen 200 en 30 graden (de westelijke sectoren) beweegt de stroming met de klok mee, wat leidt tot een stroming van ongeveer 300 graden.



**Figuur 3-4:** Stromingsrozen ( $U > 0,05$  m/s) voor de complete meetperiode voor de locaties FL67 (links) en FL67A (rechts)

**Golven:**

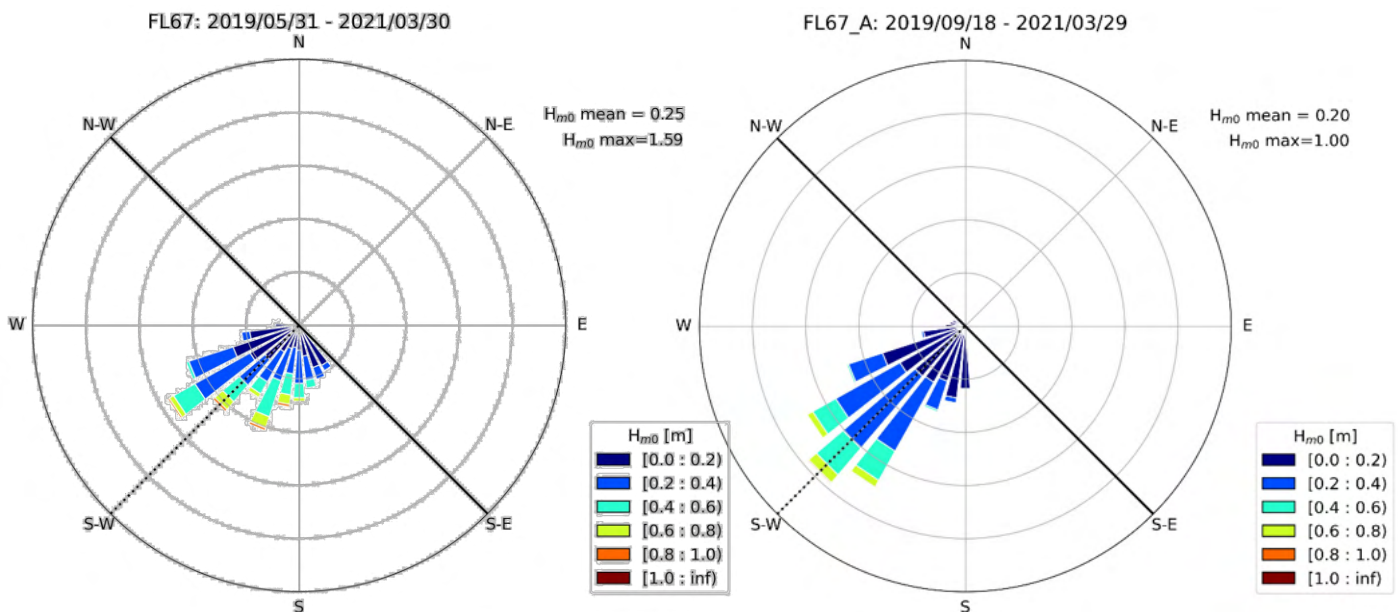
De dominante golfrichting is uit het westzuidwesten vanwege de overheersende windrichtingen. Bij die windrichtingen komt de stroming bij locatie FL67 uit het noordwesten.

Dichter bij de kust draaien de golven richting de dijknormaal (ZW) door refractie. Dit is te zien aan de steeds kleinere spreiding van golfrichtingen gaande richting de oeverlijn. Ook komen bij locatie A de meeste golven uit het zuidwesten (gelijk aan de dijknormaal) terwijl dit bij de hoofdlocatie het westzuidwesten is.

Over het algemeen is er bij de hoofdlocatie in de winter een grotere spreiding aan golfrichtingen en zijn in de zomer de golven uit het westzuidwesten dominant. Dit geldt ook bij locatie C.

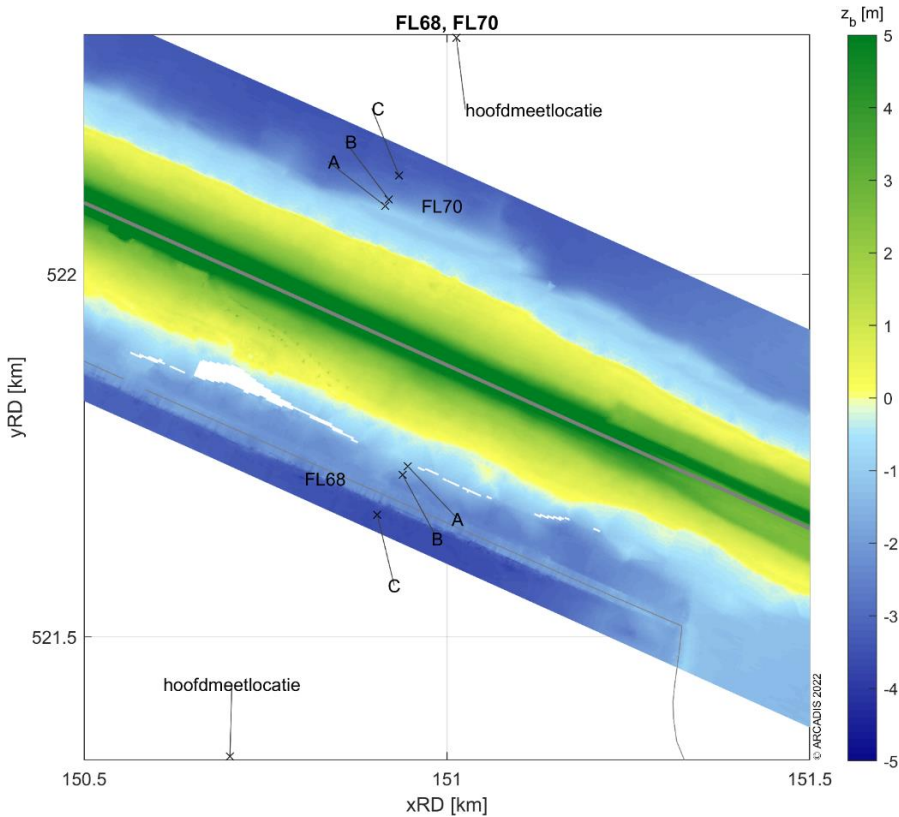
Met name de maximale significante golfhoogtes maar ook de gemiddelde significante golfhoogtes nemen af richting de kust, wat toegeschreven kan worden aan golfbreking.

Bij de hoofdlocatie is de gemiddelde significante golfhoogte ( $H_{m0}$ ) 0,25 m en de maximale significante golfhoogte 1,59 m. Tijdens de winter 2019-2020 is een periode geweest van veel en harde zuidwestenwind (18-12-2019 tot 23-03-2020). In deze periode komen er ook regelmatig hogere golven (significante golfhoogte > 0,6 m) uit zuidwestelijke richtingen. Bij een dominante windrichting uit het noorden tot oosten (bijvoorbeeld 29-03 tot 27-05-2020) zijn de golven aan de Markermeerzijde veel kleiner dan gemiddeld.



Figuur 3-5: Golfrozen voor de complete meetperiode voor de hoofdlocatie FL67 (links) en FL67A (rechts)

### 3.2.3 Locatie FL68 (Detailgebied 4; Markermeerzijde)

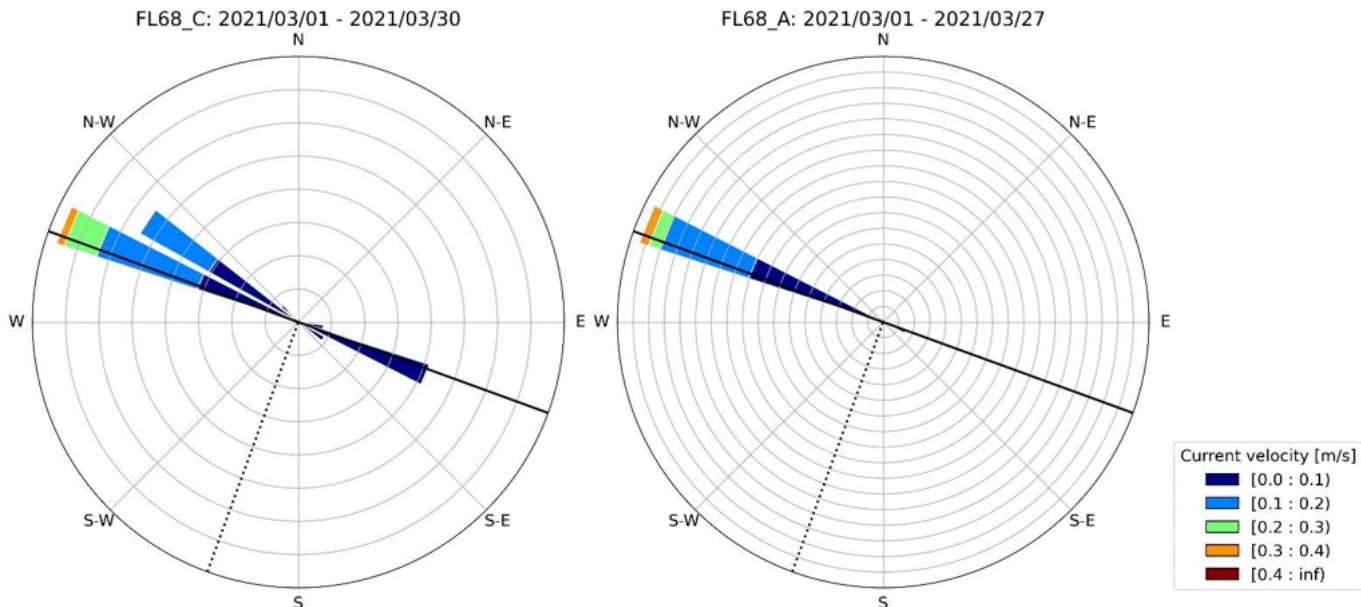


Figuur 3-6: Als Figuur 3-1, ingezoomd op locatie FL68 (Detailgebied 4; Markermeerzijde) en FL70 (Detailgebied 1; IJsselmeerzijde). Bodemligging is van maart 2020 (T4).

Bij locatie FL68 is de meetperiode erg kort, namelijk 1 maand (maart 2021).

**Stroming:**

De stroming komt gedurende deze periode overwegend uit het westnoordwesten, zo blijkt uit de stromingsroos in Figuur 3-7. De stroomrichting komt daarmee voor deze periode overeen met de stroomrichting bij FL67.



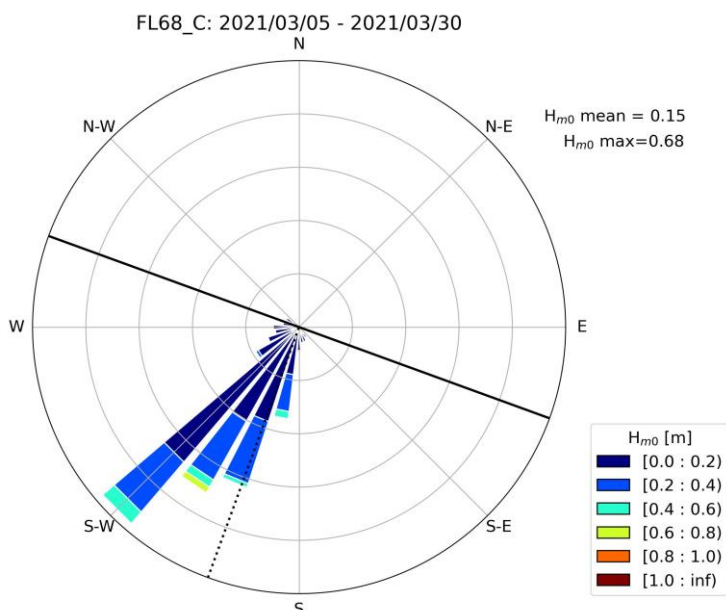
Figuur 3-7: Stromingsroos ( $U > 0,05$  m/s) voor de complete meetperiode (maart 2021) voor de locaties FL68C (links) en FL68A (rechts)

**Golven:**

De golven bij locatie C (verder uit de kust) komen voornamelijk uit het zuidwesten en hebben een gemiddelde significante golfhoogte van 0,15 m en een maximale significante golfhoogte van 0,68 m.

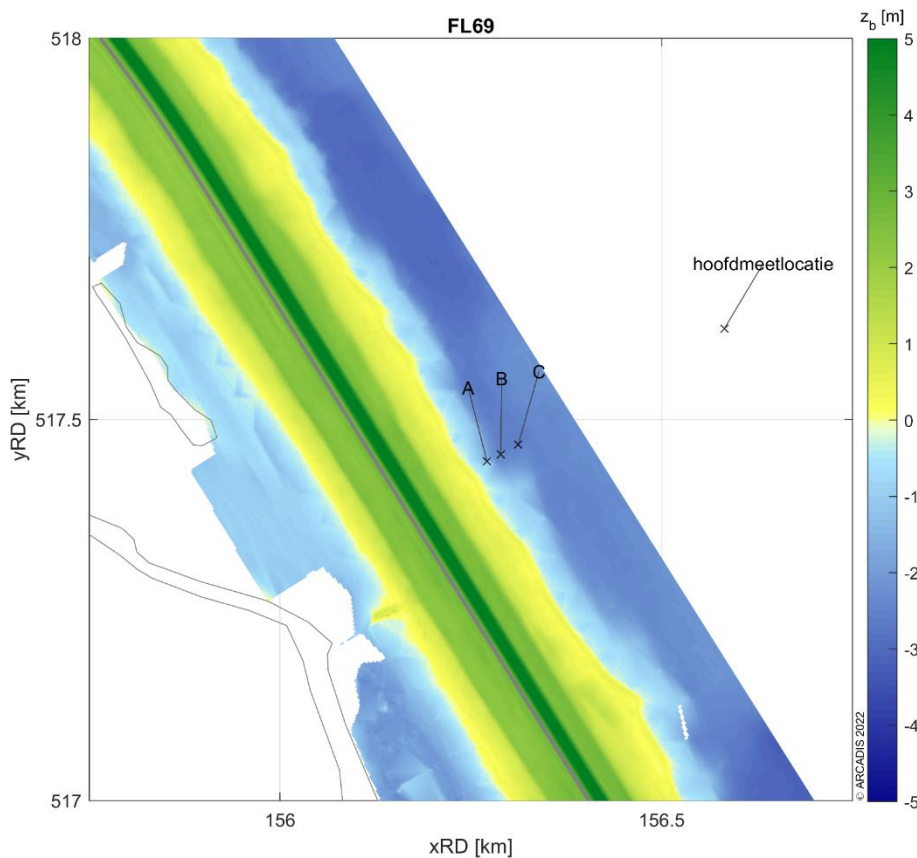
De golven bij locatie A (dichter bij de kust) komen voornamelijk uit het westen en zijn erg klein met een gemiddelde significante golfhoogte van 0,05 m en een maximale significante golfhoogte van 0,28 m. Dit verschil wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van de vooroeverdam tussen de locaties A en C.

Ook het verschil in golfrichting tussen de twee locaties komt doordat meetpunt A achter de vooroeverdam ligt.



Figuur 3-8: Golfroos voor de complete meetperiode (maart 2021) voor de locatie FL68C

### 3.2.4 Locatie FL69 (Detailgebied 2; IJsselmeerzijde)



Figuur 3-9: Als Figuur 3-1, ingezoomd op locatie FL69 (Detailgebied 2; IJsselmeerzijde). Bodemligging is van maart 2020 (T4).

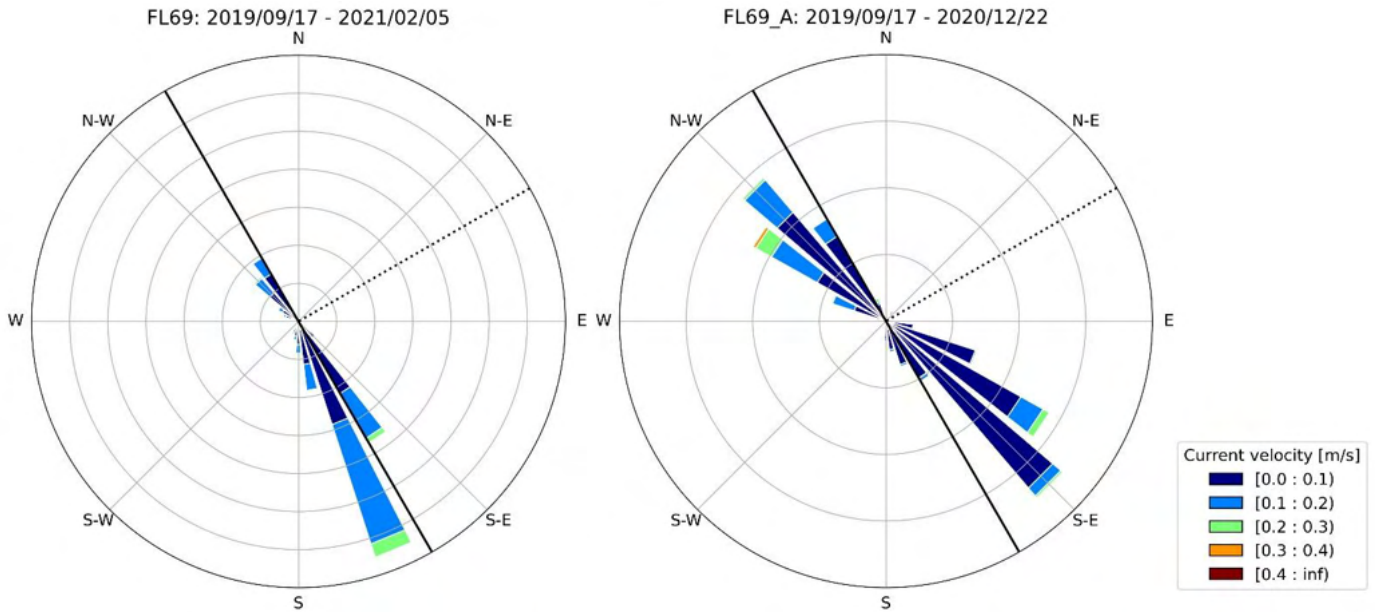
**Stroming:**

De stroming komt bij de hoofdlocatie en locatie C voornamelijk uit respectievelijk het zuidzuidoosten en het zuidoosten. Bij locatie A komt de stroming afwisselend uit het zuidoosten en noordwesten. Hier is bij tijden ook sprake van neervorming achter de havendam bij Trintelhaven, waardoor de stroming bij locatie A de tegenovergestelde richting heeft van de verder meerwaarts gelegen hoofdlocatie. Daarnaast zijn er veel momenten waarbij locatie A in de luwte van de havendam bij Trintelhaven ligt, waardoor de stroomsnelheid bij de hoofdlocatie groter is dan bij locatie A, en de stroming bij locatie A onder de gehanteerde drempelwaarde van 0,05 m/s komt.

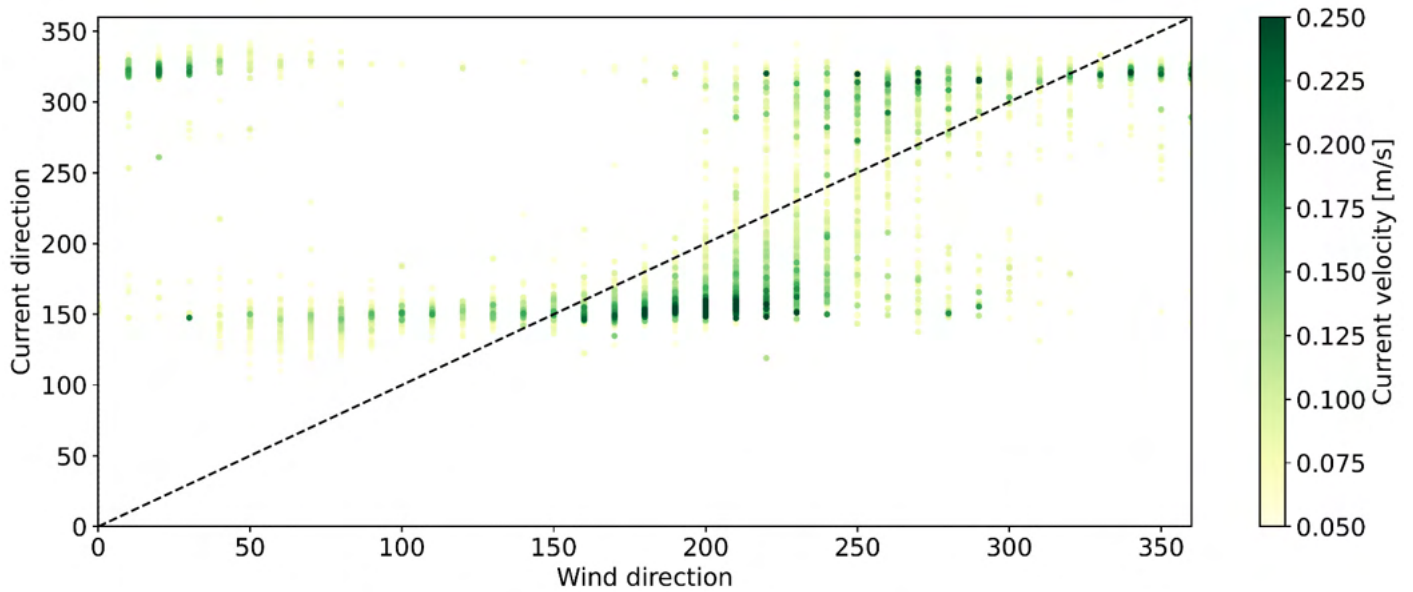
Het veelvuldig optreden van stroming vanuit het zuidoosten (hoofdlocatie en locatie C) duidt erop dat de grootschalige circulatie op het IJsselmeer vaak met de klok mee draait. Dit komt overeen met de circulatierichting op het Markermeer bij wind vanuit de dominante westelijke sectoren. Dit is zichtbaar gemaakt in Figuur 3-11, waarin de windrichting en stroomrichting tegen elkaar zijn uitgezet.

In het voorjaar van 2020 wijkt de stromingsrichting bij de hoofdlocatie af van de zuidzuidoostelijke richting die tijdens de rest van de meetperiode wordt waargenomen en komt de stroming uit het noordwesten. Dit komt overeen met een periode waarin de wind vaak uit noordelijke tot oostelijke richtingen komt.





Figuur 3-10: Stromingsrozen ( $U > 0,05$  m/s) voor de complete meetperiode voor de locaties FL69 (links) en FL69A (rechts)



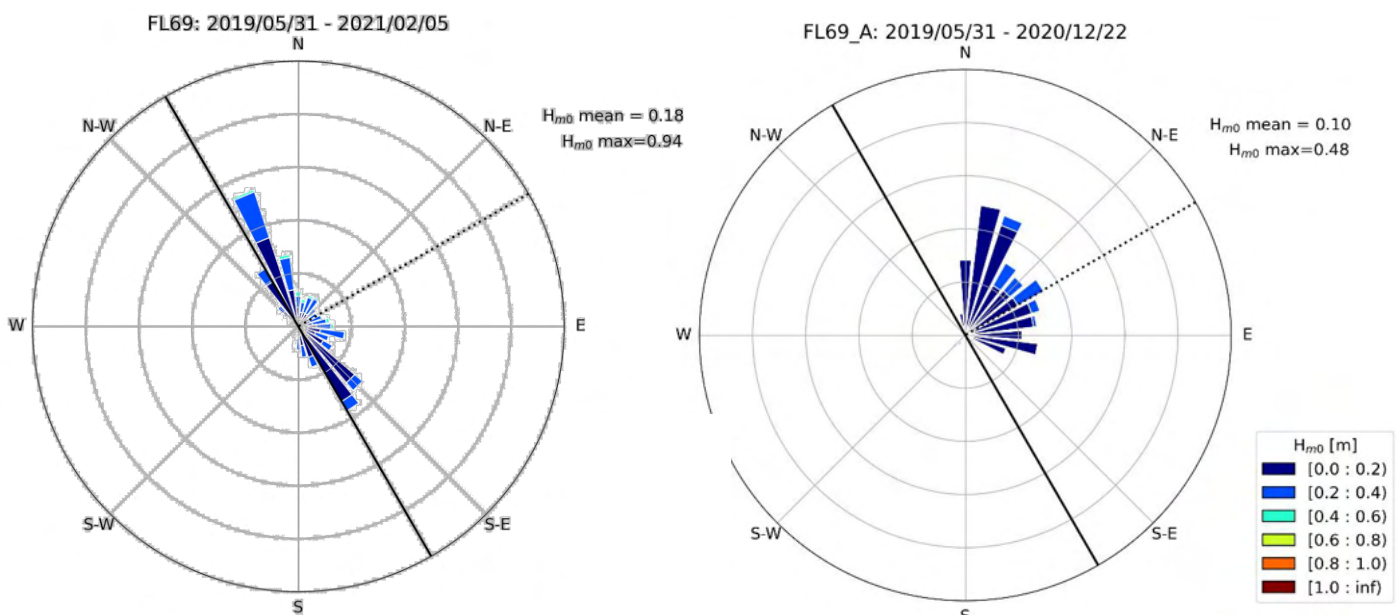
Figuur 3-11 Relatie tussen windrichting en stroomrichting voor locatie FL69. Getallen langs de assen: komend vanuit deze richting in graden t.o.v. Noord. Kleurschaal: stroomsnelheid in m/s. Figuur: Anne Ton (TU Delft).

**Golven:**

De golven bij de hoofdlocatie FL69 bewegen voornamelijk parallel aan de kust. Dichter bij de oever refracteren de golven steeds verder richting de dijknormaal. Hierdoor wordt de spreiding in golfrichtingen dicht bij de oever ook kleiner. Dit is zichtbaar in de golfrozen van FL69 en FL69A in Figuur 3-12.

Bij de hoofdlocatie is de gemiddelde significante golfhoogte ( $H_{m0}$ ) 0,18 m en de maximale significante golfhoogte 0,94 m. Hiermee is de gemiddelde golfhoogte aanzienlijk lager dan aan de Markermeerzijde van de Houtribdijk (locatie 67, zie Figuur 3-5). Dit geldt nog sterker bij de locatie dicht bij de kust, met een gemiddelde  $H_{m0}$  van 0,10 m bij FL69A tegen 0,20 m bij FL67A en een maximale  $H_{m0}$  van 0,48 m bij FL69A tegen 1,00 m bij FL67A (Figuur 3-5). De golven bij FL69A zijn dus zowel gemiddeld als maximaal een factor 2 lager dan bij FL67A.

In voorjaar van 2020 was er een periode met gemiddeld hogere golven (28/02/2020 – 26/05/2020). Met name in april en mei was er dan ook regelmatige hardere wind uit de noordelijke tot oostelijke windrichtingen.



Figuur 3-12: Golfrozen voor de complete meetperiode voor de hoofdlocatie FL69 (links) en FL69A (rechts)

### 3.2.5 Locatie FL70 (Detailgebied 1; IJsselmeerzijde)

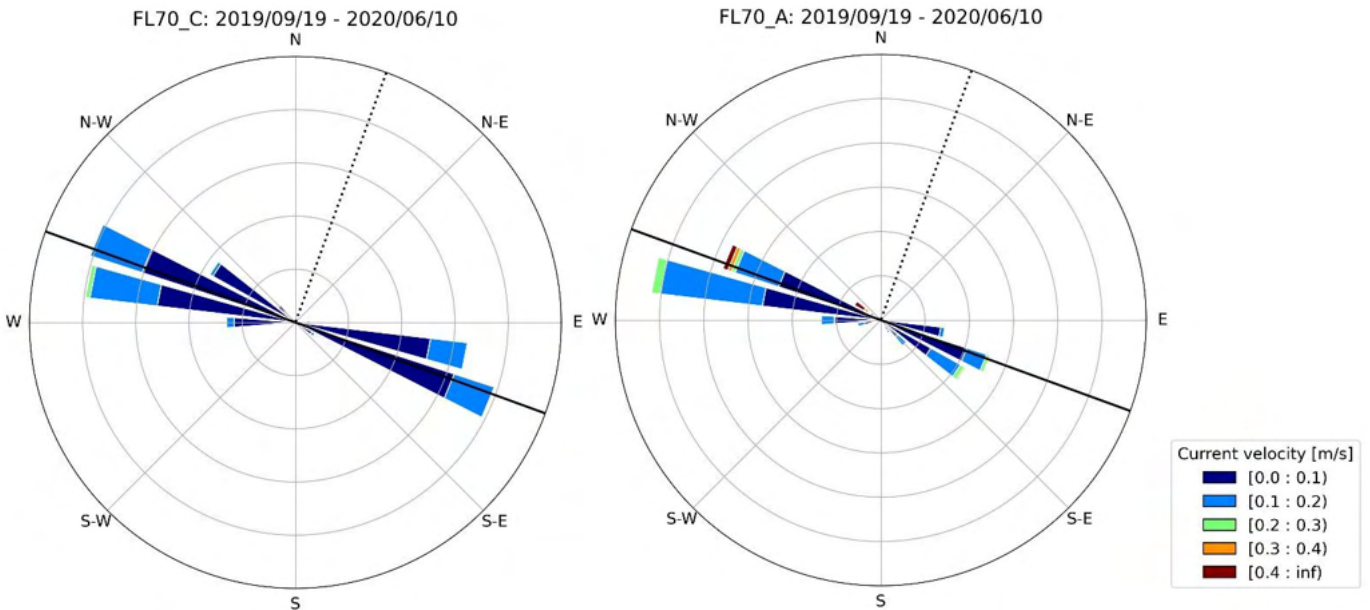
**Stroming:**

De stroming komt op de locaties A en C (zie Figuur 3-13) afwisselend uit het westnoordwesten en het oostzuidoosten, met het westnoordwesten als de dominante richting.

Dit wijkt af van de stromingsrichtingen bij locatie FL69, die vooral uit het zuidoosten komen. Dit zou ook kunnen komen door variaties tussen de meetperiodes bij de twee locaties, die elkaar vooral afwisselen en nauwelijks overlappen. In de meetperiode van locatie FL70 komt er relatief vaak wind uit noordelijke tot oostelijke richtingen.

Bij locatie A komt de stroming vaker uit het westnoordwesten dan bij locatie C waar de stroming bijna gelijk verdeeld is over de twee kustlans richtingen.

Bij locatie A zijn hoge stromingssnelheden van boven de 0,4 m/s waargenomen. Bij locatie C zijn de stroomsnelheden lager.

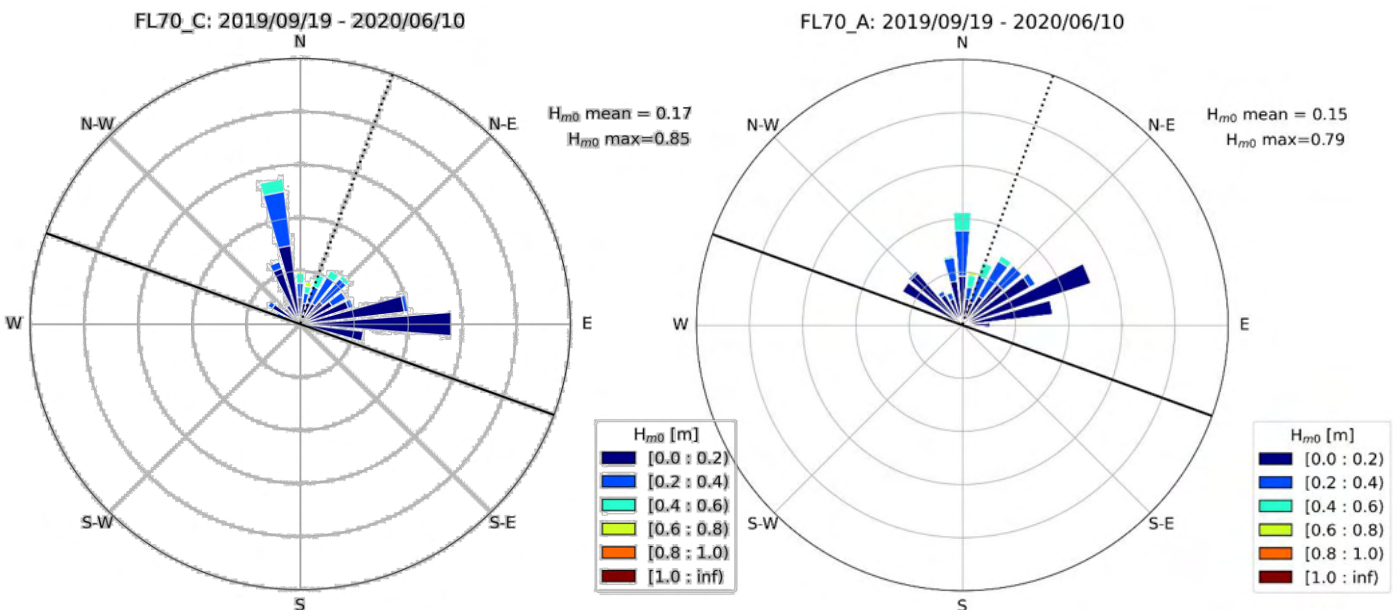


Figuur 3-13: Stromingsrozen ( $U > 0,05$  m/s) voor de complete meetperiode voor de locaties FL70C (links) en FL70A (rechts)

**Golven:**

Er is veel variatie in golfrichtingen op locaties A en C, met golven uit het noordwesten tot oosten. Dichter bij de oever buigen de golven richting dijknormaal. De spreiding in golfrichtingen bij locatie is dus iets kleiner bij locatie A dan bij locatie C. Door de gemiddeld vrij lage golfhoogte is het effect van refractie kleiner dan aan de Markermeerzijde van de dijk. Bij locatie C is de significante golfhoogte gemiddeld 0,17 m en maximaal 0,85 m.

Bij beide locaties zijn de golven in de tweede helft van de meetperiode (28/02/2020 – 10/06/2020) hoger dan in het eerste deel van de meetperiode (14/11/2019 – 28/02/2020). Deze periode met hogere golven overlapt met een periode met hogere golven bij locatie FL69 (de hoofdlocatie met permanente metingen).



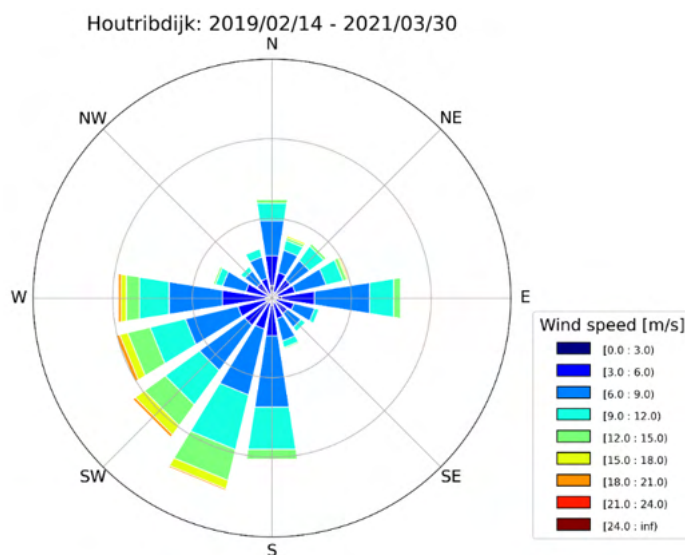
Figuur 3-14: Golfroos voor de complete meetperiode voor de hoofdlocatie FL70C (links) en FL70A (rechts)

### 3.3 Vergelijking langjarig klimaat

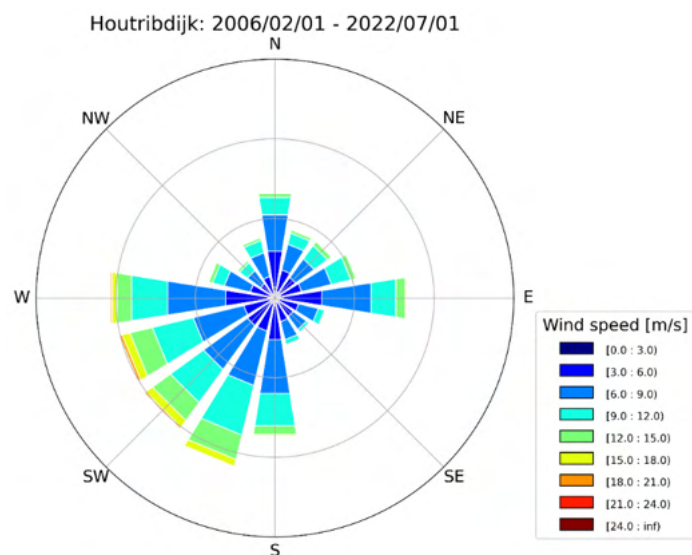
Voor de vergelijking van het klimaat tijdens de meetperiode met het langdurige klimaat is gebruik gemaakt van windmetingen van het KNMI op meetpunten Houtribdijk en Lelystad. Hierbij zijn de metingen van meetpunt Houtribdijk qua locatie mogelijk relevanter, maar zijn de metingen voor een kortere periode beschikbaar (1-2-2006 tot 1-7-2022) dan bij locatie Lelystad (17-1-1990 tot 1-7-2022).

Voor het golf- en stromingsklimaat zijn geen metingen beschikbaar buiten de meetperiode en kan er dus geen directe vergelijking gemaakt worden. Wel kan er op basis van de relatie tussen windrichting en stromingsrichting nog een indirecte vergelijking gemaakt worden van het stromingsklimaat tijdens en buiten de meetperiode.

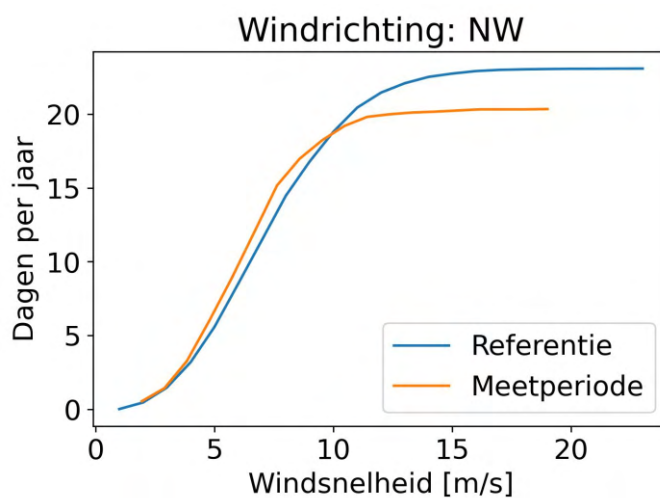
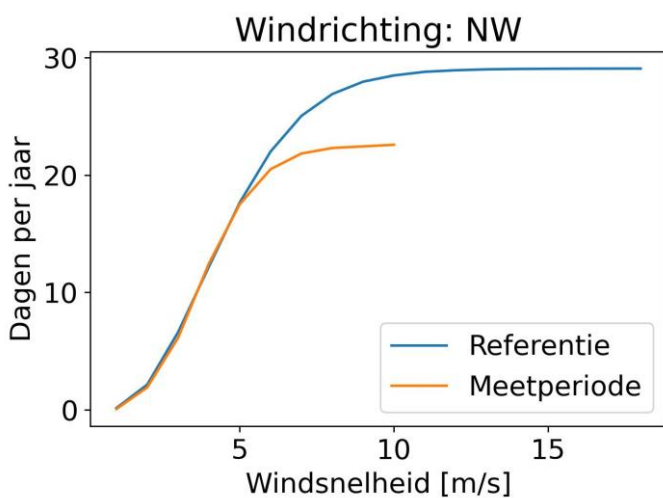
Het windklimaat tijdens (Figuur 3-15) en buiten de meetperiode (Figuur 3-16) lijkt in grote lijnen sterk op elkaar. De wind komt voor beide perioden voornamelijk uit de zuidelijke tot westelijke windrichtingen (Z, ZZW, ZW, WZW, W) met per windrichting een kans van voorkomen rondom de 10%. De overige windrichtingen zorgen gezamenlijk voor de overige 50% kans, met nog een iets grotere bijdrage uit noordelijke en oostelijke richting.



Figuur 3-15: De windroos voor meetpunt Houtribdijk tijdens de meetperiode. De grijzen ringen geven stapjes van 5% kans van voorkomen aan.



Figuur 3-16: Windroos voor langdurige windmetingen bij meetpunt Houtribdijk. De grijzen ringen geven stapjes van 5% kans van voorkomen aan.



Figuur 3-17: Onderschrijdingskans voor windsnelheid bij noordwestenwind (292,5 – 337,5°) bij meetpunt Lelystad (links) en Houtribdijk (rechts).

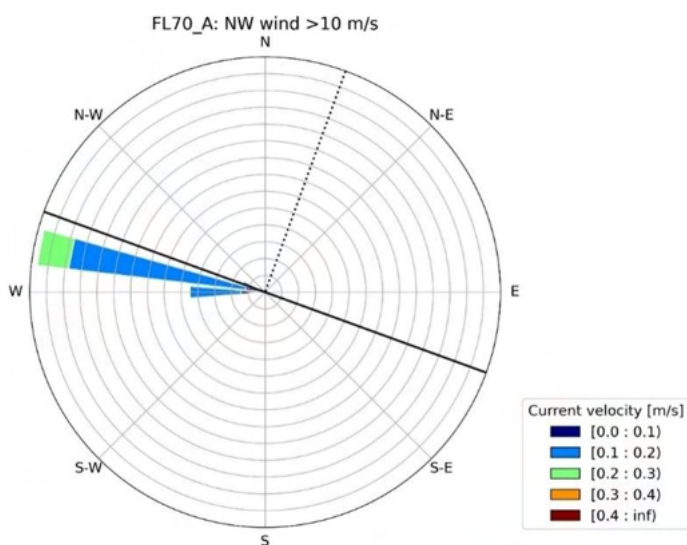


Wel zijn er nog een aantal kleine verschillen tussen de meetperiode langs de Houtribdijk en de langjarige windmetingen.

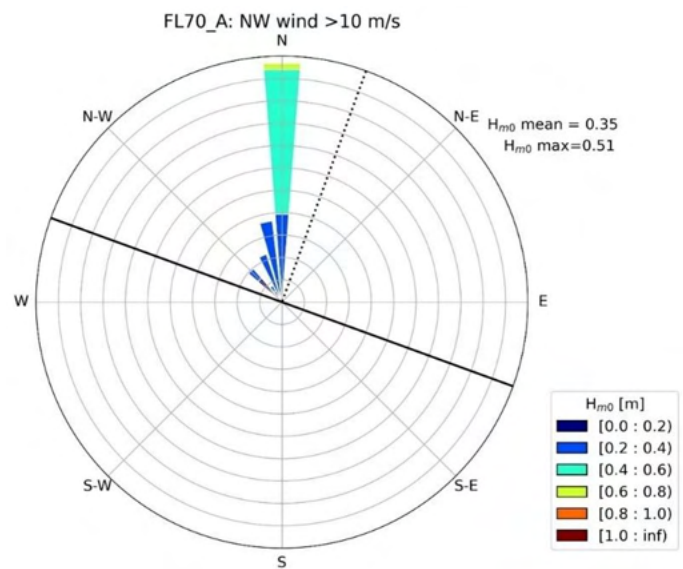
- Tijdens de meetperiode komt de wind iets vaker uit zuidwestelijke richting met gemiddeld een iets hogere windsnelheid (Figuur 3-17).
- Noordwestenwind (292,5 – 337,5°) komt gemiddeld ongeveer 25 tot 30 dagen per jaar voor. In de meetperiode was dit slechts ongeveer 20 dagen. Daarbij lag de windsnelheid zelden hoger dan 10 m/s (windkracht 5)

Het nagenoeg ontbreken van Noordwesterstormen binnen de meetperiode heeft mogelijk consequenties voor de representativiteit van de morfologische veranderingen in de meetperiode voor de langjarige dynamiek. Omdat deze windrichting grofweg parallel ligt aan de Houtribdijk zijn er bij de Houtribdijk ook grotere morfologische veranderingen te verwachten bij harde wind vanuit het noordwesten, met significante langstransporten. Daarentegen is het verschil in wind uit de zuidwestelijke richting relatief klein, waardoor redelijkerwijs kan worden aangenomen dat dit geen significante consequenties heeft voor de representativiteit van de morfologische veranderingen.

Figuur 3-18 en Figuur 3-19 tonen respectievelijk de stromingsroos en golfroos voor locatie FL70A voor perioden met relatief harde wind vanuit het noordwesten (sectorbreedte: 45 graden rond NW, windsnelheden boven 10 m/s). Bij deze windcondities treedt stroming op van 0,1-0,3 m/s, parallel aan de dijk, met een stromingsrichting vanuit WNW (dus richting OZO). Uit Figuur 3-13 blijkt dat deze stroming niet uniek is voor harde NW-wind, het past binnen het reguliere stromingspatroon op deze locatie. Golven bij harde NW-wind komen bij locatie FL70A voornamelijk uit het NNW tot N, zo blijkt uit Figuur 3-19. Ook voor deze golven geldt dat ze passen binnen de totale golfroos van Figuur 3-14. De conclusie is dat bij harde NW-wind sprake is van relatief haakse golfinval bij locatie FL70A, gecombineerd met relatief sterke stroming richting OZO. Dit is morfologisch gezien een relevante combinatie, maar niet fundamenteel anders dan het golf- en stromingsklimaat bij andere windrichtingen. Ook wind vanuit bijvoorbeeld de windrichtingen W en N kan relevante morfologische activiteit veroorzaken bij locatie FL70A.

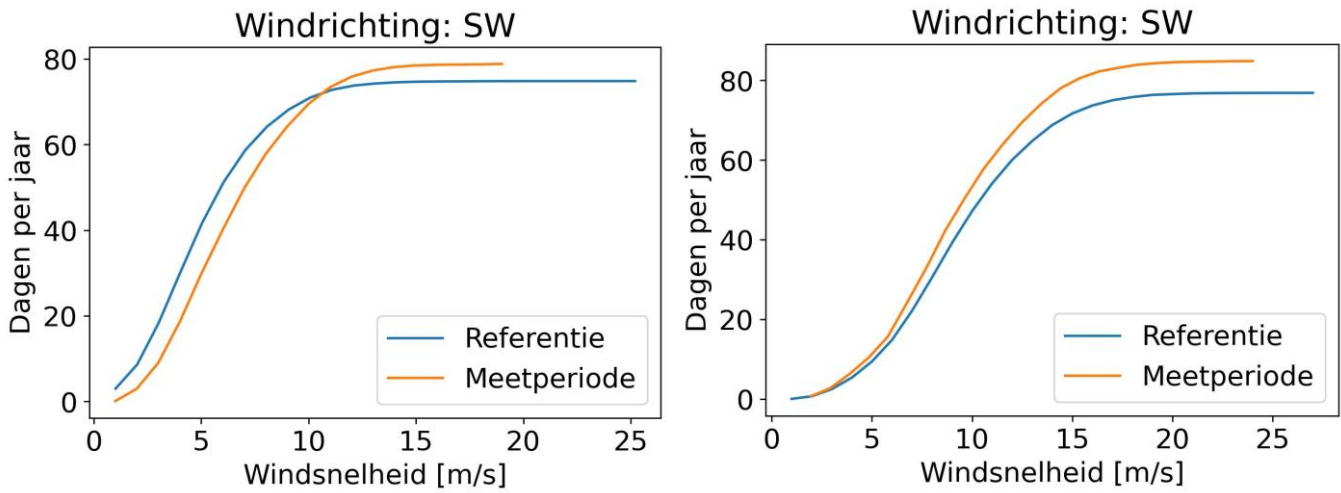


Figuur 3-18: Stromingsroos voor locatie FL70A voor perioden met relatief harde NW-wind



Figuur 3-19: Golfroos voor locatie FL70A voor perioden met relatief harde NW-wind

Het stromingsklimaat is waarschijnlijk wat de stromingsrichting betreft vergelijkbaar tijdens de meetperiode en de periode daarbuiten. Op basis van het werk van Anne Ton (Ton et al., 2022), is er een sterke correlatie tussen de windrichting en de stromingsrichting op het Markermeer (Figuur 3-3). Bij windrichtingen tussen 35 en 195° ontstaat er meestal een stroming uit zuidwestelijke richting langs de zuidzijde van de Houtribdijk, oftewel tegen de klok in. Bij de overige windrichtingen ontstaat er overwegend een stroming uit noordwestelijke richting langs de Houtribdijk, oftewel met de klok mee in het Markermeer. De windrichtingen die resulteren in een stroming tegen de klok in komen zowel tijdens de meetperiode als daarbuiten ongeveer 40% van de tijd voor bij meetpunt Lelystad. Voor de windrichtingen die resulteren in een stroming met de klok mee is dit ongeveer 60%. Uit Figuur 3-3 volgt ook dat de stroomsnelheden bij stroming met de klok mee hoger zijn dan bij stroming tegen de klok in.



Figuur 3-20: Onderschrijdingskans voor windsnelheid bij zuidwestenwind (202,5 – 247,5°) bij meetpunt Lelystad (links) en Houtribdijk (rechts).

## 4 Steemanalyse morfologische ontwikkelingen

### 4.1 Inleiding

In het voorliggende hoofdstuk wordt toegewerkt naar een kwalitatieve inschatting van de toekomstige morfologische ontwikkelingen van de zandige waterkering van de Houtribdijk. Een dergelijke inschatting is, in combinatie met een mogelijk evenwichtprofiel, nodig om tot een onderbouwd advies te komen wat betreft de structurele suppletiebehoefte van deze waterkering. Daartoe worden de volgende stappen gevolgd. Eerst worden de belangrijkste resultaten van de basisanalyse morfologische ontwikkelingen (Hoofdstuk 2) uitgelicht in sectie 4.2. Hierbij worden de resultaten van de dwars- en langsrichting per (deel)gebied samengevoegd. Hierna volgt in sectie 4.3 de duiding van de morfologische ontwikkelingen (onderzoeksvraag 3), waarbij eerst de rol van zetting wordt uitgelicht in sectie 4.3.1. In hoofdstuk 2 werd de samenhang met constructies duidelijk, welke verder zal worden toegelicht in sectie 4.3.2. De relatie met forcering (zie hoofdstuk 3) en het plateau volgen respectievelijk in sectie 4.3.3 en sectie 4.3.4. In sectie 4.4 de indicatie gegeven van de verwachte toekomstige structurele morfologische ontwikkelingen. Tot slot wordt de aanwezigheid van een mogelijk evenwichtprofiel onderzocht in sectie 4.5. Per deelgebied is een overzicht/samenvatting van de verschillende stappen aan het einde van dit hoofdstuk te vinden (sectie 4.6).

### 4.2 Integratie profiel- en oeverlijnontwikkeling

In de basisanalyse (Hoofdstuk 2) zijn zes deelgebieden naar voren gekomen met elk een kenmerkende morfologische ontwikkeling. De ligging van deze deelgebieden is in rood weergegeven in Figuur 4-1. De IJsselmeerzijde is opgesplitst in twee deelgebieden:

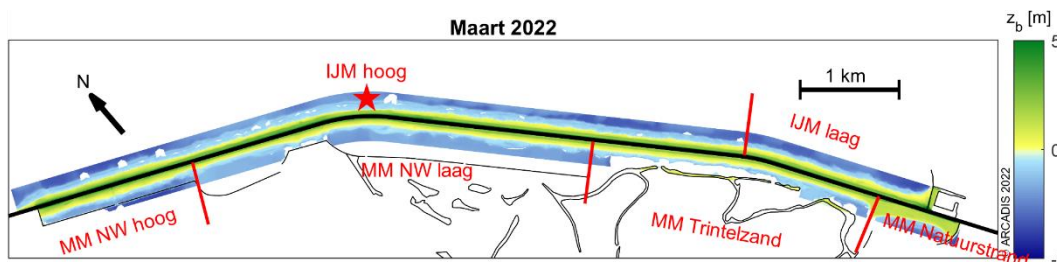
- IJM hoog: profiel 51500 – 59000
- IJM laag: profiel 59000 – 61000

De overgang tussen de twee deelgebieden is net ten noordwesten gelegen van het tweede knikpunt. Hierdoor omvat IJM hoog dus bijna de gehele zijde. IJM laag bevat Detailgebied 2, maar loopt aan beide kanten verder door.

De Markermeerzijde heeft vier deelgebieden, namelijk (van noordwest naar zuidoost):

- MM NW hoog: profiel 51850 – 53350
- MM NW laag: profiel 53350 – 57500
- MM Trintelzand: profiel 57500 – 60400
- MM Natuurstrand: profiel 60400 – 61200

Deze vier deelgebieden komen overeen met de gebieden in sectie 2.3.2.3 (zie Figuur 2-10). MM Natuurstrand komt overeen met detailgebied 3 en MM NW hoog omvat, maar is niet beperkt tot, detailgebied 4.



Figuur 4-1 De ligging van de zes geïdentificeerde deelgebieden (in rood) waarbij rode lijnen de grens weergeeft. Onderliggend de bodemligging in maart 2022.

De resultaten wat betreft profiel- en oeverlijnontwikkeling uit Hoofdstuk 2 worden hier per deelgebied geïntegreerd. Daarbij worden de belangrijke en relevante uitkomsten uitgelicht.

#### 4.2.1 IJM hoog

De morfologische ontwikkelingen in dit gebied worden gedomineerd door de plateauontwikkelingen. Hierbij zijn de veranderingen voornamelijk in de dwarsrichting. In alle profielen is een plateau te zien, gelegen op een diepte van circa

NAP-0,8 m. Doordat de breedte van het plateau varieert in tijd en ruimte en doordat het plateau zelf een helling heeft, is er geen eenduidige diepte van de bovenkant en onderkant van het plateau te definiëren. Wel is duidelijk dat er structureel erosie plaatsvindt in het steile talud rond de waterlijn, dus boven het plateau. Deze erosie is gemiddeld circa 10 m<sup>3</sup>/m/jaar. Grofweg een derde hiervan komt direct terecht op het onderwatertalud onder het plateau. Een ander gedeelte komt d.m.v. langstransport in het deelgebied IJM laag terecht. De rest van het zand wordt naar dieper water getransporteerd.

Aan de noordwestkant van IJM hoog (grofweg tussen profiel 52000 en 53500) is de erosie boven het plateau gemiddeld iets hoger dan bovengenoemde waarde. Deze (extra) erosie treedt vooral hoger in het profiel op en is dus vooral goed zichtbaar in de hogere volumeschijven (bijvoorbeeld tussen 1 m en 0 NAP, zie Figuur 2-18).

Rond profiel 52900 is relatief veel erosie te zien aan de bovenkant van het plateau en relatief weinig depositie op het onderwatertalud onder het plateau. Dit is bijvoorbeeld goed zichtbaar in Figuur 2-26 (aangegeven met zwarte ovaal), waarbij ook te zien is dat het plateau hier relatief ver van de dijk is gelegen (zie ook MOL-positie, Figuur 2-30). Hiermee is deze lokale extra erosie geen indicatie voor zandtekort rond dit profiel en verder geen aandachtspunt in de toekomstige ontwikkelingen en het advies suppletie-ontwerp.

Ondanks dat dit deelgebied gedomineerd wordt door ontwikkelingen in de dwarsrichting, is op detailniveau rond profiel 55500 (net ten zuidoosten van het bij profiel 55200 gelegen knikpunt in de Houtribdijk) een relevante ontwikkeling in de langsrichting naar voren is gekomen. Er is hier sprake van een lokale herverdeling van zand van de bovenkant van het plateau rond het knikpunt naar diepere gebieden aan weerszijde van de knik. Dit proces komt boven op de profielontwikkeling die dit deelgebied kenmerkt, waardoor er relatief veel erosie aan de bovenkant van het plateau plaatsvindt, namelijk circa 20 m<sup>3</sup>/m/jaar. Deze erosie is een aandachtspunt voor het suppletie-ontwerp, zeker omdat MOL-positie hier relatief ver dijkwaarts is gelegen.

#### 4.2.2 IJM laag

Net als bij deelgebied IJM hoog is ook hier duidelijk sprake van een plateau met erosie aan de bovenkant en depositie op het onderwatertalud onder het plateau. Uit de profielanalyse in Hoofdstuk 2 bleek de erosie hier grofweg in balans met de depositie: beide grofweg 2,5 m<sup>3</sup>/m/jaar. Het is echter duidelijk dat de erosie, zeker in de volumeschijf tussen 1 m en 0 NAP, flink wordt onderschat: Figuur 2-18 laat zien dat er hier sinds maart 2020 erosie plaatsvindt, maar in de bulkgetallen in Tabel 2-1 wordt deze gecompenseerd door de depositie in de periode tot maart 2020. Deze trendbreuk is ook zichtbaar in Figuur 2-21 (groene lijn, rechter figuur). Als alleen de periode sinds maart 2020 wordt beschouwd, is de totale erosie aan de bovenkant van het plateau grofweg 4,5 m<sup>3</sup>/m/jaar. Dit is nog steeds ruim de helft minder dan in het deelgebied IJM hoog. Netto gezien komt ruim de helft van het geërodeerde zandvolume direct op het onderwatertalud onder het plateau terecht. De rest komt dieper op het profiel te liggen.

Er is een aanvoer van zand vanuit het deelgebied IJM laag. Een gedeelte hiervan zorgt waarschijnlijk voor de relatief beperkte erosie aan de bovenkant van het plateau, en een gedeelte zal dieper op het profiel terechtkomen.

#### 4.2.3 MM NW hoog

Dit deelgebied wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van een golfbreker relatief dicht bij de dijk. Er is geen sprake van een duidelijk plateau of plateauvorming. Er is erosie aan de hoger in het profiel en depositie achter de golfbreker. De overgang tussen erosie en depositie is rond NAP-1,5 m, maar dat is profielafhankelijk. De erosie is grofweg 6 m<sup>3</sup>/m/jaar. Voor een zandige waterkering achter een dam is dit een relatief hoog getal wat nog geduid zal worden. Een deel van dit zandvolume blijft behouden tussen de dijk en de golfbreker.

#### 4.2.4 MM NW laag

In het deelgebied MM NW laag is het plateau minder prominent en minder dynamisch. Er vindt überhaupt relatief weinig morfologische verandering plaats, ondanks dat de golfbreker hier verder van de waterkering gelegen is. De erosie aan de bovenkant van het plateau is circa 2 m<sup>3</sup>/m/jaar; dit volume is deels zetting en de rest verspreidt zich over de vlakte tussen het plateau en de golfbreker, voornamelijk aan de voet van de teen.

#### 4.2.5 MM Trintelzand

Het deelgebied met de minste morfologische veranderingen is MM Trintelzand. In de profielen is ook geen plateau bij de zandige waterkering tegen de dijk aanwezig. Wel is te zien dat over het gehele talud minieme erosie plaatsvindt.

Deze erosie is minder dan 1 m<sup>3</sup>/m/jaar. Daarbij moet worden opgemerkt dat 1) een deel hiervan zetting is en 2) de vele gaten in de metingen achter Trintelzand – vooral onder water – dit kwantificeren bemoeilijken.

#### 4.2.6 MM Natuurstrand

Dit deelgebied (het natuurstrand) heeft net als de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk een duidelijk plateau met erosie aan de bovenkant en depositie op het onderwatertalud onder het plateau. Daarnaast vindt hier een lokale herverdeling van zand plaats met (extra) erosie in het midden van het gebied en (extra) depositie aan weerszijden tegen de dwarsdammen.

De gemiddelde erosie aan de bovenkant is met ~10 m<sup>3</sup>/m/jaar ook vergelijkbaar met de IJsselmeerzijde, maar een kleiner gedeelte komt aan de teen van het plateau terecht, namelijk minder dan 2 m<sup>3</sup>/m/jaar. Door de sterke lokale herverdeling is deze gemiddelde erosie/depositiewaarde echter niet representatief voor dit gebied. Wat echter wel duidelijk is, is dat relatief veel zandvolume dieper op het profiel terechtkomt. Daarnaast is duidelijk dat de erosie deels relatief hoog in het profiel plaatsvindt (boven NAP+1 m).

Aan de zijkanten van dit deelgebied is de erosie aan de bovenkant van het plateau minder dan 5 m<sup>3</sup>/m/jaar en voor sommige profielen is er zelf sprake van depositie. Op het onderwatertalud onder het plateau neemt de depositie richting de dwarsdammen toe tot ruim 10 m<sup>3</sup>/m/jaar. Daarentegen piekt de erosie hoog in het profiel tot circa 20 m<sup>3</sup>/m/jaar in het midden van dit deelgebied. Tegelijkertijd is hier geen depositie aan de teen van het plateau, er is zelfs sprake van lichte erosie. De terugtrekking van de MOL-positie is in het midden van het deelgebied met 5 m/jaar ook (voor deze zijde van de Houtribdijk) ook maximaal, waarbij moet worden opgemerkt dat de MOL relatief ver van de dijk gelegen is.

### 4.3 Verklaring morfologische ontwikkelingen

#### 4.3.1 Zetting

In Hoofdstuk 2 werd alle volumeafname boven NAP+1 m al toegeschreven aan zetting, maar ook/voornamelijk lager in het profiel zijn de effecten van zetting aanwezig. Bij zetting in het algemeen is er een relatie met 1) de dikte/ophoging van de zandige waterkering (en dus de oorspronkelijke diepte), en 2) de tijd sinds aanleg. In de ontwerpnota (*HRD-ONA-0172\_ontwerpnota\_zachteversterking*) is de benodigde zettingscompensatie voor periodes van 2 en 50 jaar dan ook bepaald als functie van de dikte van de zandige waterkering. Deze relatie is bepaald aan de hand van gemeten zetting in de pilot Houtribdijk. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze relatie afhangt van de profiellocatie, waardoor de totale zettingscompensatie in het ontwerp varieerde tussen de 6% en 39% van het totale profielvolume. In het ontwerp werd geschat dat grofweg 40% van de zetting in de eerste 2 jaar zou plaatsvinden, namelijk tussen de 0 en 0,5 m (afhankelijk van lokale dikte zandschijf).

De toename van zetting met de dikte is ook terug te zien in de resultaten, vooral wanneer de individuele profielen worden bekeken. Zo is de zetting hoger in het profiel duidelijk in Figuur 2-8, Figuur 2-11 en Figuur 2-12. Echter, er is relatief weinig zetting tegen de dijk (bijvoorbeeld links van Figuur 2-11) omdat de oorspronkelijke dikte van de zandige waterkering hier minder was omdat de bodem (dijk) hier hoger ligt. Bovendien ligt de oorspronkelijke dijk op een cunet wat minder inzakt dan de meerbodem waar de rest van de zandige versterking op steunt. Daarnaast is duidelijk dat er aanmerkelijk meer zetting plaatsvindt aan de noordwestkant van de Houtribdijk, grofweg tussen profiel 52000 en 53500 (MM NW hoog en deel van IJM hoog).

Uit eerder onderzoek (Hahn et al., 2020) is gebleken dat de zetting in de eerste zes maanden na aanleg van de zandige waterkering (eerste helft 2019) vele malen groter was dan in de periode van 12-18 maanden daarna. In dat onderzoek is specifiek naar de vier detailgebieden gekeken. Voor deze gebieden bleek dat de daadwerkelijke zetting in de periode tot juli 2020 goed overeenkomt met de ontwerpnota.

Voor de uitvoering van het voorliggende onderzoek is gepoogd om de erosie (per profiel/vak/deelgebied) kwantitatief te compenseren voor zetting. Hierbij is gebruik gemaakt van bovengenoemde relatie tussen zetting en dikte zandige waterkering. Deze analyse werd bemoeilijkt doordat de periode van 2 jaar waarvoor de zetting geschat en door Hahn et al. (2020) bepaald is (direct na aanleg zandige waterkering) niet overeenkomt met periode van 2 jaar die in het voorliggende onderzoek geanalyseerd is. Daarnaast/daardoor gaf deze analyse geen eenduidige resultaten. Zo is bij vrijwel alle profielen de totale gemeten erosie (veel) lager dan de verwachte zetting. Bij de deelgebieden MM NW laag en MM Trintelzand komt de verwachte zetting in de eerste 100 m van een profiel neer op meer dan 10 m<sup>3</sup>/m terwijl de totale erosie hier een orde-van-grootte minder is. Ook bij noordwestkant van de Houtribdijk waar relatief veel zetting



zichtbaar lijkt te zijn in de gemeten profielen is de totale erosie tussen plateau en dijk (minder dan 22 m<sup>3</sup>/m) lager dan de geschatte zetting (meer dan 30 m<sup>3</sup>/m).

Het verder uitwerken van de kwantitatieve analyse ligt buiten de scope van het voorliggende onderzoek en is niet doelmatig om tot toekomstige morfologische ontwikkelingen en suppletievolumes te komen. Daarom is er hier voor een pragmatische aanpak gekozen. In deze benadering wordt op basis van de profielontwikkelingen en expert judgement de zetting bepaald. Daarbij wordt alleen naar de erosie gekeken en wordt dus niet de depositie gecorrigeerd. In andere woorden, de negatieve volumeveranderingen worden (per deelgebied) opgesplitst in zetting en structurele erosie.

#### 4.3.1.1 IJM hoog

De zetting boven NAP+1 m in Hoofdstuk 2 voor dit deelgebied bedroeg gemiddeld circa 2 m<sup>3</sup>/m/jaar. Dit is binnen het profiel de zetting over een lengte van ~40 m, oftewel ongeveer 5 cm. De vraag is hoeveel van de erosie aan de bovenkant van het plateau (~10 m<sup>3</sup>/m/jaar, zie sectie 4.2.1) ook zetting is. Deze erosie vindt plaats over een lengte van ~30 m, exclusief het plateau zelf omdat hier over het algemeen relatief weinig morfologische verandering optreden. Waarschijnlijk is de zetting aan de bovenkant van het plateau groter omdat de zandschijf hier dikker is. Hier wordt echter uitgegaan van een conservatief uitgangspunt waarbij zetting boven NAP+1 m gelijk (~5 cm) is aan zetting aan de bovenkant van het plateau. Dit is conservatief omdat er dan meer volumeafname wordt toegewezen aan structurele erosie. Hiermee komt de gemiddelde geschatte zetting op 5 cm x 30 m = 1,5 m<sup>3</sup>/m/jaar. Hiermee is de structurele erosie 8,5 m<sup>3</sup>/m/jaar.

De grotere volumeafname aan de noordwestkant van IJM hoog wijst op meer zetting. Deze wordt niet los bepaald, maar er wordt vanuit gegaan dat de structurele erosie hier niet substantieel anders is dan in de rest van het deelgebied

#### 4.3.1.2 IJM laag

De zetting boven NAP+1 m in detailgebied 2 is minimaal, namelijk 0,3 m<sup>3</sup>/m/jaar (zie Hoofdstuk 2) over een lengte van 40 m. Het is onwaarschijnlijk dat op deze hoogte meer zetting heeft plaatsgevonden wat dan deels is gecompenseerd door aanvoer van zand in de dwars- of langsrichting. Waarschijnlijk is de zetting hier lager vanwege minder diepe oorspronkelijke bodemligging. De zetting boven NAP+1 m wordt geschat op minder dan 1 cm. Dit wordt wederom, met dezelfde conservatieve benadering, geëxtrapoleerd naar de bovenkant van het plateau (over een lengte van ~30 m). Dit staat gelijk aan 0,2 m<sup>3</sup>/m/jaar. Hiermee komt de structurele erosie op (4,5 – 0,2 =) 4,3 m<sup>3</sup>/m/jaar.

#### 4.3.1.3 MM NW hoog

In dit deelgebied is de totale erosie grofweg 6 m<sup>3</sup>/m/jaar. Deze vindt over het gehele profiel boven NAP-1,5 m plaats. Daarnaast is er vaak geen sprake van een plateau. In de gevallen dat er wel een (klein) plateau te zien is, is de erosie aan de bovenkant hiervan relatief laag (bijvoorbeeld Figuur 6-24). De zetting boven NAP+1 m is in detailgebied 4 ook het hoogst van alle detailgebieden. Daaruit kan worden afgeleid dat de zetting hier relatief veel erosie kan verklaren. Na het behandelen van de duiding aan de hand van constructies, forcering en plateau in de volgende secties wordt de structurele erosie geschat aan de hand van een vergelijking met het aangrenzende deelgebied (MM NW laag), waar wel een plateau met bijbehorende erosie aan de bovenkant duidelijk is.

#### 4.3.1.4 MM NW laag

De zetting boven NAP+1 m in Hoofdstuk 2 voor de gehele Markermeerzijde van de Houtribdijk bedroeg gemiddeld circa 1,5 m<sup>3</sup>/m/jaar. Echter, dit is inclusief MM NW hoog en MM Natuurstrand waar deze waarde relatief hoog is. Als hiervoor wordt gecorrigeerd is de gemiddelde zetting voor MM MW laag (en MM Trintelzand) ongeveer 1,1 m<sup>3</sup>/m/jaar. Voor dit deelgebied is dat over een lengte van 30 m, gelijk aan de lengte waarover de erosie aan de bovenkant van het plateau plaatsvindt. Daarmee is de structurele erosie op (2,0 – 1,1 =) 0,9 m<sup>3</sup>/m/jaar.

#### 4.3.1.5 MM Trintelzand

Voor dit deelgebied is de erosie überhaupt al minimaal. Waarschijnlijk is dit bijna volledig door zetting. Er kan dan ook vanuit worden gegaan dat er in dit gebied geen substantiële structurele erosie plaatsvindt.

#### 4.3.1.6 MM Natuurstrand

Bij het natuurstrand is het gebied tussen de dijk en het plateau relatief lang, namelijk 60 m in het centrum en 100 m aan weerszijden. Dit is een deel van de reden dat de totale erosie boven NAP+1 m in Hoofdstuk 2 relatief groot is. Echter,

deels is dit ook erosie aan de bovenkant van het plateau (zie Figuur 2-15). De zetting in het gebied tussen de dijk en de erosie aan de bovenkant van plateau wordt hier bepaald door de gemiddelde daling in dit gebied. Dit komt neer op (gemiddeld) 4 cm per jaar. De erosie aan de bovenkant van het plateau vindt plaats over een lengte van circa 40 m, wat vertaalt naar een totale zetting van 1,6 m<sup>3</sup>/m/jaar en dus een structurele erosie van circa 18,4 m<sup>3</sup>/m/jaar in het midden van dit deelgebied.

### 4.3.2 Constructies

Aan de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk zijn er kustlangs geen golfbrekers aanwezig. Hierdoor zijn de profielen aan deze zijde relatief uniform. Het dwarstransport (gecorrigeerd voor zetting) in de deelgebieden IJM hoog en IJM laag wordt alleen bepaald door de forcering en de oriëntatie van de dijk. De enige harde constructie aan deze zijde is de havendam aan de zuidoostgrens van IJM laag (zie Figuur 2-4). Deze zorgt voor een gradiënt in langtransport, waardoor het (vanuit IJM hoog) aangevoerde zand in IJM laag cumuleert. Bij IJM hoog zijn geen dwarsdammen en dus geen hierdoor geforceerde gradiënten in langtransport.

Aan de Markermeerzijde zijn wel golfbrekers en andere constructies aanwezig die invloed hebben op het dwars- en langtransport. Bij MM NW hoog beschermt de golfbreker dicht bij de dijk de zandige waterkering tegen erosie door golven, wat verder zal worden toegelicht in sectie 4.3.3.3. De golfbreker zorgt er indirect voor dat er geen aanzienlijke plateau-ontwikkeling is en dus ook voor relatief lage erosievolumes. Hetzelfde kan worden geconcludeerd voor MM NW laag, ondanks dat de golfbreker verder van de dijk is gelegen. Trintelzand beschermt het deelgebied MM Trintelzand dusdanig dat er hier geen sprake is van structurele erosie. Bij MM natuurstrand zijn geen golfbrekers aanwezig, waardoor er hier wel plateaus zijn ontstaan en relatief veel erosie. De dwarsdammen aan beide zijden zorgen voor gradiënten in langtransport waarbij het transport van het midden van het deelgebied naar de beide zijden gericht is.

### 4.3.3 Forcering

#### 4.3.3.1 IJM hoog (FL70)

De meetlocatie FL70 is in deelgebied IJM hoog gelegen. In sectie 3.2.5 is te vinden dat de oriëntatie van de dijk hier dusdanig is dat golven uit veel richtingen (van het noordwesten tot oosten) hier de dijk bereiken. De golven buigen over de oever richting dijknormaal. Daarnaast zijn vanuit verschillende richtingen de golfhoogte dicht bij de dijk relatief hoog. In combinatie met de aanzienlijke stroming zorgt ervoor dat dit het gebied is met de hoogste structurele erosie. De stroming langs de dijk is dicht bij de zandige waterkering voornamelijk in zuidoostelijke richting, waar deze verder van de dijk gelijkmatig(er) verdeeld is over beide richtingen. Dit verklaart het langtransport in de richting van IJM laag.

#### 4.3.3.2 IJM laag (FL69)

De meetlocatie FL69 – in deelgebied IJM laag – laat zien dat de golven hier lager zijn dan in IJM hoog. Voornamelijk de golven uit het noorden/noordwesten zijn minder energiek, logischerwijs vanwege de oriëntatie van dijk. Dit verklaart ook deels waarom in dit deelgebied de structurele erosie lager is. Het andere deel kan worden verklaard door langtransport waarvoor langsstroming nodig is. De stroming in dit gedeelte van het IJsselmeer is voornamelijk vanuit het zuidoosten, maar de havendam zorgt soms voor een stroming in tegenovergestelde richting dicht bij de dijk. Hierdoor is de stroming dicht bij de oever gelijkmatig verdeeld in beide richtingen langs de dijk. De stroming zelf zorgt dus niet voor gradiënten in langtransport, alleen de havendam zelf.

#### 4.3.3.3 MM NW hoog (FL68)

De forcering in dit gebied wordt gedomineerd door de golfbreker. De golven die aankomen bij de golfbreker komen voornamelijk uit het zuidwesten en hebben een gemiddelde significante golfhoogte van 0,15 m en een maximale significante golfhoogte van 0,68 m. Na het passeren van de golfbreker blijven alleen golven uit het westen over de gemiddelde significante golfhoogte slechts 0,05 m is. Alleen de hoogste golven vanuit het zuidwesten passeren de golfbreker, de maximale significante golfhoogte van 0,28 m achter de golfbreker is dan ook vanuit het zuidwesten. Deze verminderde forcering verklaart het gebrek aan plateaudynamica en structurele erosie dat ten opzichte van de IJsselmeerzijde veel lager is.

#### 4.3.3.4 MM NW laag

Bij dit deelgebied is geen meetopstelling aanwezig geweest. Het is waarschijnlijk dat het golfklimaat meerwaarts van de golfbreker vergelijkbaar is met MM NW hoog. Ook hier zal de golfbreker een deel van de golfenergie wegfilteren. De plateauvorming met bijbehorende structurele erosie suggereert dat de golven dicht bij de zandige waterkering hier hoger

zijn dan bij MM NW hoog, waarschijnlijk omdat de golfbreker verder van de dijk ligt en dus golven weer aan energie kunnen winnen.

#### 4.3.3.5 MM Trintelzand

Het gebrek aan structurele erosie en de ligging van Trintelzand wijzen erop dat er bij de zandige oever geen substantiële forcering plaatsvindt.

#### 4.3.3.6 MM Natuurstrand (FL67)

Vergelijkbaar met deelgebied IJM laag zorgen de dwarsdammen hier deels voor een omkering van de stroming. Verder van de dijk is deze voornamelijk uit het noordwesten en dichterbij in beide richtingen. Dit komt overeen met de lokale ververdeling van zand met extra erosie in het midden van het deelgebied en verminderde erosie aan de flanken. De gemiddeld relatief hoge erosie in dit deelgebied komt overeen met de relatief hoge golven (geen golfbreker) die bij de oever arriveren.

### 4.3.4 Plateau

Aan de gehele IJsselmeerszijde van de Houtribdijk en in de deelgebieden MM NW laag en MM Natuurstrand is een plateau aanwezig. Dit zijn ook de gebieden met relatief veel structurele erosie. Er lijkt echter geen significant verband te zijn tussen de dimensies van het plateau (breedte, hoogte, helling) en de mate van erosie. Bovendien zorgen veranderingen in het plateau ook niet voor een morfologische feedback en verandering in erosie. Het plateau ontstaat dus als gevolg van de structurele ontwikkelingen en niet andersom. Daarom wordt het plateau zelf verder niet meegenomen in de duiding.

### 4.3.5 Vergelijking MM NW hoog en laag

Behalve voor deelgebied MM NW hoog is voor alle deelgebieden de structurele erosie door middel van expert judgement gecorrigeerd voor zetting (sectie 4.3.1). Hiervoor is een vergelijking met het aangrenzende deelgebied MM NW laag nodig. Bij MM NW laag is de golfbreker verder van de dijk gelegen, waardoor de forcering bij de dijk zeer waarschijnlijk minimaal net zo hoog is bij MM NW hoog. Daarnaast is er bij MM NW laag wél sprake van een plateau, wat duidt op meer structurele morfologische ontwikkeling. Daarmee is met grote zekerheid te concluderen dat de structurele erosie in deelgebied MM NW laag hoger is dan in MM NW hoog. We kiezen hier voor een conservatief uitgangspunt, waarbij de structurele erosie gelijk is, namelijk  $0,9 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  (sectie 4.3.1.4). Voor MM NW hoog betekent dat een zetting van ongeveer  $5,0 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ .

## 4.4 Toekomstige morfologische ontwikkeling

De structurele erosie in de meetperiode is weergegeven in Tabel 4-1. Hierbij is de waarde gegeven die gecorrigeerd is voor zetting, welke apart in de tabel is weergegeven. Ook geeft Tabel 4-1 het overige volume aan, welke de sluitpost vormt in de gesloten zandbalans van gemeten erosie, depositie en overig volume (gemeten erosie + gemeten depositie + overig volume = 0). Dit overig volume is dus de depositie (indien positief) buiten het betreffende deelgebied en vertegenwoordigt dus het transport naar dieper water (verloren volume) én het transport in de langsrichting naar andere deelgebieden.

Voor de suppletie is het nodig om de verwachte erosie te identificeren. De onderbouwing voor de verwachte erosie in Tabel 4-1 volgt per deelgebied in de volgende secties. Hierbij wordt voor constructies en forcering geïdentificeerd hoe deze in de toekomst eventueel voor een andere ontwikkeling kunnen zorgen als in de meetperiode. Bij forcering wordt hierin expliciet de aanname gedaan dat de forcering in de toekomst overeen zal komen met het langjarig gemiddelde (zie sectie 3.3). Zoals in sectie 4.3.4 naar voren kwam wordt er geen terugkoppeling van het plateau op de toekomstige ontwikkelingen verwacht.

### 4.4.1 IJM hoog

De morfologische verandering in dit deelgebied worden geforceerd uit vele richtingen, waarbij golven uit het noordnoordwesten en oosten dominant zijn. Het nagenoeg ontbreken van Noordwesterstormen binnen de meetperiode zal dus consequenties hebben voor de langjarige dynamiek. In de meetperiode waren er bij meetstation Houtribdijk 20 dagen per jaar met wind vanuit het noordwesten (zie Figuur 3-17), terwijl dit in het langjarig gemiddelde 23 dagen per

jaar zijn (15% meer), zie paragraaf 3.3. Omdat deze windrichting grofweg parallel ligt aan de Houtribdijk, is er bij de Houtribdijk dus ook meer erosie te verwachten bij vaker optreden van harde wind vanuit het noordwesten.

Als de volledige morfologische verandering enkel en alleen afhankelijk is van forcering uit het noordwesten, dan zou een correctiefactor van 15% te rechtvaardigen zijn. In werkelijkheid doen ook andere windrichtingen mee. Uit een analyse in paragraaf 3.3 blijkt dat de stroming en golven bij locatie FL70A niet fundamenteel anders zijn bij noordwestenwind dan bij andere windrichtingen. Het direct koppelen van de structurele erosie aan het optreden van alleen de noordwestenwind zou dus leiden tot een overschatting van de correctiefactor. De correctiefactor wordt hier ingeschat op 10%, waarbij moet worden opgemerkt dat dit nog steeds een conservatieve waarde is. Hiermee komt de verwachte erosie op 9,4 m<sup>3</sup>/m/jaar. Hierbij neemt ook het langstransport in zuidoostelijke richting (richting IJM laag) toe, net als de depositie op het onderwatertalud onder het plateau.

*Tabel 4-1 De morfologische ontwikkeling in de meetperiode en de verwachte structurele erosie per deelgebied per strekkende meter per jaar [m<sup>3</sup>/m/jaar]. De structurele erosie is de bruto afname in volume van de zandige waterkering waarbij gecorrigeerd is voor zetting. De gehele geschatte zetting is weergegeven inclusief de zetting boven NAP+1 m. De verwachte erosie is de vertaling van de gemeten waarde naar de toekomstige morfologische ontwikkeling. Per deelgebied is de gemiddelde waarde van de erosie gegeven en voor MM Natuurstrand ook de bandbreedte.*

Deelgebied	IJM hoog	IJM laag	MM NW hoog	MM NW laag	MM Trintelzand	MM Natuurstrand
Gemeten erosie	-8,5	-4,3	-0,9	-0,9	-0	-8,4 (-0 - -18,4)
Gemeten zetting	-1,5	-0,5	-5,0	-1,7	<-1	-5
Gemeten depositie	3,0	2,2	<1	<1	0	2 (0 – 10)
Overig volume	5,5	2,1	<1	<1	0	10
Verwachte erosie	-9,4	-4,3	-0,9	-0,9	-0	-8,4 (-0 - -18,4)

#### 4.4.2 IJM laag

Ook bij dit deelgebied moet rekening worden gehouden met meer forcering uit het noordwesten dan in de meetperiode is geweest. Echter, door de oriëntatie van de dijk zijn de golven uit het noordwesten hier relatief minder belangrijk zijn voor de morfologische veranderingen (zie sectie 4.3.3.2). Hierdoor zal een eventuele correctiefactor voor de forcering maximaal enkele procenten zijn. Bovendien zal door de sterkere forcering het langstransport vanuit IJM hoog toenemen. De verwachting is dat deze twee componenten grofweg met elkaar in balans zullen zijn. Hierdoor is de verwachte erosie gelijkgezet aan de gemeten erosie.

#### 4.4.3 MM NW hoog

De morfologische veranderingen in dit gebied zijn verklaard door de combinatie golfbreker die de forcering uit het zuidwesten dempt voordat deze de dijk bereikt. In sectie 3.3 blijkt dat de forcering in de meetperiode representatief is voor de verwachtingen. Hierdoor is de verwachte erosie ook hier gelijkgezet aan de gemeten erosie.

#### 4.4.4 MM NW laag en MM Trintelzand

Hetzelfde geldt voor deze deelgebieden. Er zijn geen indicatoren die erop wijzen dat de gemeten erosie niet gelijk zal zijn aan de verwachte erosie.

#### 4.4.5 MM Natuurstrand

De komvorming die in dit deelgebied plaatsvindt zal doorzetten. Op de lange termijn zal erosie in het midden en uitbouw aan de zijkanen zorgen voor een terugkoppelingen richting de forcering en dus de verwachte morfologische veranderingen. Of en wanneer dit gebeurt is moeilijk te voorspellen, maar zal zeer waarschijnlijk niet in het komende decennium sprake van zijn. De verwachte erosie is hierdoor wederom gelijk aan de gemeten erosie, ook omdat de forcering hier vanuit het zuidwesten dominant is.

## 4.5 Evenwichtsprofiel

Een van de doelstellingen van het voorliggende onderzoek is om een eventueel evenwichtsprofiel te identificeren. Bij een evenwichtsprofiel zou er gemiddeld over middellange termijn (maanden tot jaren) geen netto zandtransport van en naar de zandige waterkering zijn. Hiervoor zou sprake moeten zijn van een zogenaamde morfologische feedback, waarbij veranderingen in het profiel ook veranderingen in forcering teweegbrengen (bijvoorbeeld sterkere golfdemping), wat weer invloed heeft op de morfodynamiek. Bij een evenwichtsprofiel betreft het dit dempende feedback waarbij de waterkering dus uiteindelijk grotendeels in balans met de forcering.

Uit de resultaten blijkt dat bij de zandige waterkering aan de Markermeerzijde achter Trintelhaven het profiel al een evenwicht bereikt heeft. Er zijn hier buiten de zetting geen substantiële veranderingen in profielvorm gemeten of verwacht. Buiten dit deelgebied is verder (nog) geen evenwicht bereikt.

In sectie 2.3.4 was al duidelijk dat er geen significante inste-effecten konden worden geïdentificeerd en in sectie 4.3.4 gold hetzelfde voor een terugkoppeling tussen plateauvorming/-ontwikkeling en morfologische ontwikkelingen. Hieruit blijkt dus dat de huidige ontwikkelingen niet op natuurlijke manier tot een evenwichtsprofiel zullen leiden. De geïdentificeerde trends in zandvolume en profielontwikkelingen zijn immers vrijwel lineair.

De vraag is of er überhaupt een evenwichtsprofiel mogelijk is, al dan niet door slim suppleren. Een van de onderzochte mogelijkheden is om op het plateau een zandbank parallel aan de oever aan te brengen. De gedachte hierachter is om de dempende effecten van de golfbrekers en Trintelzand op de erosie te reproduceren. Daarnaast zorgen zandbanken in kustsystemen voor substantiële zandtransporten naar het strand. Bij de Houtribdijk is in sommige profielen van de zandige waterkering op natuurlijke wijze al een kleine zandbank ontstaan aan de meerwaartse rand het plateau (zie Figuur 6-18, Figuur 6-19, Figuur 6-21 en Figuur 6-30). Deze zandbanken zijn echter dusdanig laag dat ze geen invloed zullen hebben op de forcering. Daardoor is ook geen verandering in profielontwikkeling te zien voor deze profielen.

Om wel een effect te bereiken zou de top van de zandbank dusdanig hoog moeten zijn dat de golven erdoor gedempt worden. Omdat de gemiddelde significante golfhoogte enkele decimeters is zou de zandbank dus tot net onder NAP moeten reiken. Hiermee zou de zandbank dus (vanaf het plateau) dus grofweg een meter hoog zijn. Het is echter niet de verwachting dat dit tot een evenwichtsprofiel zal leiden. Zeer waarschijnlijk heeft de zandbank alleen op de korte termijn een dempend effect op de golven. Snel zal de bank zelf eroderen, waarbij slechts een klein gedeelte van het transport in richting van de dijk zal zijn. Het essentiële verschil met kustsystemen is dat het de getijvariaties in waterstand zijn die voor kustwaarts zandtransport zorgen, namelijk doordat golven bij laag water op een andere positie breken dan bij hoog water.

In conclusie blijkt dat er geen evenwichtsprofiel mogelijk is en dat op de lange termijn suppleties nodig zijn om de zandige waterkering te behouden.

## 4.6 Samenvatting per deelgebied

### 4.6.1 IJM hoog

De morfologische ontwikkelingen in dit gebied worden gedomineerd door de dwarsrichting. Er vindt erosie plaats in het steile talud rond de waterlijn, dus boven het plateau. Deze erosie is gemiddeld circa 10 m<sup>3</sup>/m/jaar.

Een deel hiervan is zetting. Door de zetting in het steile talud gelijk te zetten aan de zetting boven NAP+1 (~5 cm), komt de gemiddelde geschatte zetting in het steile talud op 1,5 m<sup>3</sup>/m/jaar. Hiermee is de structurele erosie 8,5 m<sup>3</sup>/m/jaar.

Deze relatief hoge structurele erosie is het gevolg van de afwezigheid van vooroeverdammen en hoge forcering bij de dijk. Golven vanuit verschillende richtingen zijn dicht bij de dijk relatief hoog en buigen over de oever richting dijknormaal. Daarnaast is er een aanzienlijke stroming langs de dijk.

Binnen de meetperiode zijn Noordwesterstormen ondervetegenwoordigd t.o.v. het langjarig gemiddeld. Voor dit deelgebied is dit een belangrijke forceerrichting waardoor een correctiefactor nodig is. De correctiefactor wordt hier ingeschat op 10%. Deze conservatieve waarde is op basis van expert judgement vastgesteld.

Hiermee komt de verwachte gemiddelde erosie op 8,5 x 110% = 9,4 m<sup>3</sup>/m/jaar.



#### 4.6.2 IJM laag

Ook in dit gebied is duidelijk sprake van een plateau met erosie aan de bovenkant en depositie op het onderwatertalud onder het plateau. De totale erosie in het steile talud rond de waterlijn is grofweg  $4,5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ .

De zetting in het steile talud wordt wederom gelijkgezet aan de zetting boven NAP+1 m (geschat op minder dan 1 cm). Dit staat gelijk aan  $0,2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ . Waarschijnlijk is de zetting hier lager vanwege minder diepe oorspronkelijke bodemligging. Hiermee komt de structurele erosie op  $(4,5 - 0,2 =) 4,3 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ .

De lagere erosie (vergeleken met IJM hoog) komt doordat de golven hier lager zijn. Dit verschil is voornamelijk duidelijk bij golven uit het noorden/noordwesten. Daarnaast zorgt de havendam voor een gradiënt in langstransport, waardoor het (vanuit IJM hoog) aangevoerde zand in IJM laag cumuleert.

Ook bij dit deelgebied is de relatief mindere forcering bij noordwestenwind in de meetperiode relevant. Echter, voor de morfologische veranderingen in dit deelgebied zijn de golven uit het noordwesten minder belangrijk dan bij IJM hoog. Bovendien neemt de aanvoer van zand d.m.v. langstransport vanuit IJM hoog ook toe met noordwestenwind. Hierdoor is de verwachte erosie gelijkgezet aan de gemeten erosie ( $4,3 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ ).

#### 4.6.3 MM NW hoog

Dit gebied wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van een golfbreker relatief dicht bij de dijk, hierdoor is de golfenergie bij de zandige waterkering miniem. Er is geen sprake van een duidelijk plateau of plateauvorming. Er is erosie aan de hoger in het profiel (boven NAP-1,5 m) en depositie achter de golfbreker. De erosie is grofweg  $6 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ .

Voor de zettingscorrectie is een vergelijking met het aangrenzende deelgebied MM NW laag nodig. Bij MM NW hoog is de golfbreker dicht bij de dijk gelegen, waardoor de forcering bij de dijk en de structurele erosie zeer waarschijnlijk lager is dan bij MM NW laag. Dit wordt verder onderschreven door het feit dat er bij MM NW laag wél sprake is van een plateau, wat duidt op meer structurele morfologische ontwikkeling. Omwille van een conservatieve benadering is de structurele erosie voor MM NW hoog gelijkgezet aan die van MM NW laag (zie volgende sectie), namelijk  $0,9 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ . Deze waarde is ook toegekend aan de verwachte erosie.

#### 4.6.4 MM NW laag

In tegenstelling tot MM NW hoog is bij MM NW laag wel sprake van plateauvorming, zij het minder prominent dan aan de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk. Ook hier is een golfbreker aanwezig een (groot) deel van de golfenergie wegfilteren. Omdat de golfbreker verder van de dijk ligt zullen de golven dicht bij de zandige waterkering hier waarschijnlijk hoger zijn dan bij MM NW hoog. Dit vermoeden wordt onderschreven door de plateauvorming. De erosie in het steile talud rond de waterlijn aan de bovenkant van het plateau is circa  $2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ .

Het aandeel van zetting wordt wederom bepaald door deze gelijk te zetten aan de zetting boven NAP+1 m, namelijk ongeveer 4 cm. Voor het steile talud komt dat neer op  $1,1 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  aan zetting, hiermee komt de structurele erosie op  $(2,0 - 1,1 =) 0,9 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ . Ook hier is de verwachte erosie gelijkgezet aan de structurele erosie.

#### 4.6.5 MM Trintelzand

In dit gebied vindt over het gehele talud minieme erosie van minder dan  $1 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  plaats. Doordat er geen forcering is bij de zandige waterkering en doordat de erosie volledig toe is geweest aan zetting, kan er worden geconcludeerd dat er in dit gebied geen substantiële structurele of verwachte erosie is.

#### 4.6.6 MM Natuurstrand

Dit gebied wordt gekenmerkt door een prominent plateau met erosie aan de bovenkant (in het steile talud rond de waterlijn) en depositie op het onderwatertalud onder het plateau. Dit dwarstransport is vergelijkbaar met de plateaudynamica aan de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk.

Ook is bij het natuurstrand zandtransport aanwezig van het midden van het gebied naar de zijkanten. Dit langstransport zorgt voor (extra) erosie in het midden van het gebied en (extra) depositie aan de zijkanten.

De totaal gemeten erosie in het steile talud rond de waterlijn is gemiddeld  $\sim 10 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ . Aan de zijkanten is deze erosie tussen de 0 en  $5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  en in het midden circa  $20 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ .

De stroming dicht bij de zandige waterkering is in beide richtingen, wat aansluit met het langtransport richting de dwarsdammen. Dit is het enige gebied aan de Markermeerzijde van de zandige waterkering Houtribdijk zonder constructie voor de oever, waardoor relatief hoge golven kunnen zorgen voor relatief hoge erosie. Deze erosie is vergelijkbaar met die aan de IJsselmeerzijde.

De zetting tussen de dijk en het steile talud rond de waterlijn komt neer op (gemiddeld) 4 cm per jaar. Voor het steile talud is dit gelijk aan een totale zetting van  $1,6 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ . De structurele erosie is gemiddeld dus circa  $8,4 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ . De verwachte erosie is wederom gelijk aan de gemeten structurele erosie.

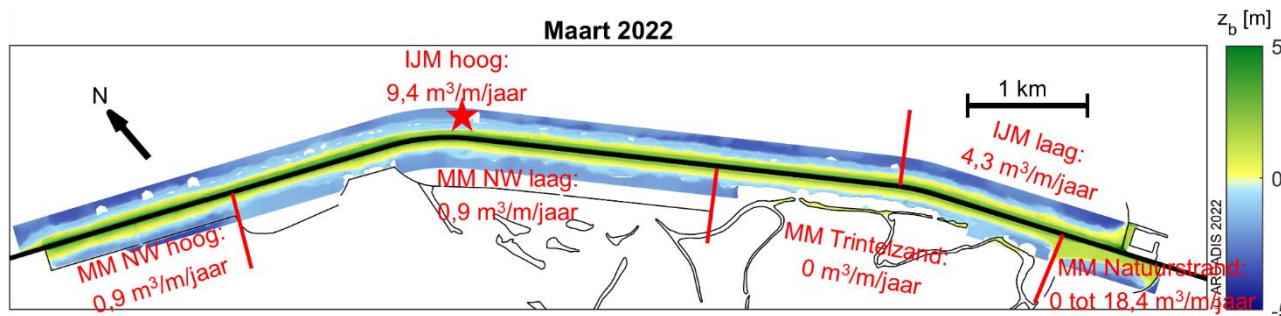
## 5 Advies suppletie-ontwerp

### 5.1 Inleiding

Het hoofddoel van dit onderzoek is om te komen tot handvatten voor een efficiënt suppletie-ontwerp voor de zandige waterkering van de Houtribdijk. Hierbij wordt dus niet een specifiek geplande suppletie ontworpen, maar in kaart gebracht waar sprake is van structurele erosie, welk periodiek onderhoud hierbij nodig is en hoe slim gesuppleerd kan worden. In dit hoofdstuk worden eerst de benodigde suppletievolumes gepresenteerd in sectie 5.1. De handvatten wat betreft dwars- en langsverdeling zijn respectievelijk te vinden in sectie 5.3 en 5.4. Dit hoofdstuk eindigt in sectie 5.4 met een beschouwing over de rol die vegetatie kan spelen bij suppleties.

### 5.2 Benodigde suppletievolumes

Figuur 5-1 toont de bodemligging (maart 2022) van zandige waterkering van de Houtribdijk met de benodigde suppletievolumes per strekkende meter per jaar. Dit zijn de suppletievolumes die nodig zijn om het aangebrachte zandvolume te behouden. Zoals Figuur 5-1 laat zien, is de waterkering voor dit advies - in lijn met Hoofdstuk 4 - opgesplitst in zes deelgebieden. Het is duidelijk dat er een groot verschil is in verwachte structurele erosie, en dus in benodigde suppletievolumes, tussen de IJsselmeer- en de Markermeerzijde.



Figuur 5-1 De benodigde suppletievolumes voor de zandige waterkering van de Houtribdijk in m³/m/jaar opgedeeld in zes deelgebieden. Onderliggend de bodemligging in maart 2022. De rode ster is een locatie met lokaal sterkere erosie waarbij bij een suppletie rekening zal moeten worden gehouden.

Tabel 5-1 geeft dezelfde gemiddelde en ook de totale suppletievolumes per deelgebied. Deze volumes zijn gelijk aan verwachte erosie. Daarnaast zijn ook de benodigde suppletievolumes per zijde en voor de gehele zandige waterkering gegeven. In totaal is de suppletiebehoefte van de zandige waterkering Houtribdijk minder dan 100.000 m³/jaar. Hiervan is 85% nodig aan de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk, en 15% aan de Markermeerzijde.

Het totaal ontwerpvolume van de zandige waterkering Houtribdijk (HRD-ONA-0172\_ontwerpnota\_zachteversterking) was 6,25 Mm³, waarvan 3,40 Mm³ voor de IJsselmeerzijde en 2,85 Mm³ aan de Markermeerzijde. Dat betekent dat de suppletiebehoefte van de zandige waterkering na 10 jaar gelijkstaat aan 23% van het oorspronkelijke volume voor de IJsselmeerzijde en 4% voor de Markermeerzijde.

De ingeschatte suppletievolumes van circa 1 miljoen m³ per 10 jaar kunnen indirect worden vergeleken met de inschatting die vooraf is gemaakt voor het onderhoud. In de ontwerpnota is een onderhoudsbuffer voorzien om verliezen als gevolg van gradiënten in langtransport te compenseren tijdens jaarrondcondities, voor een onderhoudsperiode van 10 jaar. Hierin is een eventueel verlies in de dwarsrichting dus expliciet niet meegenomen, terwijl uit het voorliggende onderzoek blijkt dat dit juist de dominante verliesterm is. Op basis van expert judgement is de bijdrage van verlies door gradiënten in netto langtransport geschat op 10-30%, wat neerkomt op 100.000 tot 300.000 m³. Het in de ontwerpnota vastgestelde volume voor de onderhoudsbuffer bedroeg totaal 170.000 m³ (20.000 m³ voor IJsselmeerzijde en 150.000 m³ voor Markermeerzijde). Deze valt dus binnen de nu gevonden range wat maakt dat de verliezen door langtransportgradiënten dus correct lijken te zijn ingeschat. Dit geldt echter niet voor de in dwarsrichting optredende verliezen die op voorhand als verwaarloosbaar werden ingeschat.

### 5.3 Dwarsverdeling

De gemeten en verwachte erosie aan de zandige waterkering is voornamelijk rond de waterlijn, dus boven het plateau. Dit is rond NAP+0 m. Het advies is ook om een suppletie bij deze locatie aan te leggen. De verwachting is dat een suppletie verder van de dijk sneller en eerder zal eroderen, waarbij het zand grotendeels op dieper water terecht zal komen.

Tabel 5-1 De benodigde suppletievolumes van de zandige waterkering van de Houtribdijk. De volumes zijn zowel gemiddeld (per strekkende meter per jaar [m³/m/jaar]) als totaal (per jaar [m³/jaar]). Het advies is opgesplitst per deelgebied (profiel/transect-nummer toegevoegd), per zijde en totaal.

	Gemiddelde suppletievolumes [m³/m/jaar]	Totale suppletievolumes [1000 m³/jaar]
IJM hoog (51500 – 59000)	9,4	70,5
IJM laag (59000 – 61000)	4,3	8,6
<b>IJsselmeerzijde</b>	8,3	79,1
MM NW hoog (51850 – 53350)	0,9	1,4
MM NW laag (53350 – 57500)	0,9	3,6
MM Trintelzand (57500 – 60400)	-	-
MM Natuurstrand (60400 – 61200)	8,4	7,6
<b>Markermeerzijde</b>	1,6	12,5
<b>Totaal</b>	5,0	94,4

### 5.4 Langsverdeling

In theorie is het mogelijk om meer kustlangse variaties aan te brengen in de zandige oever, vergelijkbaar met de zandmotor. Hierdoor zou erosie in de dwarsrichting gecompenseerd kunnen worden met zandaanvoer voor langtransport. Hiermee moet de kanttekening worden geplaatst dat de zandige waterkering niet volledig in evenwicht zal zijn omdat de “zandmotor” op lange termijn het volume verliest en een nieuwe ingreep nodig zal zijn.

Er zijn echter twee redenen die er sterk op wijzen dat dit voor de Houtribdijk geen efficiënte oplossing is. Ten eerste blijkt uit de morfologische analyse dat een substantiële kustlangse variatie in zandige waterkering leidt tot een lokale toename in erosie (bijvoorbeeld bij IJsselmeerzijde metering 52,9, zie sectie 2.4.3.1). Ten tweede is de geïdentificeerde depositie door langtransport voornamelijk op het onderwatertalud onder het plateau slechts een klein gedeelte bij het strand. Alleen bij het natuurstrand aan de Markermeerzijde bij de dwarsdammen is de erosie (bijna) in evenwicht met de depositie. Voor de IJsselmeerzijde is het advies dan ook om binnen de twee geïdentificeerde deelgebieden in de langsrichting uniform te suppleren.

In de langsverdeling van een suppletie aan de IJsselmeerzijde dient wel rekening te worden gehouden de lokale herverdeling rond metering 55 500 (rode ster in Figuur 5-1). Er vindt hier grofweg twee keer zover erosie plaats, daarnaast is de MOL-positie hier relatief dicht bij de dijk. Daarom adviseren we om tussen knikpunt en dit profiel – dus tussen profielen 55 200 en 55 500) het suppletievolume te verdubbelen (18,8 m³/m/jaar i.p.v. 9,4 m³/m/jaar).

Voor de Markermeerzijde geldt tussen Trintelzand en Enkhuizen (deelgebieden MM NW hoog en MM NW laag, tussen profielen 51850 en 57500) hetzelfde advies als voor de IJsselmeerzijde, namelijk om in de langsrichting uniform te suppleren. Achter Trintelzand is geen suppletie nodig. Voor het natuurstrand (profiel 60400 – 61200) is het doelmatig om de suppletie in het midden van het gebied te plaatsen, namelijk tussen profielen 60700 – 61000. Hier is de erosie het sterkst en uit de analyse blijkt dat het zand vanuit hier op natuurlijke wijze naar de flanken wordt getransporteerd.

## 5.5 Effect vegetatie

### 5.5.1 Inleiding

Vegetatie heeft in potentie invloed op eolische transporten (door wind) en hydraulische transporten (door water) van sediment. Dat maakt eventuele vegetatiegroei rond de Houtribdijk relevant voor de kwantificering van de suppletiebehoefte. Andersom is het hydraulische klimaat ook bepalend voor de kans op vegetatieontwikkeling. Als golven en stroming te sterk zijn, lukt het de meeste plantensoorten niet om zich succesvol te vestigen op die locatie. Deze paragraaf beschouwt de rol van vegetatie voor eolische en hydraulische transporten.

### 5.5.2 Eolische transporten

Vegetatie op het droge deel van een zandige versterking is in staat om zand vast te houden, vergelijkbaar met helmgras in de duinen langs de Noordzeekust. Langs de Houtribdijk voorkomt vegetatie niet alleen zandverliezen door eolisch transport, maar vermindert het ook de kans op overlast door stuifzand voor het wegverkeer op de N307. Om die reden is de toplaag van het kale zandpakket na aanleg vermengd met aarde en ingezaaid. Inmiddels is de zandige versterking aan weerszijden van de Houtribdijk dan ook getransformeerd in een talud bedekt met schrale vegetatie. Dit is te zien door de satellietfoto's uit 2020 en 2022, weergegeven in Figuur 5-2, met elkaar te vergelijken.



Figuur 5-2: Houtribdijk ten noorden van Trintelhaven in 2020 (links) en 2022 (rechts)

In de periode 2014-2018 is geëxperimenteerd met de aanleg van een zandig voorland in de EcoShape pilot Houtribdijk. Deze lag aan de Markermeerzijde van de Houtribdijk, ongeveer op de plek van het huidige Natuurstrand. Uit deze pilot is duidelijk geworden dat voornamelijk de bodemsamenstelling bepalend is voor de slaagkans van vegetatie op het droge deel van de zandige versterking (Deltares, 2018). Ook na verschillende jaren was er op de pilot nog een duidelijk verschil in vegetatiegroei te zien tussen proefvakken waar aarde door de toplaag was gemengd (een 'leeflaag') en kale proefvakken.

De toplaag die op de taluds van de Houtribdijk is aangebracht en de daarop ontwikkelde vegetatie beperken de verstuiwing en daaraan gerelateerde zandverliezen, waardoor de eolische zandtransporten verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van de hydraulische zandtransporten.

### 5.5.3 Hydraulische transporten

Op de pilot Houtribdijk is ook gepoogd vegetatie tot ontwikkeling te laten komen in de natte zone. Het golfklimaat op deze locatie bleek echter te dynamisch te zijn. Tijdens de zomers kon vegetatie soms wat ontwikkelen richting de



waterlijn, maar tijdens stormen werden de planten volledig ontworteld. Ook natuurlijke luwtemaatregelen zoals een rijnshoutmat en een dam met wilgentenen bleken niet bestand tegen de golfwerking.

Naar aanleiding van deze bevindingen is onderzoek gedaan naar locaties in meren waar riet zich wél succesvol heeft kunnen vestigen (locaties in het IJsselmeer, Zwarte Meer, Lake Balaton en Lake Peipsi). Met behulp van modelberekeningen is ingeschat dat de maximaal toelaatbare golfhoogte aan de buitenrand van de rietvegetatie onder dagelijkse condities ongeveer 0,20 m bedraagt, en onder extreme condities ongeveer 0,60 m (Steenbergen, 2015).

Deze globale indicatie kunnen we vergelijken met de golfmetingen op de verschillende meetlocaties langs de Houtribdijk, zie Tabel 5-2. De A-locaties bevinden zich het dichtst bij de oever, de C-locaties op enige afstand uit de oever.

- IJsselmeerszijde, hoog (FL70). De gemiddelde significante golfhoogte is met 0,15-0,17 m zowel bij de A- als de C-locatie iets lager dan de genoemde grenswaarde van 0,20 m. Vegetatieontwikkeling in rustige perioden lijkt hier daarom mogelijk. Tijdens stormcondities ligt de golfhoogte met 0,79-0,85 m echter hoger dan de tweede grenswaarde van 0,60 m. Daarom is de verwachting dat eventueel ontwikkelde vegetatie tijdens winterstormen weer zal verdwijnen. Dit gedrag komt overeen met de observaties van Baaij et al. (2021). Op basis van orthofoto's beschrijven zij dat een aanzienlijk deel van de ontwikkelde vegetatie verdween aan het begin van 2020. Daarna, tijdens het groeiseizoen, herstelde de vegetatie zich voor een deel, ook weer naar lageregelegen delen van de oever, en werd nauwelijks erosie waargenomen.
- IJsselmeerszijde, laag (FL69). De gemiddelde significante golfhoogte ligt hier met 0,10-0,14 m nog lager dan bij locatie FL70. De maximale significante golfhoogte is 0,79 m bij de C-locatie en 0,48 m bij de A-locatie. Dit betekent dat hier mogelijk op termijn rietvestiging op kan treden. In Baaij et al. (2021) is dan ook spontane vegetatievestiging nabij de oeverlijn vermeld. Er zijn dus verschillende indicaties dat in deze zone na verloop van tijd vegetatieontwikkeling kan optreden. Mogelijk is hiervoor eerst enige verslibbing van de bodem nodig, omdat riet zich moeizaam vestigt op kaal zand. Ook de waterdiepte moet voldoende klein zijn, bij voorkeur tussen 10 en 75 cm (Schippers 1991).
- Achter de vooroeverdammen aan de Markermeerszijde, bij locatie FL68, is het golfklimaat zeer mild. Deze is niet beperkend voor vegetatieontwikkeling. Wel is de waterdiepte nog vrij groot. De bodemhoogte bij locatie FL68A lag tijdens de metingen op NAP-1,14 m. De waterdiepte in de zomer is dus ongeveer 90 cm. De optimale waterdiepte voor waterriet ligt tussen 10 en 75 cm (Schippers, 1991). Mogelijk is dus eerst enige slibsedimentatie achter de vooroeverdammen nodig voordat riet op grote schaal tot ontwikkeling kan komen.
- Bij het Natuurstrand, bij locatie FL67, zijn de condities vergelijkbaar met de pilot Houtribdijk. Zowel de gemiddelde golven als de golven tijdens stormen zijn hier te hoog voor vegetatieontwikkeling.

Tabel 5-2 Gemiddelde significante golfhoogte en maximale significante golfhoogte (tussen haakjes) voor de verschillende meetlocaties (in m).

Locatie	Code	C-locatie	A-locatie
Markermeer, natuurstrand	FL67	0,23 (1,14)	0,20 (1,00)
Markermeer, golfbrekers	FL68	0,15 (0,68)	0,05 (0,28)
IJsselmeer, bij Trintelhaven	FL69	0,14 (0,79)	0,10 (0,48)
IJsselmeer, noordwest	FL70	0,17 (0,85)	0,15 (0,79)

Bij het ontwerp van de zandige versterking werd een toeslag toegepast op de berekende langstransporten vanwege mogelijke lokale vegetatiegroei en daaraan gerelateerde transportgradiënten. Als riet over lange strekkingen tot ontwikkeling komt, domineren echter de positieve eigenschappen.

Als vegetatie aanslaat, zijn morfologische veranderingen beperkt door:

1. Golfenergie-dissipatie van golven en stroming en daardoor lagere hydraulische schuifspanningen op het sediment;
2. Verschuiving van golfbreking en daarmee gepaard gaande turbulentie naar meer geleidelijke energie-dissipatie door vegetatie;
3. Accumulatie van organisch materiaal en fijn sediment tussen de vegetatie, ontwikkeling van wortelstelsels, vasthouden van sediment.

Als (riet)vegetatie tot ontwikkeling komt achter de vooroeverdammen aan de Markermeerzijde, zal de suppletiebehoefte hier (voor zover nu al aanwezig) tot nul reduceren. Mogelijk zal in de toekomst ook vegetatie tot ontwikkeling komen aan de IJsselmeerzijde nabij Trintelzand. Ook hier zal dit dan leiden tot een sterke reductie van de onderhoudsinspanning.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

Op de lange termijn is er onderhoud nodig aan de zandige waterkering van de Houtribdijk tussen Enkhuizen en Trintelhaven. Het doel van de voorliggende studie is om te komen tot inzicht in de benodigde suppletievolumes en handvatten voor efficiënt suppletie-ontwerp. Hiertoe zijn de volgende onderzoeksvragen beantwoord.

### 6.1 Deelvragen

#### Wat zijn de historische (i.e., gemeten) en verwachte trends in volumeontwikkeling en dwarstransport?

Van de gehele zandige oever is de bodemligging elk half jaar ingemeten en bij vier detailgebieden frequenter. De uitgevoerde analyse van deze metingen (november 2019 - maart 2022) laat zien dat over de gehele IJsselmeerzijde van de Houtribdijk een onderwaterplateau is ontstaan. Dit plateau wordt gekenmerkt door een flauwe helling en aan beide zijden een steile helling. Er vindt structurele erosie plaats bij de steile helling rond de waterlijn, boven het plateau. Deze erosie is gemiddeld 10 m<sup>3</sup>/m/jaar, maar tussen Trintelhaven en het knikpunt op 2 km van Trintelhaven ruim de helft lager.

Ongeveer een derde tot de helft van de geobserveerde erosie rond de waterlijn is terug te vinden als sedimentatie op het steile onderwatertalud, onder het plateau. Dit betekent dat de meerderheid van het geërodeerde zand in de dwarsrichting naar dieper water of in de langsrichting wordt getransporteerd. Door deze morfologische processen wordt het plateau door de tijd heen breder.

De profiel- en volumeontwikkelingen aan de Markermeerzijde zijn sterk afhankelijk van de locatie en bovendien aanmerkelijk anders dan aan de IJsselmeerzijde. Het onderwaterplateau is tussen Enkhuizen en Trintelzand minder prominent en in veel profielen zelfs afwezig. Dit hangt ook samen met lagere erosievolumes, namelijk tussen 2 en 6 m<sup>3</sup>/m/jaar (waarvan een groot deel zetting). Achter het Trintelzand zijn geen significante morfologische veranderingen gemeten. Alleen bij het Natuurstrand in het zuidoosten, tegenover Trintelhaven, zijn het plateau en de daarbij kenmerkende ontwikkelingen vergelijkbaar met de IJsselmeerzijde. De erosievolumes zijn hier met gemiddeld 10 m<sup>3</sup>/m/jaar ook vergelijkbaar met die aan de IJsselmeerzijde. Een kleiner gedeelte komt aan de teen van het plateau terecht, namelijk minder dan 2 m<sup>3</sup>/m/jaar.

#### Wat zijn de kustlangse variaties in oeverlijnpositie en volumeontwikkeling die wijzen op langstransport?

Aan de IJsselmeerzijde is er netto langstransport in zuidoostelijke richting, dus richting Trintelhaven. In het gebied nabij Trintelhaven resulteert dit in een aanvoer van zand (gradiënt in het langstransport), dat de hier in dwarsrichting aanwezige erosie deels compenseert. Verder is op enige afstand van het noordelijke knikpunt in de dijk sprake van een lokale herverdeling met lokaal extra erosie, waarbij het zand in beide langsrichtingen wordt getransporteerd en voor (relatieve) sedimentatie aan weerszijden van het knikpunt van extra erosie zorgt.

Aan de Markermeerzijde is alleen bij het natuurstrand kustlangse variatie aanwezig. Kustlangs is een duidelijke herverdeling van sediment zichtbaar, waarbij sediment vanuit het midden van het Natuurstrand naar de dwarsdammen aan beide zijden wordt getransporteerd. Hierdoor is een boog in het strand ontstaan met relatief veel erosie in het midden en weinig/geen erosie bij de dwarsdammen.

#### Hoe kunnen de gevonden morfologische ontwikkelingen verklaard worden?

Een deel van de volumeveranderingen is terug te herleiden naar zetting. Vooral in het noordwesten van de zandige versterking is de zetting substantieel, in sommige gevallen is dit meer dan 80% van de gemeten volumeverandering. Echter, het grootste gedeelte van de volumeverandering is toe te schrijven aan structurele erosie door stroming en golven, zeker aan de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk. Daarbij zijn geen noemenswaardige insteelffecten of trendbreuken geïdentificeerd.

De structurele erosie aan de zandige waterkering vindt plaats door de combinatie van golven en stroming. Aan de Markermeerzijde - met uitzondering van het Natuurstrand - wordt deze forcering gedempt door golfbrekers (vooroeverdammen) en het Trintelzand. In deze beschutte gebieden is de erosie een orde kleiner dan aan de IJsselmeerzijde en bij het Natuurstrand.

Aan de IJsselmeerzijde is de erosie in het gebied bij Trintelhaven lager dan bij de rest van deze zijde van de dijk. Ook dit komt door verschil in forcering, wat dan weer veroorzaakt wordt door een ondiepere bodemligging voor de zandige oever en een andere oriëntatie van de dijk. Het verschil in erosie wordt versterkt door langstransport in zuidoostelijke

richting: De stroming en zandtransport langs de waterkering is nabij Trintelhaven namelijk sterker in zuidoostelijke dan in noordwestelijke richting. Daarbij zorgt de havendam voor een gradiënt in langstransport en dus voor (relatieve) sedimentatie.

### Wat zijn de verwachte toekomstige morfologische ontwikkelingen en is een evenwichtsprofiel mogelijk?

De analyse van de volumeverandering van de zandige oever toont een lineaire trend, waarbij voor de beschouwde periode geen vertraging of versnelling is waargenomen. De zetting zal steeds verder afnemen en geen significante bijdrage leveren aan de toekomstige morfologische ontwikkelingen. Daarnaast is gebleken dat het dwarsprofiel zich niet op een natuurlijke manier tot een evenwichtsprofiel ontwikkelt. Dit betekent ook dat de ontstane profielvorm niet als een daadwerkelijk evenwichtsprofiel mag worden beschouwd. Ook zijn er geen handvatten gevonden om door middel van slim suppleren een profiel aan te leggen dat grotendeels in evenwicht is met de forcering.

De uitgevoerde vergelijking van de forcering tijdens de meetperiode met het langjarig gemiddelde helpt met het extrapoleren van de opgetreden naar de toekomstige morfologische ontwikkelingen. Erosie aan de Markermeerzijde hangt in grote lijnen samen met forcering/wind uit het westen tot zuidoosten. Voor deze richtingen is het windklimaat tijdens de meetperiode in grote lijnen gelijk aan het langjarige windklimaat. Bij de IJsselmeerzijde is de forcering uit het noordwesten tot oosten dominant. Het blijkt dat er tijdens de meetperiode gemiddeld minder dagen waren met sterke noordwestenwind. Om hiervoor te corrigeren in de verwachte erosievolumes, is voor het noordwestelijke gedeelte van de IJsselmeerzijde een opslag van 10% toegepast om de waargenomen erosievolumes te vertalen naar verwachte waarden. Voor de rest van de zandige waterkering is de verwachte erosie gelijkgesteld aan die tijdens de meetperiode (na correctie voor zetting).

Voor het suppletie-advies zijn vooral de verwachte erosievolumes relevant. Deze negatieve volumeverandering zal, net als tijdens de meetperiode, voornamelijk optreden rond de waterlijn tussen het plateau en de dijk. De meeste verwachte erosie zal plaatsvinden aan de IJsselmeerzijde van de zandige waterkering van de Houtribdijk. Voor het grootste gedeelte van de IJsselmeerzijde is de verwachte erosie minder dan 10 m<sup>3</sup>/m/jaar; richting Trintelhaven is dit minder dan 5 m<sup>3</sup>/m/jaar. Aan de Markermeerzijde wordt er achter de golfbreker minder dan 1 m<sup>3</sup>/m/jaar aan erosie verwacht. Achter Trintelhaven is het profiel wel in evenwicht. De erosie bij van het natuurstrand varieert tussen 0 (bij de dwarsdammen) en minder dan 20 m<sup>3</sup>/m/jaar in het midden (gemiddeld minder dan 10 m<sup>3</sup>/m/jaar).

## 6.2 Hoofdvraag

### Wat zijn de benodigde suppletievolumes voor periodieke onderhoud voor de Houtribdijk en hoe ziet een efficiënt suppletie-ontwerp eruit?

In totaal is de suppletiebehoefte van de zandige waterkering Houtribdijk minder dan 100.000 m<sup>3</sup>/jaar. Hiervan is 85% nodig aan de IJsselmeerzijde, en 15% aan de Markermeerzijde. Hiermee wordt de verwachte structurele erosie volledig gecompenseerd. Er wordt dan dus niet gecompenseerd voor de zetting (opgetreden en verwacht).

Een suppletie is het meest efficiënt als deze rond de waterlijn wordt uitgevoerd. Het blijkt namelijk dat als de suppletie verder meerwaarts in het profiel wordt uitgevoerd, zand niet door natuurlijke processen richting de waterlijn wordt getransporteerd. Ook draagt een meerwaartse verlenging van het plateau niet echt bij aan het reduceren van de bovenin optredende verliezen. Daarnaast is een uniforme suppletie in de langsrichting het meest doelmatig. Een uitzondering hierop is het natuurstrand waar de suppletie in zijn geheel in het midden kan worden uitgevoerd. Niet alleen zal de erosie hier het sterkst zijn, ook zal het zand op een natuurlijke manier door middel van langstransport richting de dwarsdammen spoelen. Een aandachtspunt in een suppletie-ontwerp is verder het noordwestelijke knikpunt. Aan de IJsselmeerzijde is hier extra zandvolume nodig om te compenseren voor een lokale herverdeling van zand.

De aangroei/natuurlijke ontwikkeling van (riet)vegetatie op geringe waterdiepte achter de golfbrekers (Markermeerzijde) en nabij Trintelhaven (IJsselmeerzijde) zou de benodigde suppletievolumes deels kunnen beperken. Hiervoor is het momenteel echter te diep. In een suppletie zou het onderwaterplateau (indien aanwezig) verhoogd kunnen worden naar een waterdiepte tussen de 10 en 75 cm om de aangroei van rietvegetatie te faciliteren. Hierbij is de juiste verhouding tussen grond, slib en zand nodig, eventueel met een wat stevigere zandbank aan de teen van de dijk om te voorkomen dat deze laag te snel wegspoelt.

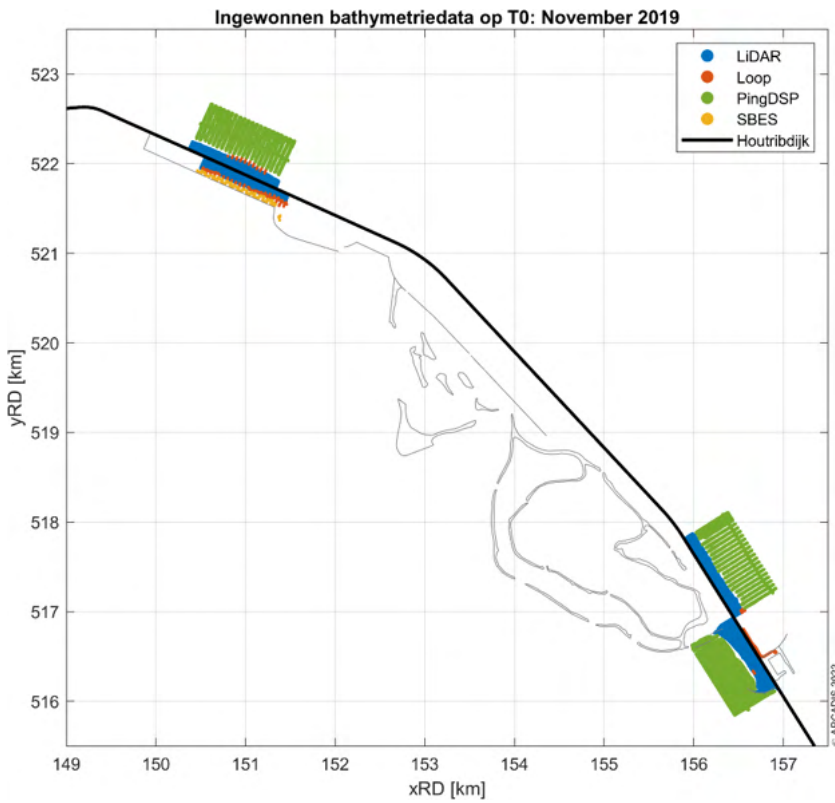
## Referenties

- Arcadis en combinatie Houtribdijk (2018). Zandige versterking Houtribdijk Ontwerpnota, HRD-ONA-0172, mei 2018
- Baaij et al. (2021). Interaction between vegetation development and morphology on freshwater lakeshores; an exploratory literature study and case study of the Houtribdijk, the Netherlands. Martienke Baaij, Richard Marijnissen, Jantsje van Loon-Steensma. Water Systems and Global Change Group, Wageningen University, August 2021.
- Deltares (2018). BwN pilot Houtribdijk; Guideline beheer en onderhoud voor aangelegde zandige voorlanden in grote wateren. Deltares rapport 1209013-000-ZWS-0045, Ellis Penning et al., 1 juli 2018.
- Hahn, L. L. A. *Maintenance Layer Analysis for a Levee Strengthening using Sandy Shores in a Non-tidal Environment*. BS thesis. University of Twente, 2020.
- HKV en Tauw (2021). Houtribdijk monitoring and research program; data report. Vincent Vuik, Bart Thonus en Morrisson Kramer. HKV rapport PR3916.10, augustus 2021.
- Schippers, W. (1991). Toepassing van riet langs waterlopen. Landinrichtingsdienst. Notitie adviesgroep vegetatiebeheer.
- Steetzel, H., van der Goot, F., Fiselier, J., de Lange, M., Penning, E., van Santen, R., & Vuik, V. (2017). Building with nature pilot sandy foreshore Houtribdijk design and behavior of a sandy dike defence in a lake system. *Coastal Dynamics*
- Steenbergen, A.P.L.A.M. (2015). Foreshores with reed vegetation as a resilient lake shore defence; modelling of the incoming wave height at the reed-water boundary. MSc. thesis, Open University of the Netherlands.
- Ton, A. M., Vuik, V., & Aarninkhof, S. G.J (2021). Sandy beaches in low-energy, non-tidal environments: Linking morphological development to hydrodynamic forcing. *Geomorphology*, 374, 107522.
- Ton, A.M., Vuik, V. en Aarninkhof, S.G.J. (2022). Longshore sediment transports by large-scale lake circulations at low-energy, non-tidal beaches: a field and model study (in review).

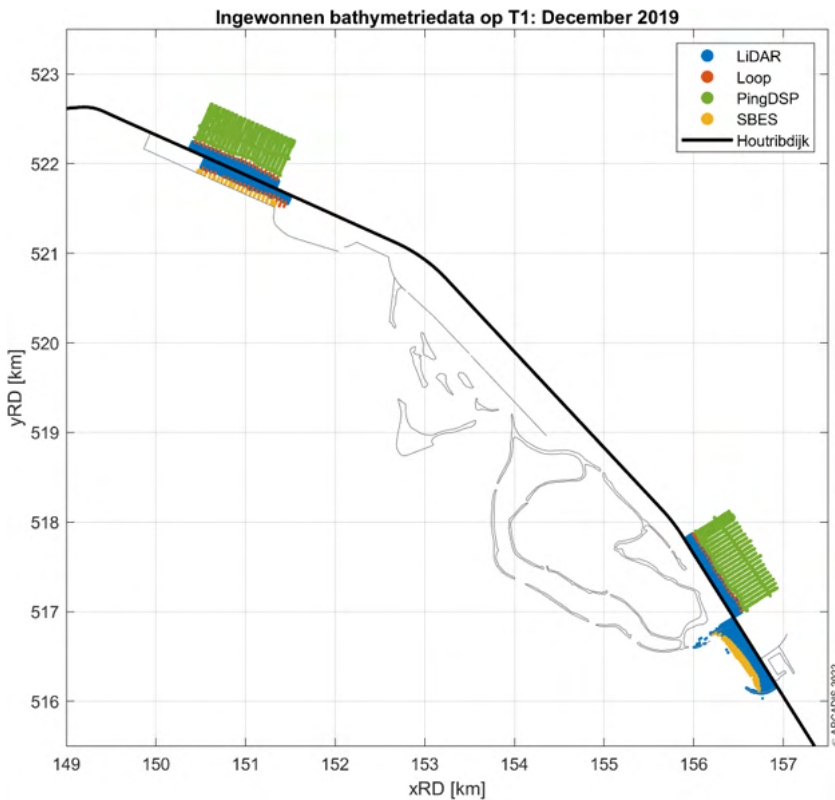


## Bijlagen

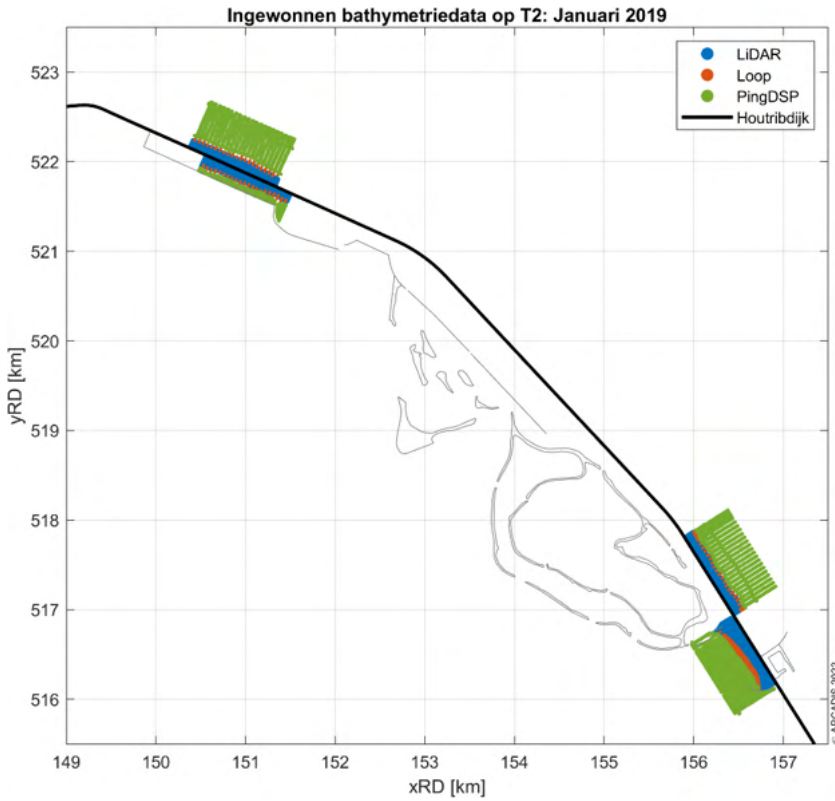
### Bijlage A Locaties gemeten bodemligging met gebruikte surveytechnieken



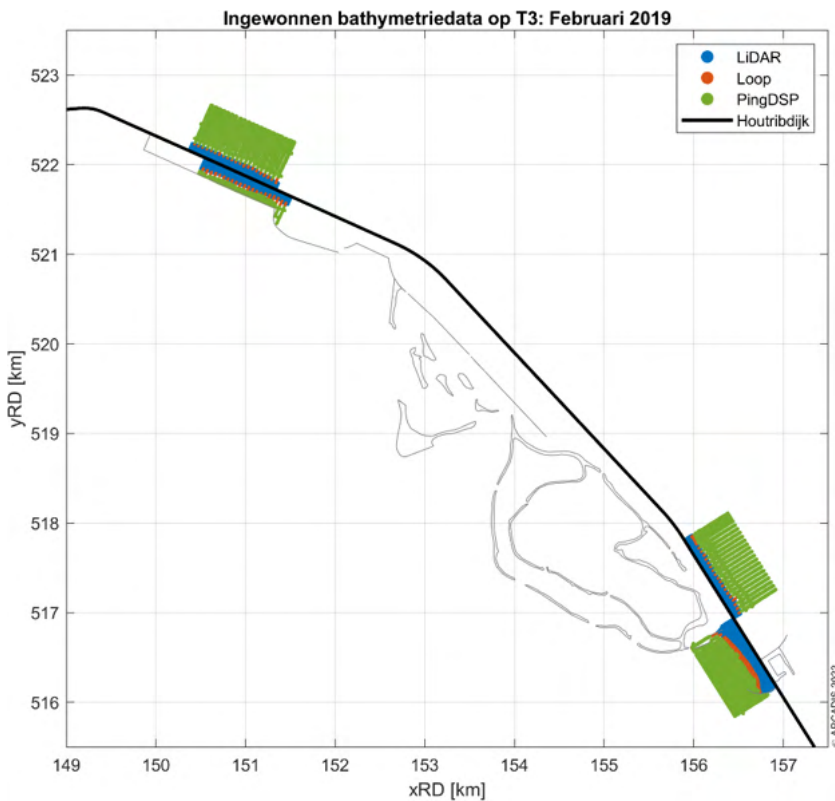
Figuur 6-1 Locaties gemeten bodemligging voor T0, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



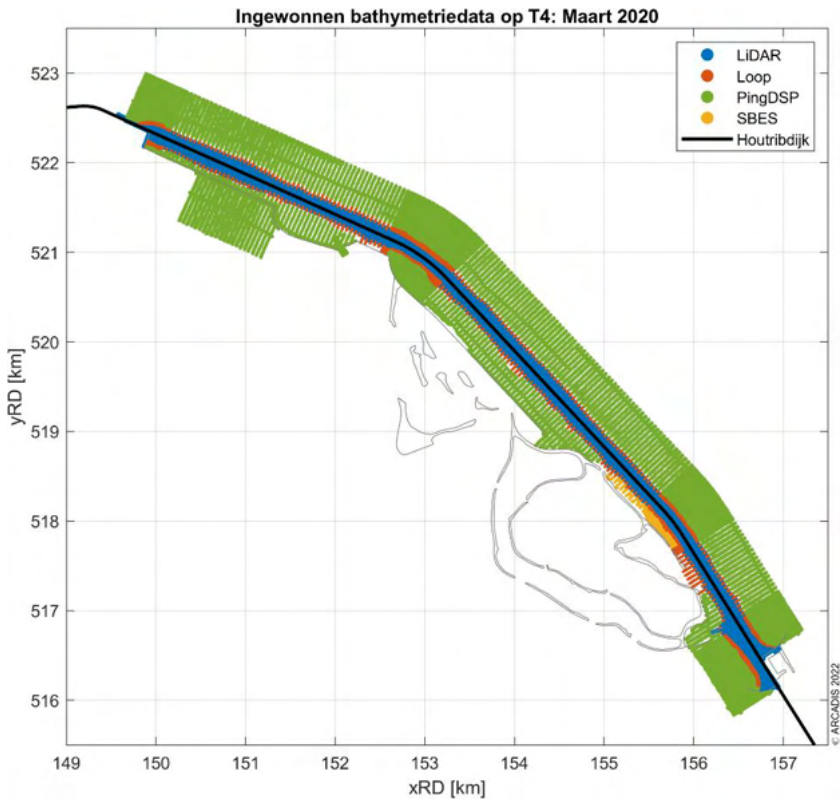
Figuur 6-2 Locaties gemeten bodemligging voor T1, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



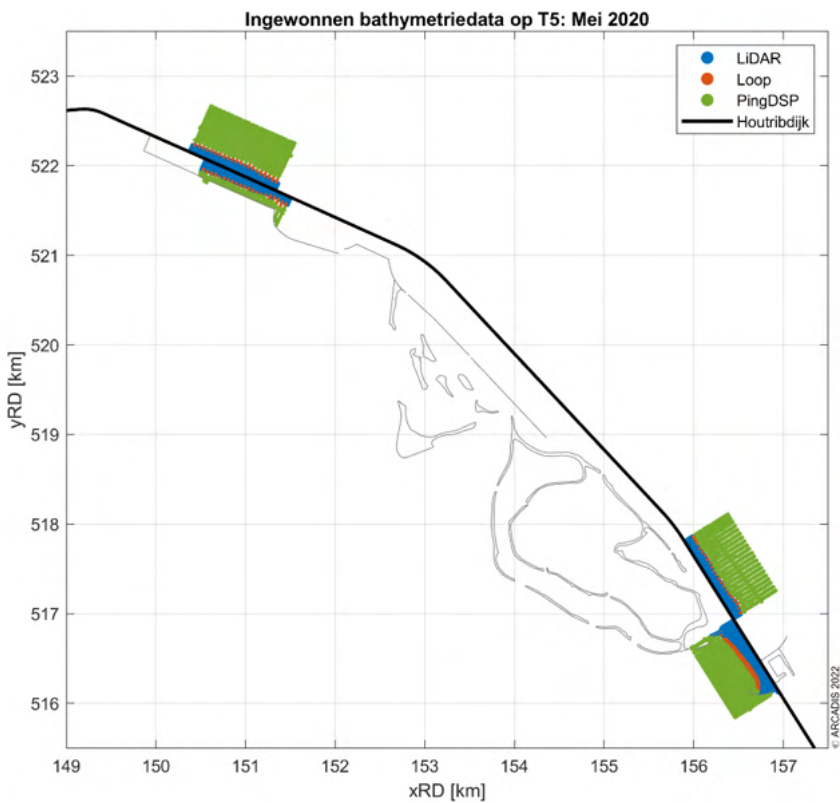
Figuur 6-3 Locaties gemeten bodemligging voor T2, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken



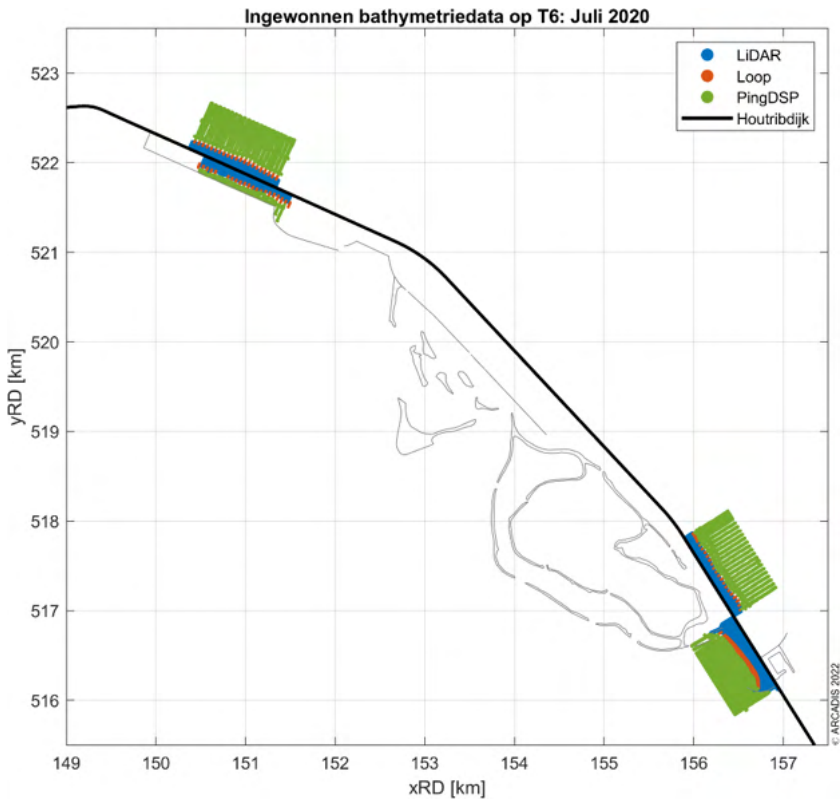
Figuur 6-4 Locaties gemeten bodemligging voor T3, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



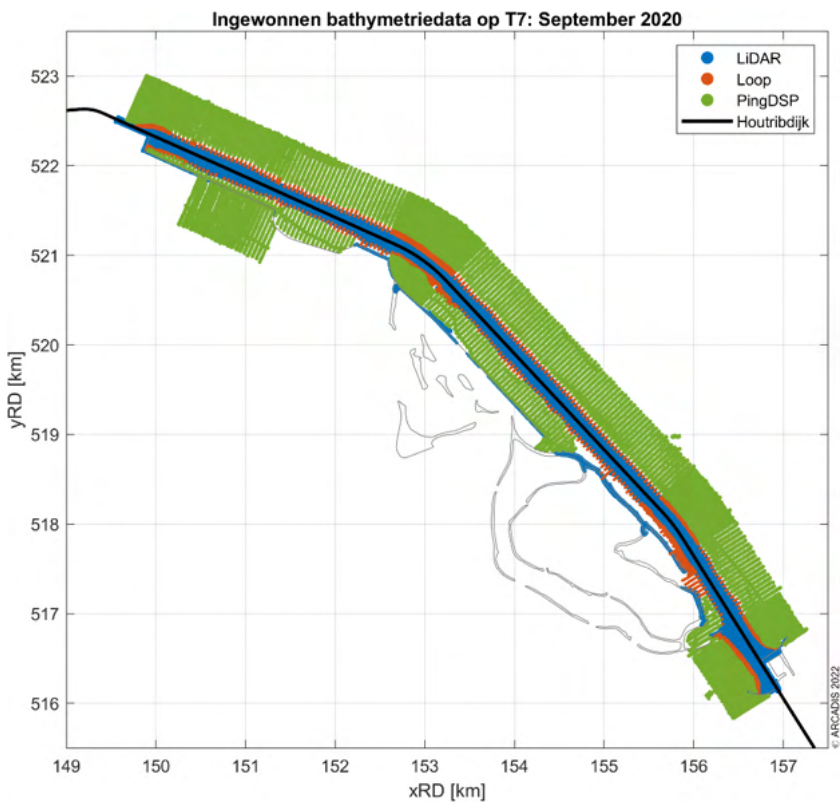
Figuur 6-5 Locaties gemeten bodemligging voor T4, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



Figuur 6-6 Locaties gemeten bodemligging voor T5, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.

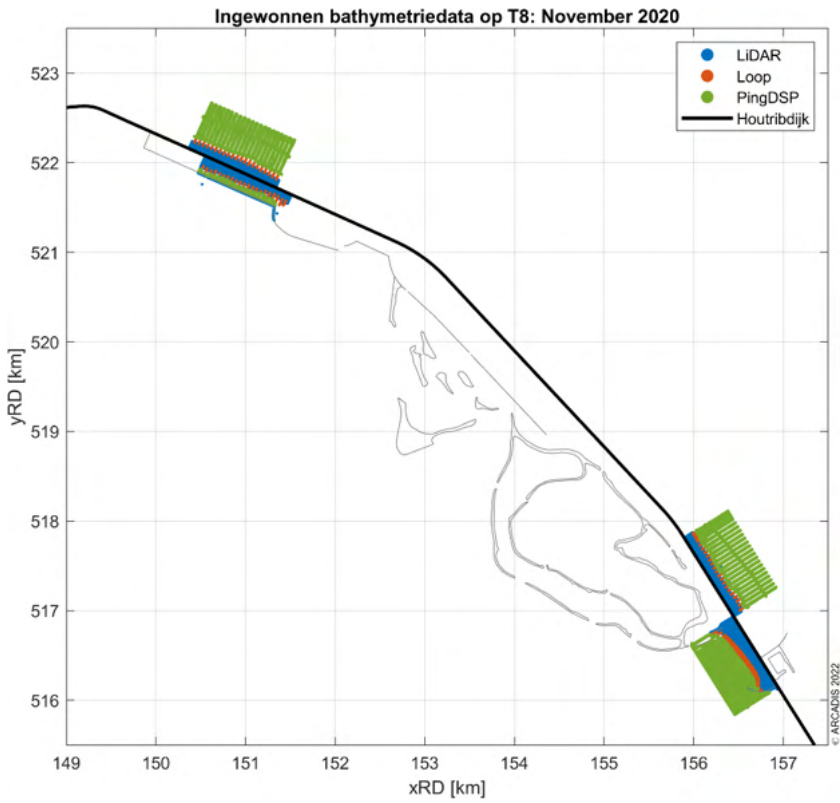


Figuur 6-7 Locaties gemeten bodemligging voor T6, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.

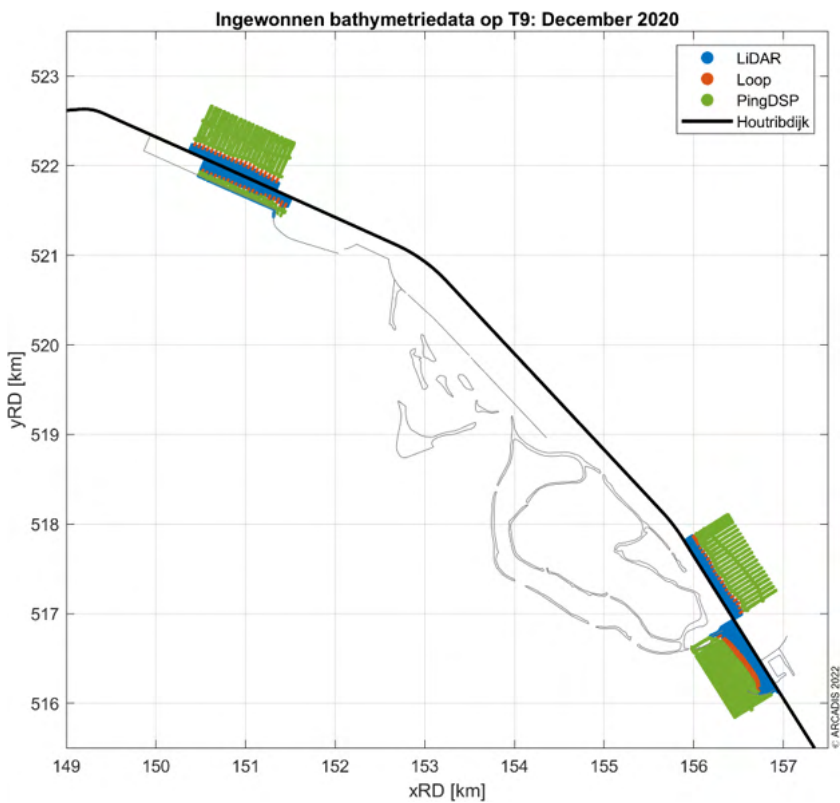


Figuur 6-8 Locaties gemeten bodemligging voor T7, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.

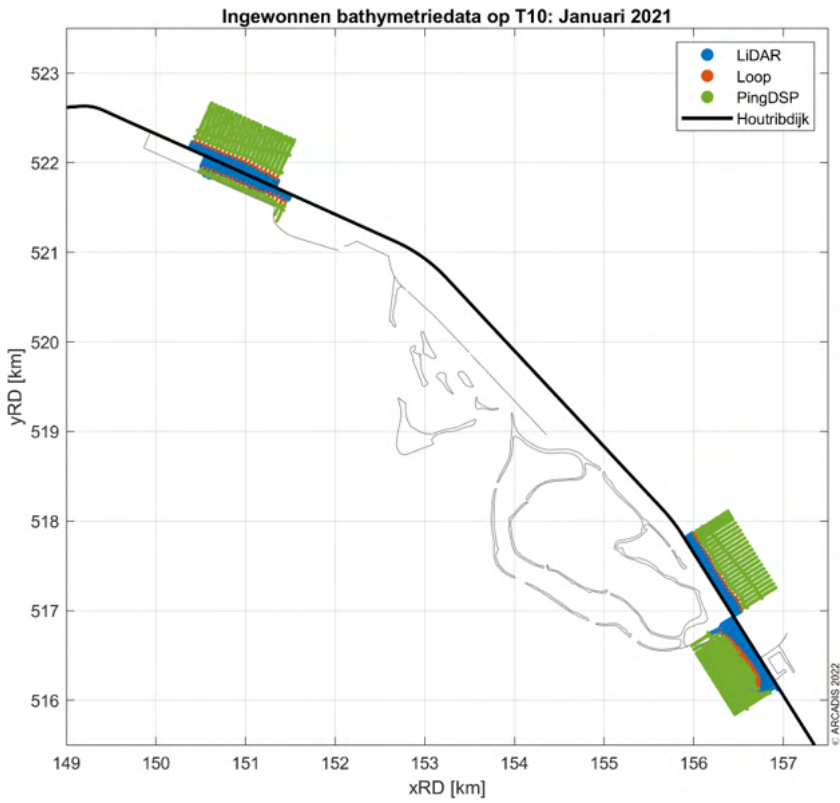




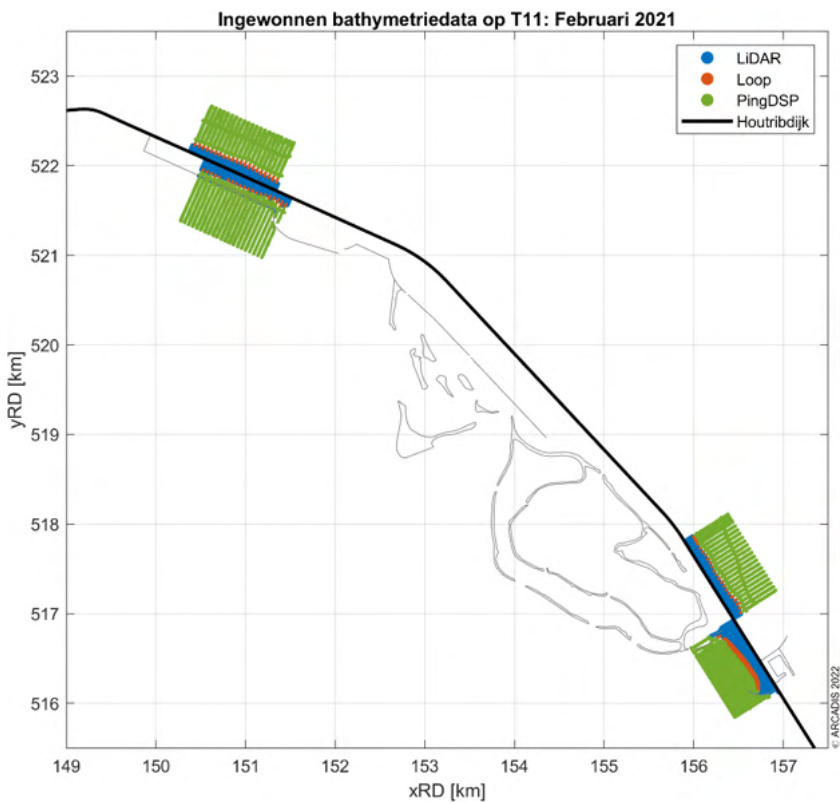
Figuur 6-9 Locaties gemeten bodemligging voor T8, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



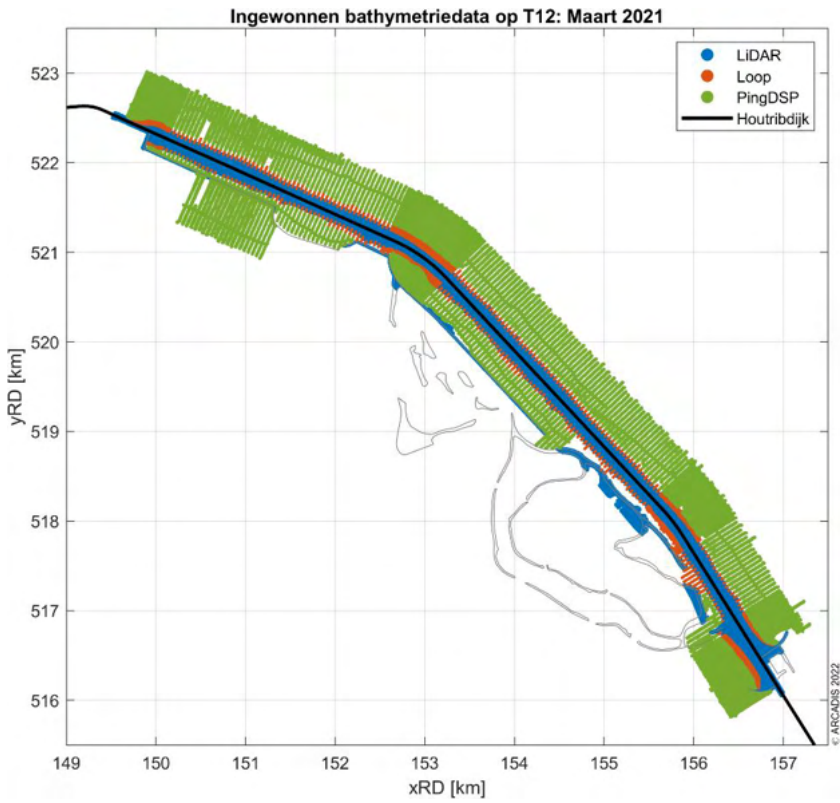
Figuur 6-10 Locaties gemeten bodemligging voor T9, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



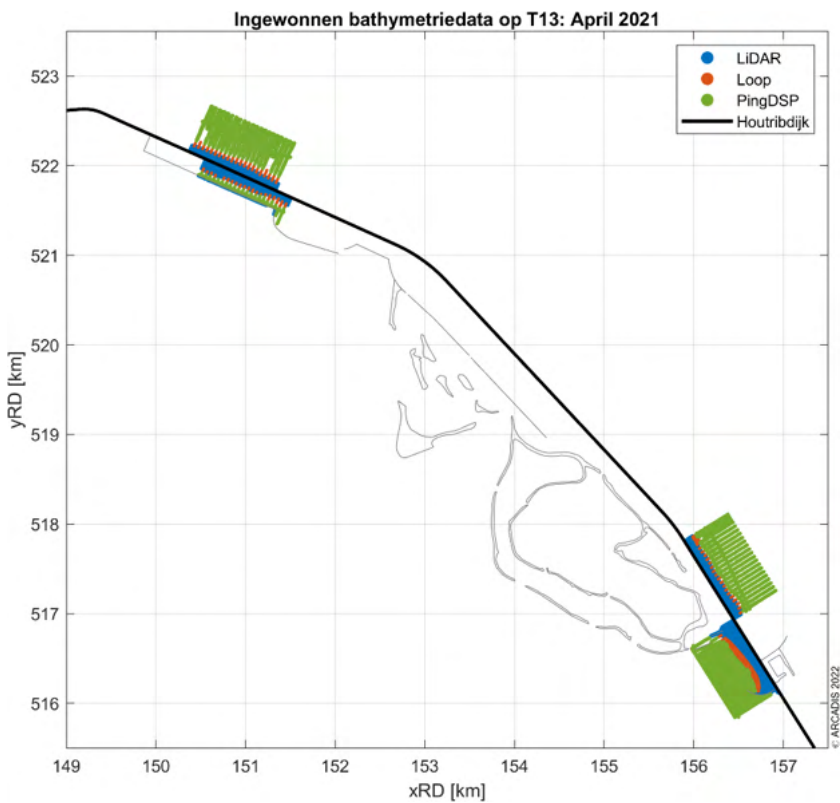
Figuur 6-11 Locaties gemeten bodemligging voor T10, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



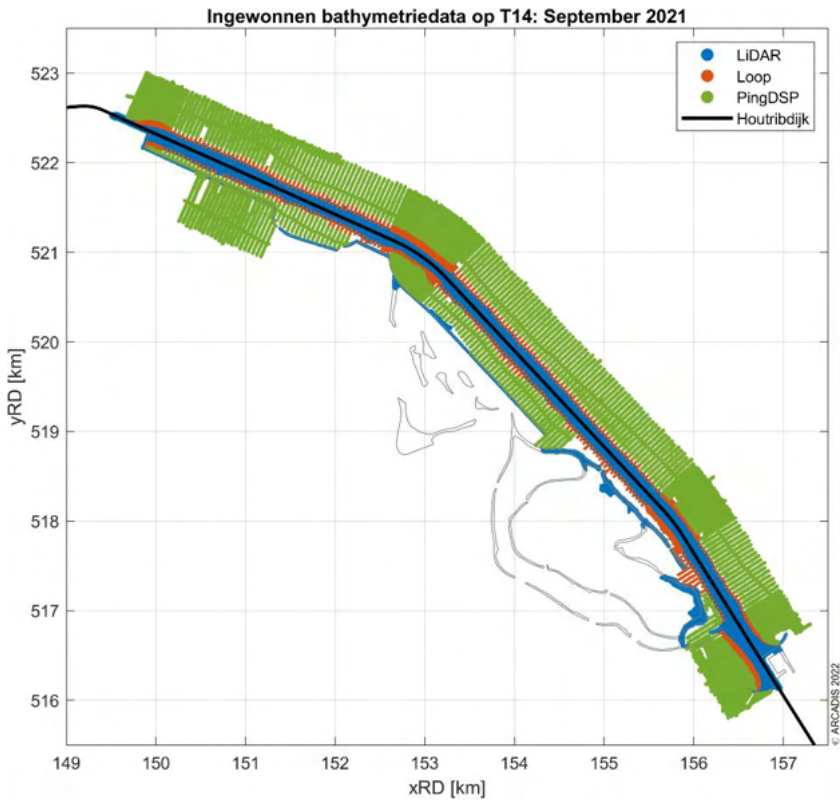
Figuur 6-12 Locaties gemeten bodemligging voor T11, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



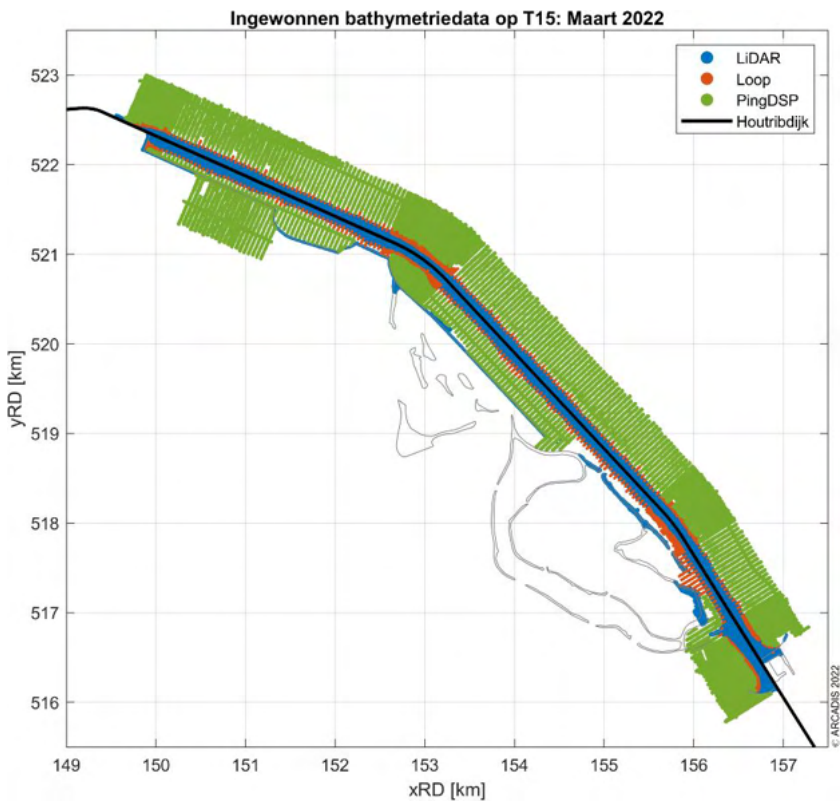
Figuur 6-13 Locaties gemeten bodemligging voor T12, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.



Figuur 6-14 Locaties gemeten bodemligging voor T13, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.

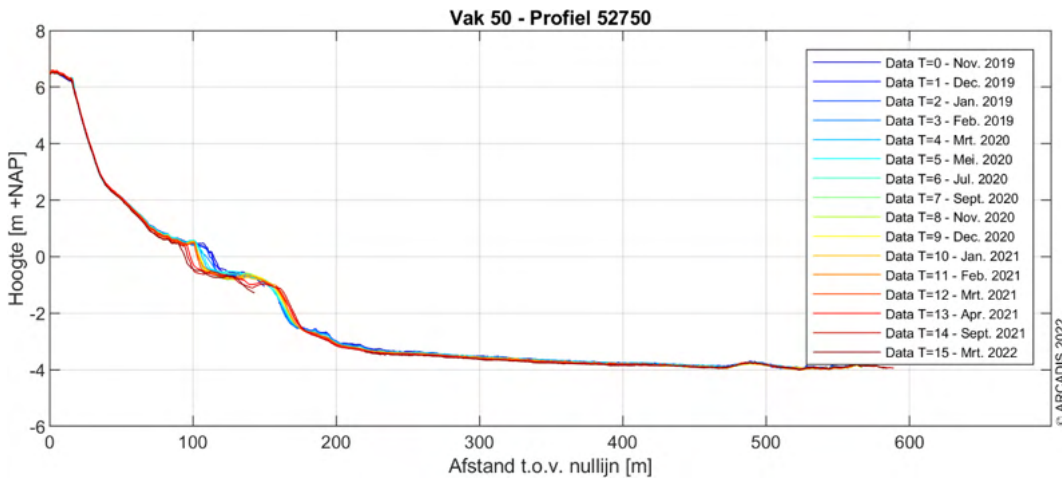


Figuur 6-15 Locaties gemeten bodemligging voor T14, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.

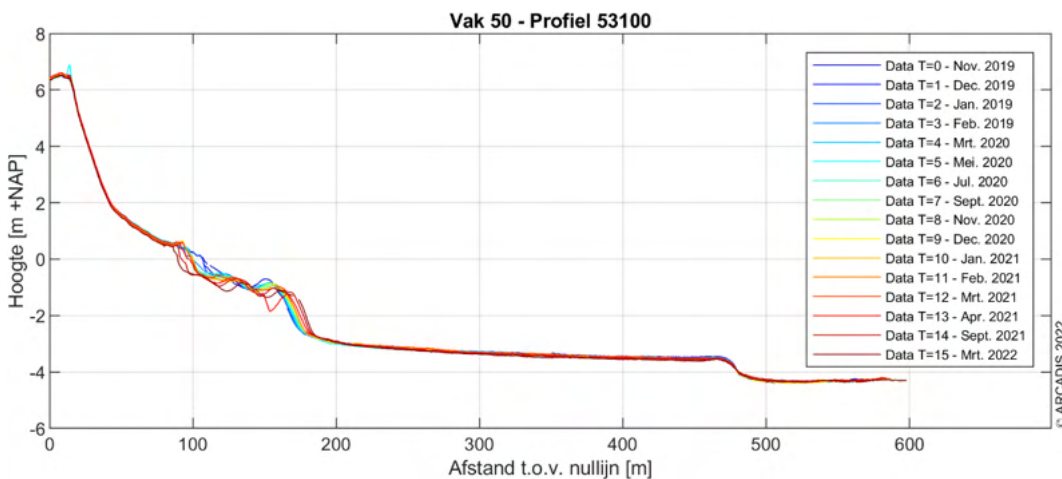


Figuur 6-16 Locaties gemeten bodemligging voor T15, waarin onderscheid is gemaakt tussen de gebruikte surveytechnieken.

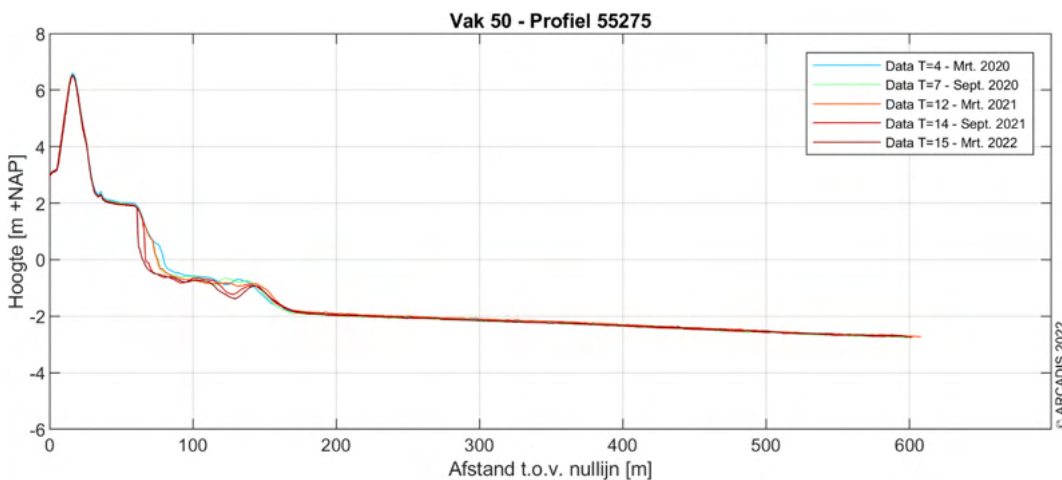
**Bijlage B Dwarsprofielen IJsselmeerzijde**



Figuur 6-17. Vak 50, IJsselmeerzijde, profiel 52750. Detailgebied 1.

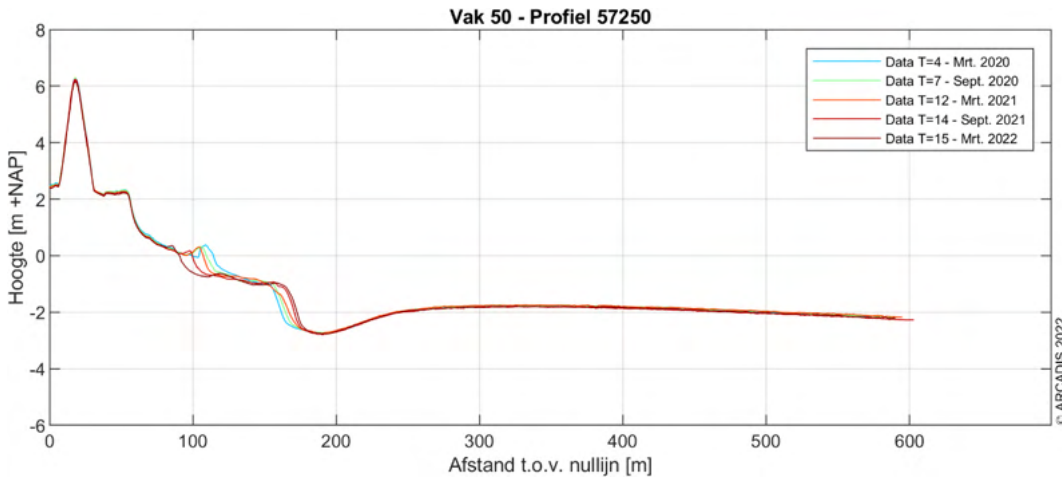


Figuur 6-18 Vak 50, IJsselmeerzijde, profiel 53100. Detailgebied 1.

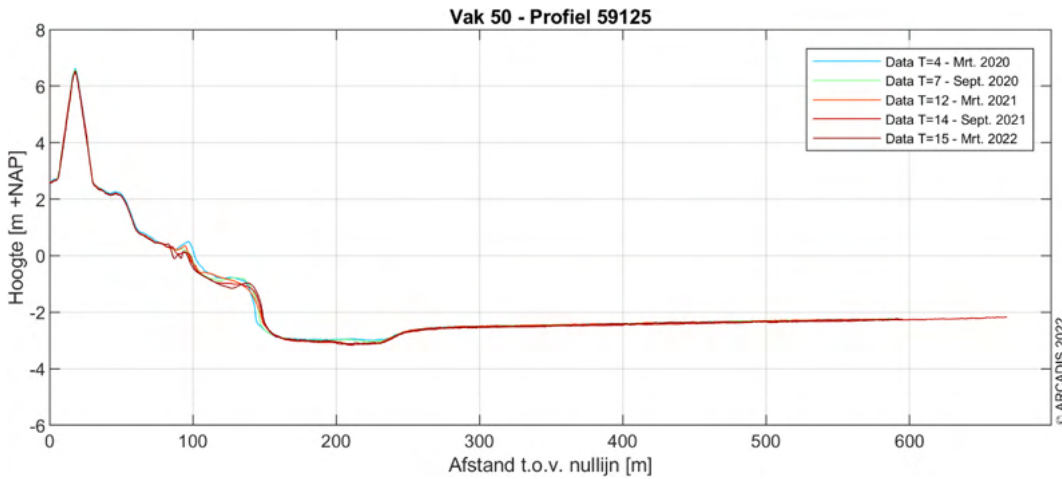


Figuur 6-19 Vak 50, IJsselmeerzijde, profiel 55275.

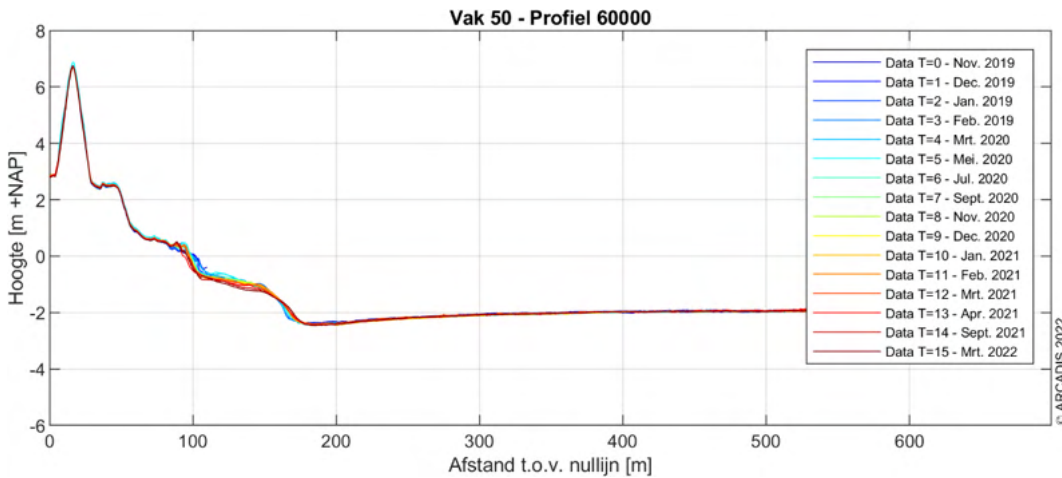




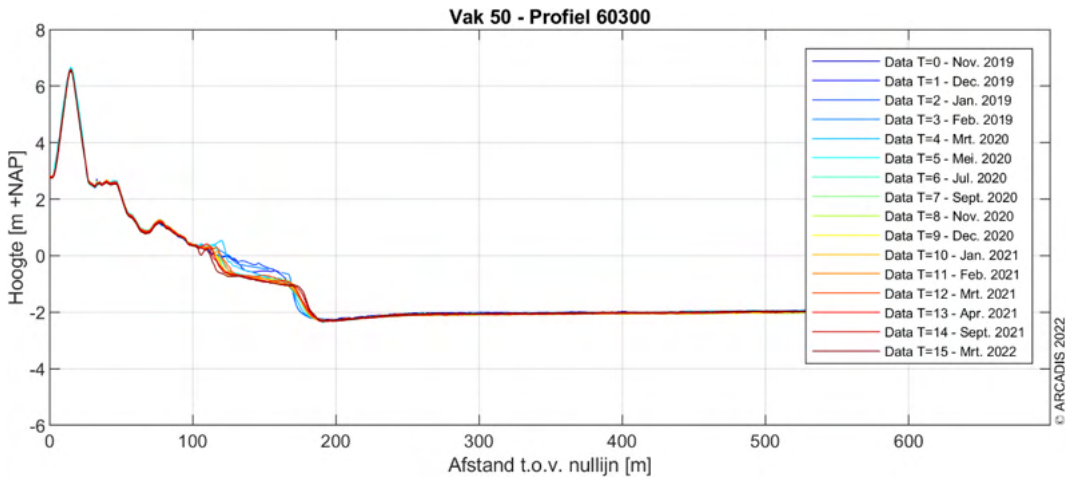
Figuur 6-20 Vak 50, IJsselmeerzijde, profiel 57250.



Figuur 6-21 Vak 50, IJsselmeerzijde, profiel 59125.

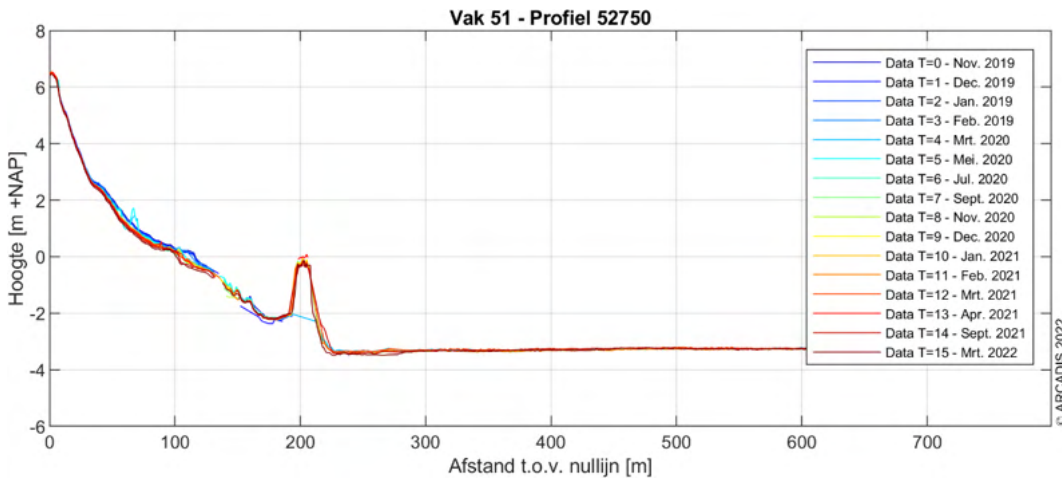


Figuur 6-22 Vak 50, IJsselmeerzijde, profiel 60000. Detailgebied 2.

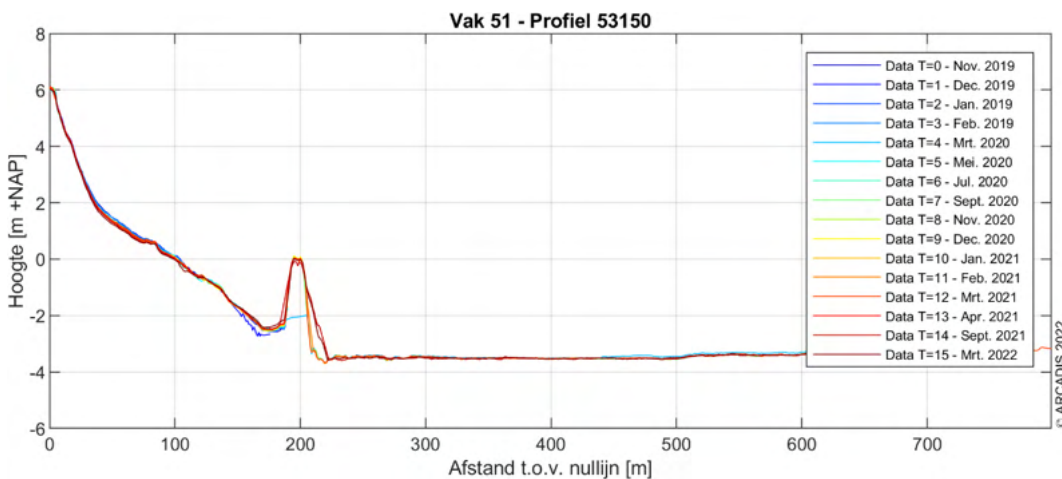


Figuur 6-23 Vak 50, IJsselmeerzijde, profiel 60300. Detailgebied 2.

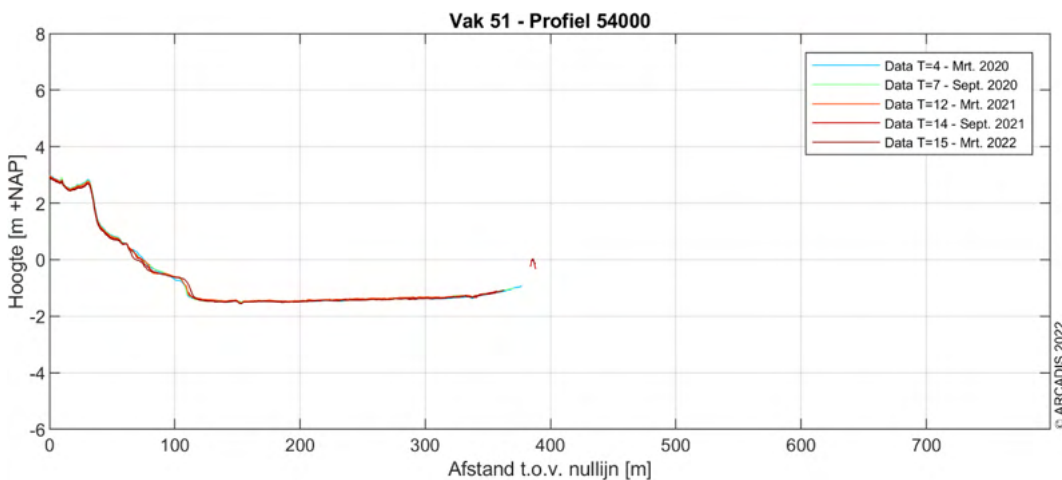
**Bijlage C Dwarsprofielen Markermeerzijde**



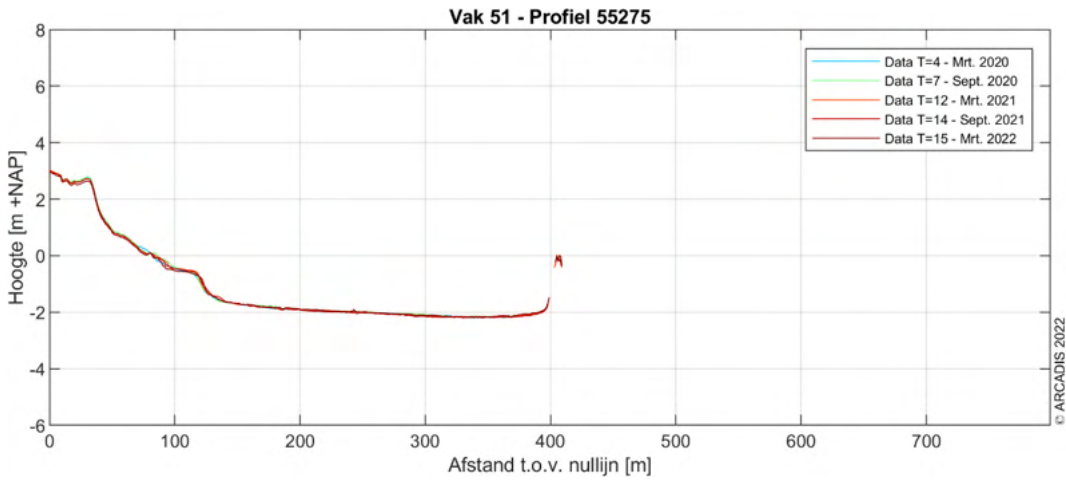
Figuur 6-24 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 52750. Detailgebied 4.



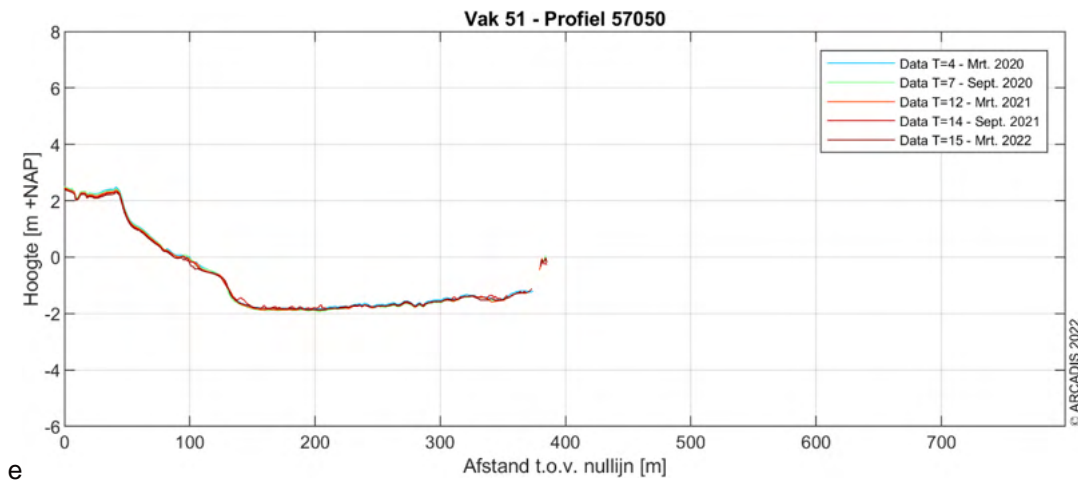
Figuur 6-25 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 53150. Detailgebied 4.



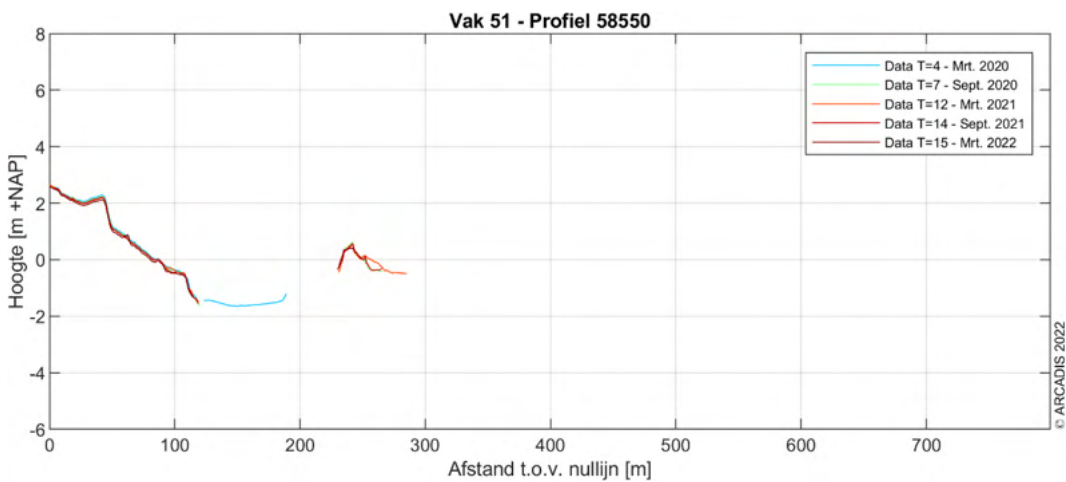
Figuur 6-26 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 54000.



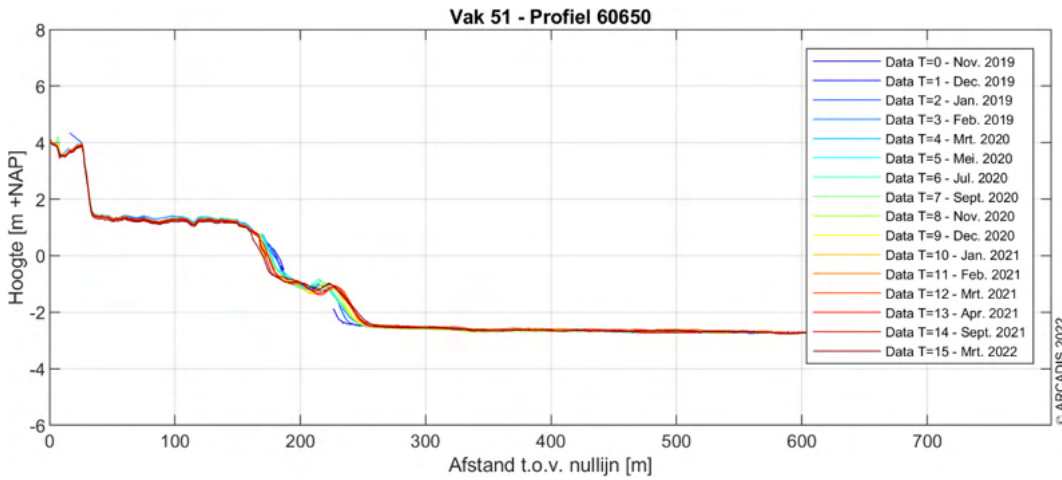
Figuur 6-27 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 55275.



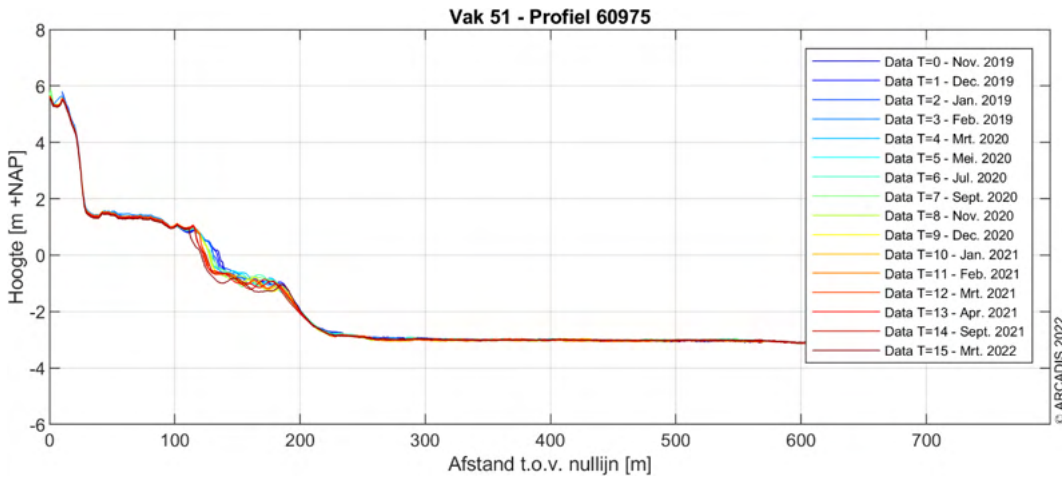
Figuur 6-28 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 57050.



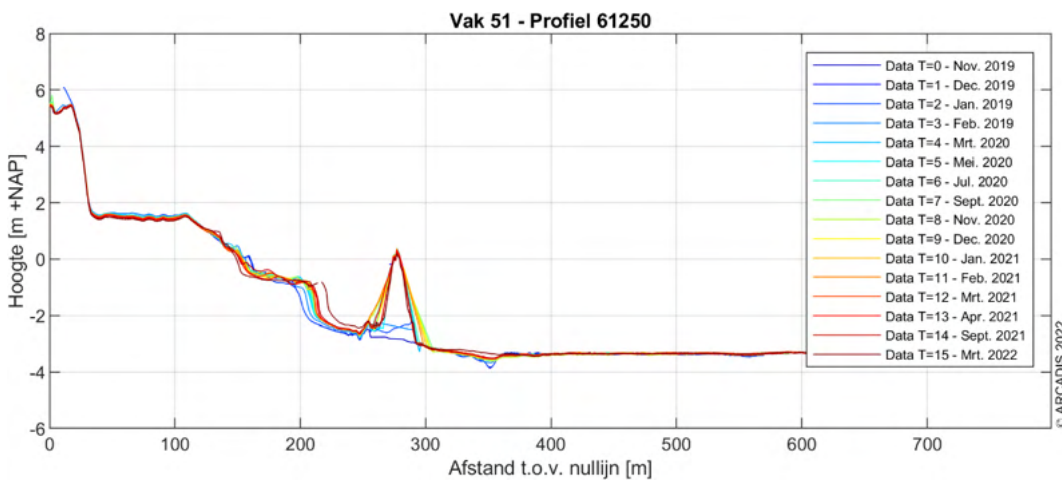
Figuur 6-29 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 58550.



Figuur 6-30 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 60650. Detailgebied 3.



Figuur 6-31 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 60975. Detailgebied 3.

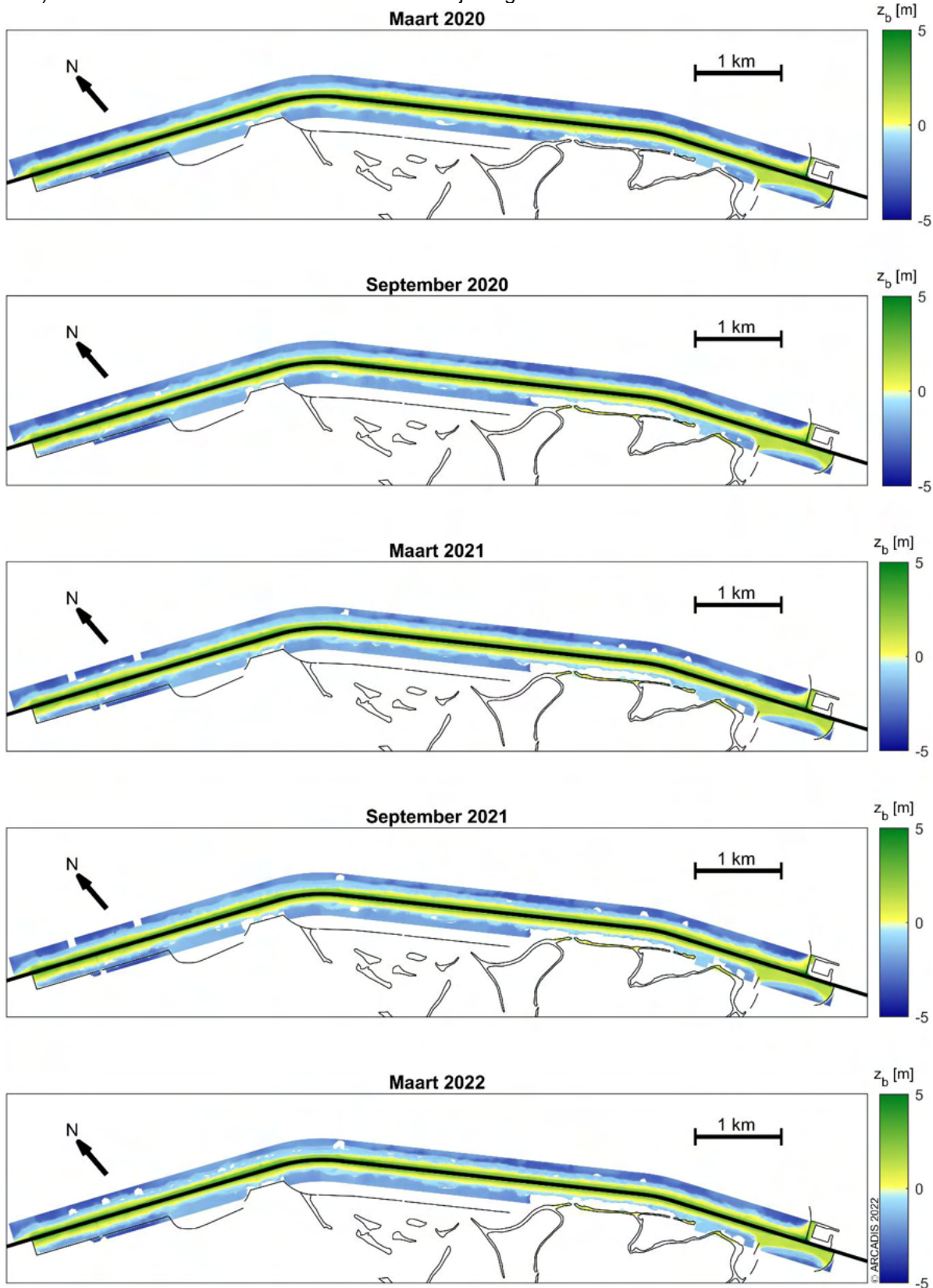


Figuur 6-32 Vak 51, Markermeerzijde, profiel 61250. Detailgebied 3.



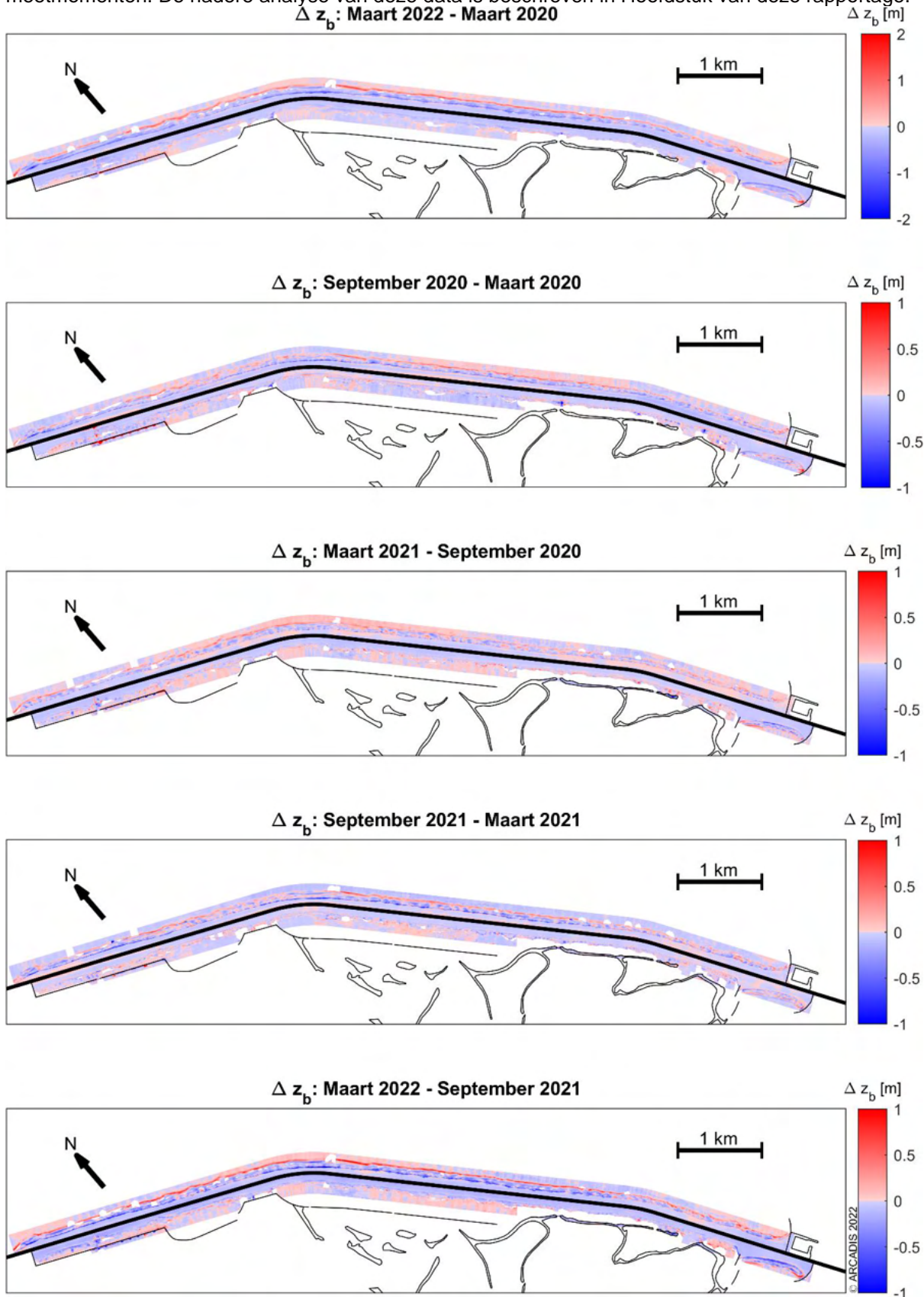
### Bijlage D Bodemligging per halfjaarlijks meetmoment

In Figuur 6-33 is het geïnterpoleerde bodemniveau op alle halfjaarlijkse meetmomenten te zien (T4, T7, T12, T14 en T15) van maart 2020 tot maart 2022. De zwarte lijnen geven de harde structuren en Trintelzand aan.



Figuur 6-33 Bodemligging Houtribdijk halfjaarlijkse data geïnterpoleerd naar een grid met een gridcelgrootte van 2,5 m x 2,5 m.

In Figuur 6-34 is het bodemhoogteverschil tussen maart 2020 en maart 2022 te zien en tussen alle halfjaarlijkse meetmomenten. De nadere analyse van deze data is beschreven in Hoofdstuk van deze rapportage.



Figuur 6-34 Erosie en sedimentatie tussen de halfjaarlijkse data.

# Colofon

ONDERZOEK SUPPLETIEVOLUMES HOUTRIBDIJK

**AUTEUR**

Klaas Lenstra

**PROJECTNUMMER**

30130668 - 6XDJDPQ2WJMN-2140956202-27317

**DATUM**

28 november 2022

**STATUS**

Definitief

**GECONTROLEERD DOOR**

Henk Steetzel