

## Hydro-morfologische metingen in de Schelde-monding voorafgaand aan de kustfundamentsuppleties: rapportage en analyse van de data



# Hydro-morfologische metingen in de Schelde-monding voorafgaand aan de kustfundamentsuppleties: rapportage en analyse van de data

## Auteur(s)

Tim de Wilde  
Jebbe van der Werf  
Jill Hanssen

## Hydro-morfologische metingen in de Schelde-monding voorafgaand aan de kustfundamentsuppleties: rapportage en analyse van de data

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>Opdrachtgever</b>      | Rijkswaterstaat Zee en Delta locatie Middelburg                                  |
| <b>Contactpersoon</b>     | Marco Schrijver  |
| <b>Projectreferenties</b> | SITO-PS 2026 WBK04 - Schelde-estuarium   |
| <b>Trefwoorden</b>        | Schelde-monding, hydrodynamica, morfologie, kustfundamentsuppletie, data-analyse |

### Documentgegevens

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| <b>Versie</b>        | 1.0                   |
| <b>Datum</b>         | 02-03-2026            |
| <b>Projectnummer</b> | 11212794-000          |
| <b>Document ID</b>   | 11212794-000-ZKS-0001 |
| <b>Pagina's</b>      | 132                   |
| <b>Classificatie</b> |                       |
| <b>Status</b>        | Definitief            |

### Auteur(s)

|  |  |  |
|--|--|--|
|  | Tim de Wilde<br>Jebbe van der Werf<br>Jill Hanssen |  |
|  |  |  |

# Samenvatting

Tussen 16 juni en 4 september 2025 is er vanuit het Programma Kustlijnzorg van Rijkswaterstaat een kustfundamentsuppletie aangelegd in de monding van het Schelde-estuarium op de Vlakte van de Raan. De suppletie bestaat uit twee elementen in het zuidelijk gedeelte van de Vlakte van de Raan en heeft een totaal volume van 1 miljoen m<sup>3</sup>. Het noordwestelijke element is in de geul Spleet gelegd (vloedschaar) en het zuidoostelijke in de hier gelegen ebschaar. Naast dat deze suppletie bijdraagt aan het onderhoud van het kustfundament, is het doel ervan om i) de kennis van suppleren in buitendelta's te vergroten, ii) kennis te ontwikkelen van de lokale effecten op waterbeweging, morfologie en ecologie als gevolg van een suppletie, iii) deze kennis te gebruiken om grootschalige modellen te verbeteren.

Voor de T0-analyse (i.e. analyse voordat de suppletie is aangelegd) van dit gebied zijn er in de Schelde-monding, en specifiek rond de suppletielocaties, hydro-morfologische metingen gedaan. Dit bevat onder andere stroomsnelheidsmetingen, zowel op vaste punten als varend, sedimenttransportmetingen, profielmetingen (saliniteit en temperatuur), bodemkernen (bodemsamenstelling) en opnames van de bodem.

In dit rapport wordt deze data beschreven en is een deel van deze datasets geanalyseerd om meer begrip te krijgen van het huidige functioneren van het zuidelijke deel van de Vlakte van de Raan, met daarin de ebschaar en Spleet. Uit de analyse van de stroomsnelheidsmetingen volgt dat in de ebschaar de gemiddelde piekvloedsnelheid groter is dan de piekebsnelheid. Tegelijkertijd is de reststroming in de ebrichting. Welk effect dominant is voor de (netto) sedimenttransporten is onbekend. De snelheden in de Spleet zijn wel overeenkomstig met wat je in een vloedschaar verwacht, i.e. hogere piekvloedsnelheden dan piekebsnelheden en een reststroming in de vloedrichting.

De bodemkernen in het zuidelijk gedeelte van de Vlakte van de Raan laten grote verschillen in slibpercentages en mediane korrelgrootte zien tussen de twee meetmomenten in 2022 en 2023. In de meetcampagne van 2022 waren de bodemkernen op ongeveer dezelfde locatie slibrijker en fijner dan in de meetcampagne van 2023. Vergelijking tussen foto's van de bodemkernen laat zien dat dit verschil vooral komt door een zandlaag die boven de kleilaag aanwezig is in 2023 en afwezig in 2022. Voor de overige gebieden in de Schelde-monding zijn de bodemkernen in beide jaren vooral zandig.

De opnames van de bodem laten duidelijke kenmerken zien van moeilijk erodeerbare lagen die de morfologische ontwikkeling beïnvloeden. Plateaus, getrapte geulwanden en onregelmatige erosiepatronen hebben een direct effect op de morfologie en blijven onveranderd aanwezig gedurende de metingen. Ondanks de harde lagen zien we wel een migratie van de ondieptes tussen de geulen naar het noorden van enkele decimeters per jaar. Dit zien we terug door erosie aan de zuidkant en sedimentatie aan de noordkant. Boven deze harde lagen bevindt zich op sommige plekken een zandpakket waarop bodemvormen aanwezig zijn. Dit zijn met name zandgolven met een hoogte van 0,2 tot 3 m en migratiesnelheid tussen de 20 en 80 m/jaar. Het netto zandtransport gekoppeld aan de migratie van de zandgolven is op de Bol van Knokke richting het oosten gericht. Verder laten de bodemvormen netto transport richting het noordwesten zien voor de ondiepte tussen de ebschaar en de Spleet. Dit komt overeen met de noordelijke migratie die zichtbaar is in de multibeammelingen.

Vervolgstappen zijn het monitoren van de aangelegde suppletie om kennis te vergaren over de levensduur en spreiding van het gesuppleerde sediment. Verder wordt aanbevolen de modellen in de Schelde-monding te valideren met behulp van deze dataset voor vervolgonderzoek naar de dominante sedimenttransportprocessen in het zuidelijk gedeelte van de Vlakte van de Raan en de Schelde-monding.

# Inhoud

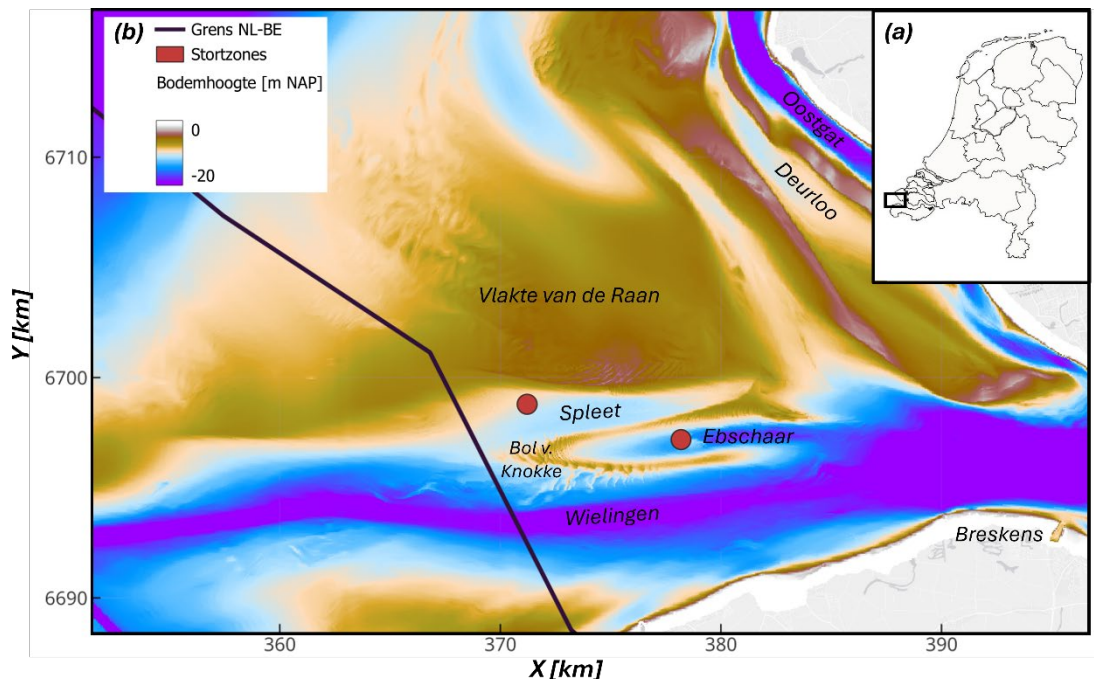
|          |  |           |
|----------|--|-----------|
|          | <b>Samenvatting</b>  | <b>4</b>  |
|          | <b>Inhoud</b>  | <b>6</b>  |
| <b>1</b> | <b>Introductie</b>   | <b>8</b>  |
| 1.1      | Achtergrond  | 8         |
| 1.2      | Doel en scope  | 9         |
| 1.3      | Leeswijzer   | 9         |
| <b>2</b> | <b>Metingen en data-opwerking</b>                                      | <b>10</b> |
| 2.1      | Metingen   | 10        |
| 2.1.1    | Standaard RWS metingen   | 14        |
| 2.1.1.1  | Vaste meetstations   | 14        |
| 2.1.1.2  | RWS debietraaien   | 14        |
| 2.1.1.3  | Vaklodingen  | 15        |
| 2.1.2    | Varende ADCP raaien  | 16        |
| 2.1.3    | ADCP frames  | 17        |
| 2.1.4    | Kustgenese-2 (KG2) frames  | 19        |
| 2.1.5    | Profielmetingen  | 21        |
| 2.1.6    | Bodemmonsters  | 23        |
| 2.1.7    | Multibeam meting   | 25        |
| 2.2      | Data-opwerking   | 27        |
| 2.2.1    | RWS debietraaien   | 27        |
| 2.2.2    | ADCP debietraaien en sedimenttransport                                 | 27        |
| 2.2.3    | ADCP frames  | 28        |
| 2.2.4    | Bodemmonsters  | 29        |
| <b>3</b> | <b>Hydrodynamica en sedimenttransport</b>                              | <b>31</b> |
| 3.1      | Karakterisering hydrodynamica, golven en wind op de Vlakte van de Raan | 31        |
| 3.2      | Varende ADCP meting  | 33        |
| 3.2.1    | Hydrodynamica en sedimenttransport raai 2                              | 33        |
| 3.2.2    | Hydrodynamica en sedimenttransport raai 3                              | 39        |
| 3.3      | ADCP frames  | 46        |
| 3.3.1    | Hydrodynamica meetframes ebschaar                                      | 46        |
| 3.3.2    | Hydrodynamica meetframes vloedschaar                                   | 50        |
| 3.3.3    | Eb- en vloeddominantie   | 52        |
| 3.4      | Profielmetingen  | 57        |
| 3.4.1    | Saliniteit   | 57        |
| 3.4.2    | Temperatuur  | 61        |
| <b>4</b> | <b>Bodemsamenstelling</b>  | <b>65</b> |
| 4.1      | Sedimenteigenschappen 2022   | 65        |
| 4.2      | Sedimenteigenschappen 2023   | 69        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.3      | Temporele veranderingen  | 72         |
| 4.4      | Vergelijking met andere data sets  | 79         |
| <b>5</b> | <b>Morfologie</b>  | <b>82</b>  |
| 5.1      | Recente morfologische ontwikkelingen (2022 – 2024)   | 82         |
| 5.2      | Zandgolven   | 86         |
| 5.2.1    | Bodemvormen classificatie  | 86         |
| 5.2.2    | Bodemvormentoolbox   | 87         |
| 5.2.3    | Resultaten raaien  | 88         |
| 5.2.4    | Resultaten bodemvormentoolbox  | 90         |
| 5.3      | Residueel bodemtransport   | 95         |
| <b>6</b> | <b>Synthese</b>  | <b>96</b>  |
| 6.1      | Data beschikbaarheid   | 96         |
| 6.2      | Uitkomsten van de analyses   | 96         |
| 6.2.1    | Varende ADCP raaien  | 96         |
| 6.2.2    | ADCP frames  | 96         |
| 6.2.3    | Profielmetingen  | 97         |
| 6.2.4    | Bodemkernen: sedimentsamenstelling   | 97         |
| 6.2.5    | Multibeam  | 97         |
| 6.2.6    | Integratie en interpretatie  | 98         |
| 6.3      | Vervolgonderzoek   | 98         |
| <b>7</b> | <b>Bibliografie</b>  | <b>100</b> |
| <b>A</b> | <b>Bepaling diepte-gemiddelde stromingsvectoren en fluxen door de raaien</b>                           | <b>103</b> |
| <b>B</b> | <b>Effect van blanking distance op diepte gemiddelde snelheden</b>                                     | <b>106</b> |
| <b>C</b> | <b>ADCP frames ebschaar: waterstanden, dieptegemiddelde stromingsrichting en stromingsmagnitude</b>    | <b>109</b> |
| <b>D</b> | <b>ADCP frames vloedschaar: waterstanden, dieptegemiddelde stromingsrichting en stromingsmagnitude</b> | <b>114</b> |
| <b>E</b> | <b>Slibpercentages en mediane diameter voor bodemkernen</b>  | <b>119</b> |
| <b>F</b> | <b>Zandgolfanalyse voor 2022 en 2023</b>   | <b>127</b> |
| F.1      | Zandgolf hoogte  | 127        |
| F.2      | Zandgolflengte   | 128        |
| F.3      | Zandgolf asymmetrie  | 130        |

# 1 Introductie

## 1.1 Achtergrond

Tussen 16 juni en 4 september 2025 is er vanuit het Programma Kustlijnzorg van Rijkswaterstaat een kustfundamentsuppletie aangelegd in de monding van het Schelde-estuarium op de Vlakte van de Raan. De suppletie bestaat uit twee elementen en heeft een totaal volume van 1 miljoen m<sup>3</sup>. Het noordwestelijke element is in de geul Spleet gelegd (“NW-Spleet”) en het zuidoostelijke in de ebschaar (“ZO-epschaar”), zie Figuur 1-1b. Het gebied waar de twee suppleties zijn aangelegd, m.a.w. de Spleet en ebschaar in het zuiden van de Vlakte van de Raan wordt in dit rapport het interessegebied genoemd.



Figuur 1-1: (a) Locatie van de Schelde-monding. (b) Locaties van de twee elementen (NW-Spleet en ZO-epschaar) van de 2025 kustfundamentsuppletie in de Schelde-monding en belangrijke morfologische elementen van de Schelde-monding.

Aan het ontwerp van deze suppletie is een aantal voorstudies voorafgegaan, zie Van der Werf et al. (2021) en verwijzingen hierin.

Behalve dat deze suppletie bijdraagt aan het onderhoud van het kustfundament, is het doel ervan om i) de kennis van suppleren in buitendelta's te vergroten, ii) kennis te ontwikkelen van de lokale effecten op waterbeweging, morfologie en ecologie als gevolg van een suppletie, iii) deze kennis te gebruiken om grootschalige modellen te verbeteren om vraagstukken zoals de effecten van zeespiegelstijging beter te kunnen beantwoorden (Van der Heijden et al., 2021). Ten behoeve van deze doelstellingen hebben Van der Heijden et al. (2021) de informatie- en meetbehoefte vastgesteld die later is vertaald naar een monitoringsprogramma. Vanaf november 2022 is er gestart met de metingen in de Schelde-monding.

## 1.2 Doel en scope

Het doel van dit rapport is het geven van een overzicht van de beschikbare hydro-morfologische metingen die gedaan zijn voorafgaand aan (T0, tot juni 2025) en in het kader van de 2025 kustfundamentsuppletie in de Schelde-monding. Daarnaast beschrijft dit rapport de verwerking en analyse van een deel van de datasets. Het gaat hierbij voornamelijk om:

- Varende ADCP ("Acoustic Doppler Current Profiler") raaien (stroomsnelheden en sedimentconcentraties in de waterkolom),
- ADCP meetframes (stroomsnelheden),
- Kustgenese meetframes met ADCP, Aquadopp en OBS instrumenten (stroomsnelheden, sedimentconcentraties),
- Profielmetingen van temperatuur en saliniteit,
- Monsters die genomen zijn ten behoeve van de sedimentsamenstelling van de bodem m.b.v. een box corer,
- Multibeam opnames van de bodemligging.

De methodiek en de resultaten van de ecologische monitoring is beschreven in Escaravage (2024, 2025).

## 1.3 Leeswijzer

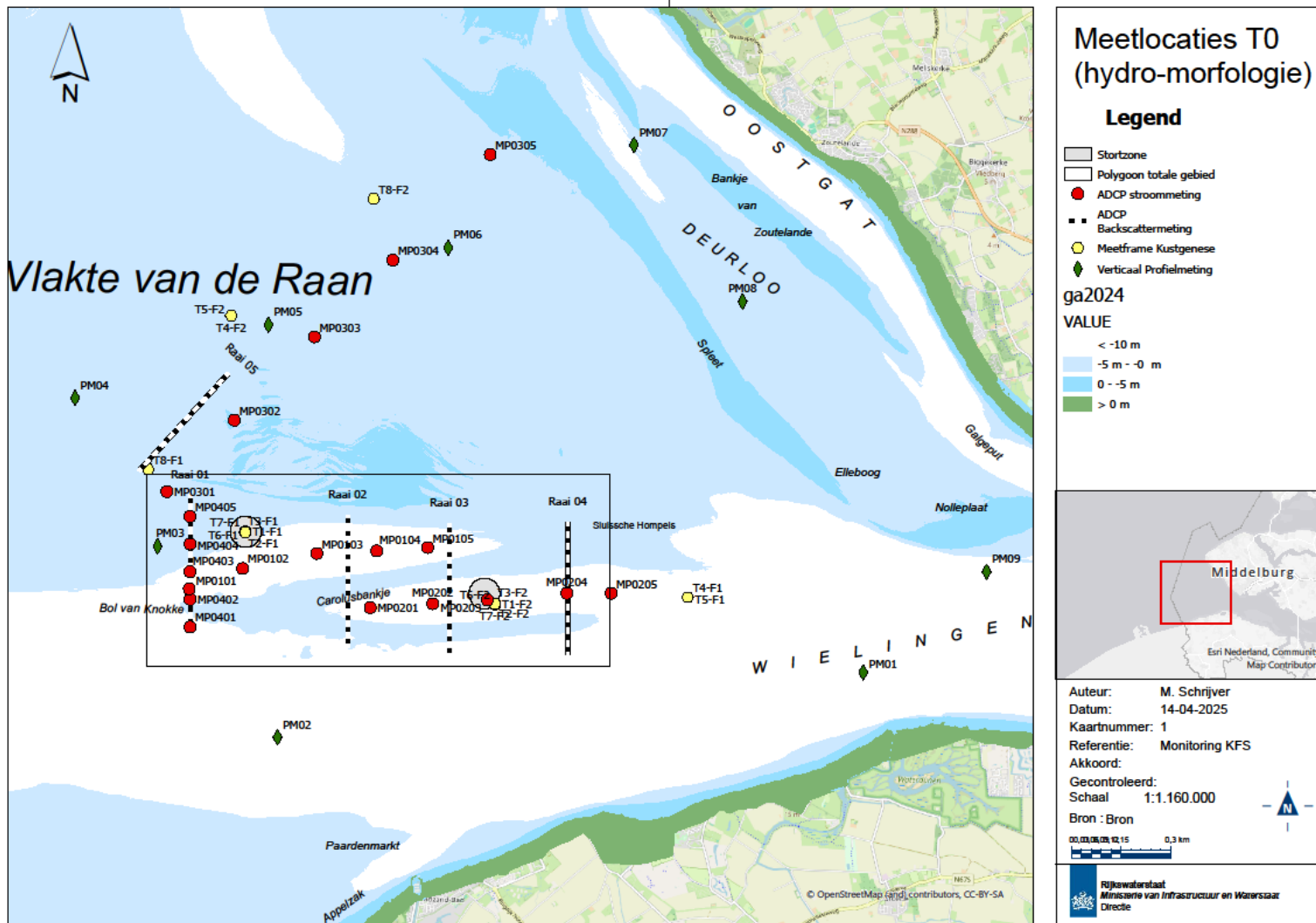
Dit rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 start met een uiteenzetting van alle metingen die gedaan zijn in de Schelde-monding, gekoppeld aan de suppletie. In het vervolg van dit hoofdstuk en verdere rapport wordt een deel van de metingen uitgewerkt. Een omschrijving van de meetdata, meetinstrumenten en dataverwerking van Rijkswaterstaat en/of partners wordt in het tweede deel van Hoofdstuk 2 gegeven. Na de beschrijving van de metingen volgen drie hoofdstukken met daarin methode en meetresultaten per onderdeel, i.e. waterbeweging en sedimentconcentraties (3), bodemsamenstelling (4) en morfologie (5). Het rapport sluit af met een synthese.

## 2 Metingen en data-opwerking

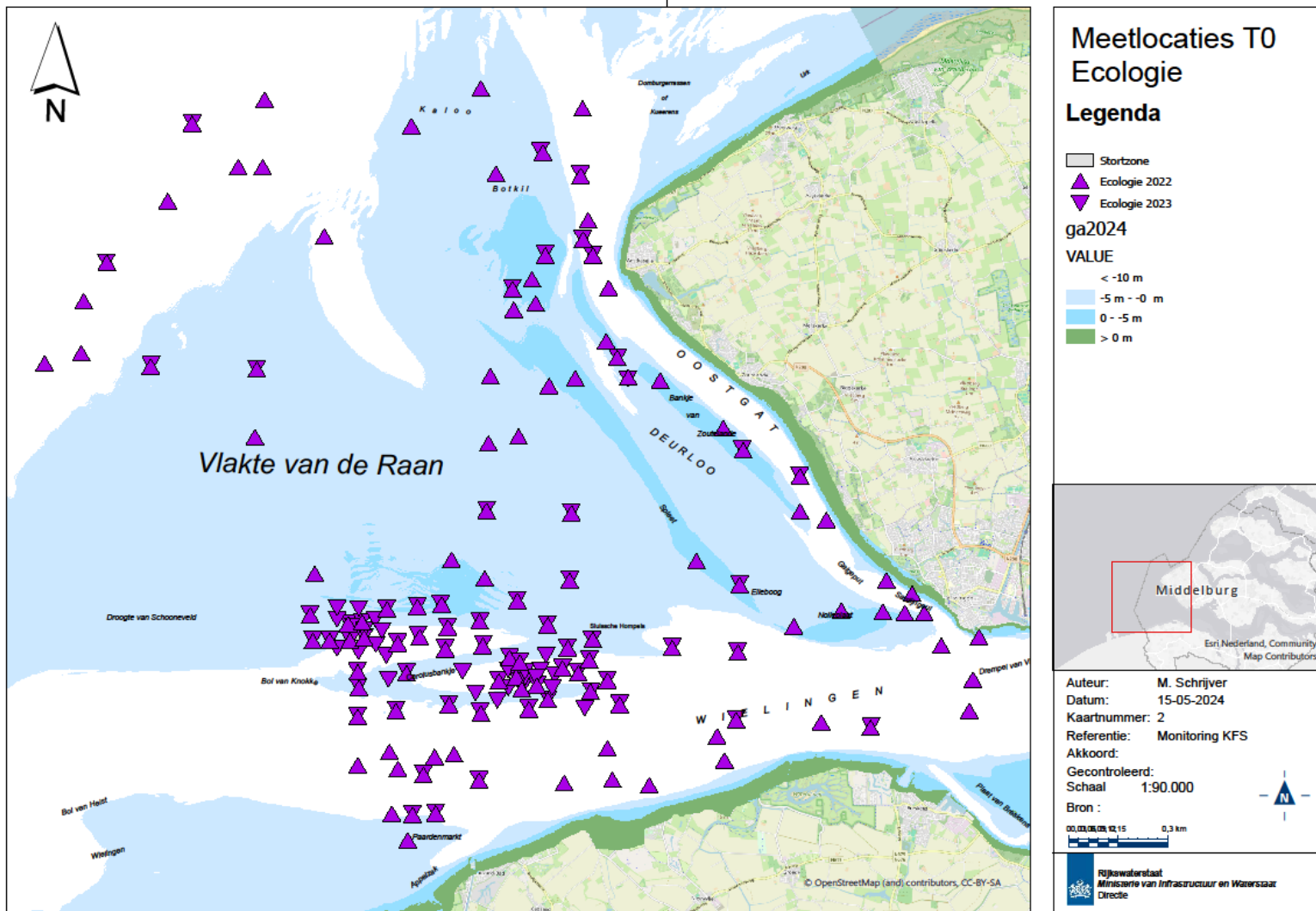
Dit hoofdstuk beschrijft alle metingen die zijn uitgevoerd in de Schelde-monding voordat de suppletie is aangelegd, de zogenaamde T0 metingen. Dit hoofdstuk bestaat uit twee onderdelen. Als eerste worden alle metingen weergegeven die zijn uitgevoerd in de Schelde-monding (2.1). Daarna zijn in Paragraaf 2.2 de metingen uitgewerkt waarvan Deltares de meetdata én metadata heeft ontvangen, denk hierbij aan b.v. locaties, meetperiodes en resoluties van de metingen in tijd en ruimte. In Paragraaf 2.3 wordt de dataverwerking en kalibratie van de metingen beschreven die is uitgevoerd door Rijkswaterstaat en/of partners. Voor sommige metingen is er verdere data-opwerking uitgevoerd door Deltares. Deze opwerking is opgenomen in Hoofdstuk 3 tot 5. Dit hoofdstuk presenteert dus de data zoals deze is ontvangen door Rijkswaterstaat.

### 2.1 Metingen

Ter voorbereiding op het uitvoeren van de kustfundamentsuppletie is een uitgebreid (T0) monitoringsprogramma opgesteld (Van der Heijden et al., 2021). Alle hydro-morfologische metingen staan vermeld in Tabel 2-1 en Tabel 2-2. Tabel 2-1 geeft de standaard RWS metingen weer in de Schelde-monding en Tabel 2-2 beschrijft de meetcampagnes die specifiek zijn gedaan voor de suppletie. Een overzicht van alle metingen die zijn gedaan specifiek voor de suppletie zijn weergegeven in Figuur 2-1 en Figuur 2-2, deze figuren zijn direct overgenomen uit Schrijver (2025). Figuur 2-1 geeft een overzicht van de locaties van alle debietraaien, ADCP frames, Kustgenese-2 frames en profielmetingen. Figuur 2-2 geeft een overzicht van de sedimentmonsters voor macrozoöbenthos en sedimentsamenstelling die zijn genomen in 2022 en 2023.



Figuur 2-1: Overzicht hydro-morfologische T0 metingen (Schrijver, 2025).



Figuur 2-2: Overzicht ecologische T0 metingen (Schrijver, 2025).

Tabel 2-1: Overzicht van vaste RWS metingen in de Schelde-monding tussen 2021 en 2025.

| Meting                            | Parameter(s)                          | Locatie(s)             | 2021                                     | 2022 | 2023 | 2024      | 2025 |
|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--|------|------|-----------|------|
| <b>Waterstandstations</b>         | waterstanden                          | Vlakte van de Raan     | Continu                                  |      |      |           |      |
|                                   |                                       | Westkapelle            | Continu                                  |      |      |           |      |
|                                   |                                       | Cadzand                | Continu                                  |      |      | Geen data |      |
|                                   |                                       | Vlissingen             | Continu                                  |      |      |           |      |
| <b>Golfboeien</b>                 | Golfrichting, golfhoogte, golfperiode | Cadzand                | Continu                                  |      |      |           |      |
|                                   |                                       | Deurloo                | Continu                                  |      |      |           |      |
|                                   |                                       | Wielingen              | Continu (richting toegevoegd sinds 2020) |      |      |           |      |
| <b>Windstation (KNMI)</b>         | Windrichting, windsnelheid            | Vlakte van de Raan     | Continu                                  |      |      |           |      |
| <b>RWS debietraaien (13-uurs)</b> | debieten                              | Raai 11                | x  |      |      | x         |      |
|                                   |                                       | Raai 12                | x  |      |      |           |      |
|                                   |                                       | Raai 14                |  |      |      | x         |      |
| <b>Vaklodingen (singlebeam)</b>   | bodemligging (20 x 20 m)              | gehele Schelde-monding | x  | x    | x    | x         | x    |

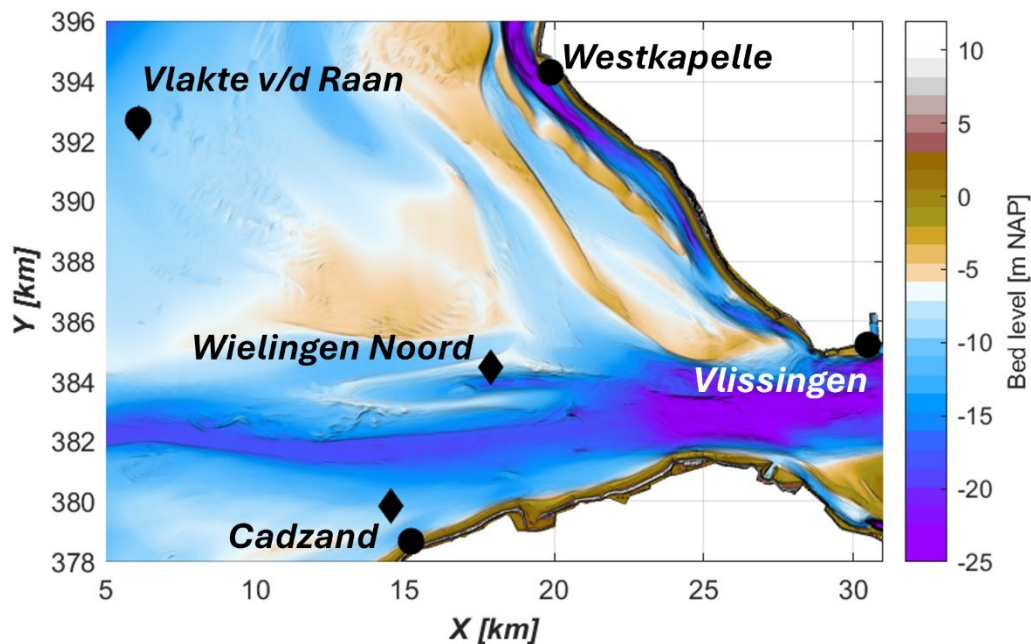
Tabel 2-2: Overzicht van de specifieke metingen die in de Schelde-monding zijn uitgevoerd voorafgaand aan de kustfundamentsuppletie.

| Meting                      | Parameter(s)   | Locatie(s)                                  | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|-----------------------------|--|---|------|------|------|------|------|
| <b>Varende ADCP raai</b>    | Stroomsnelheden, debieten, sedimentconcentraties, sedimentfluxen | Diverse locaties                            |      | xx   | xxx  | xx   |      |
| <b>Aquadopp frames (5x)</b> | Stroomsnelheden  | Diverse locaties (gedurende max. 3 maanden) |      |      | x    | xx   | x    |
| <b>KG2 frames</b>           | Stroomsnelheden, sedimentconcentraties                           | Diverse locaties (gedurende max. 4 weken)   | x    | xx   | xxx  | xx   |      |
| <b>multibeam</b>            | bodemligging (1 x 1 m)   | VvdR-zuid (3,5 x 8,4 km)                    |      | xx   | x    | x    |      |
| <b>Boxcore</b>              | macrozoöbenthos bodemsamenstelling                               | ~100 locaties in de Schelde-monding         |      | x    | x    |      |      |
| <b>Profielmetingen</b>      | temperatuur, saliniteit, chlorofyl, turbiditeit                  | 3-9 locaties                                |      | x    | xxx  | xx   | x    |

## 2.1.1 Standaard RWS metingen

### 2.1.1.1 Vaste meetstations

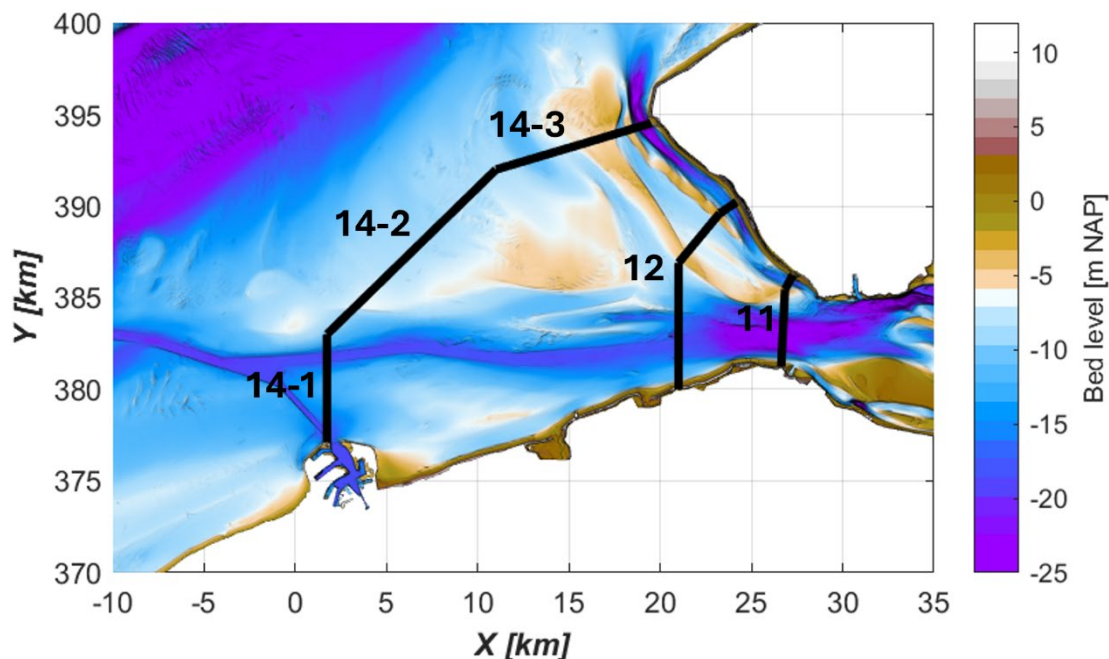
Waterstandsdata wordt ingewonnen via het vaste meetnet LMW (Landelijk Meetnet Water) van Rijkswaterstaat Zee en Delta. De waterstandsdata heeft een resolutie van 10 minuten. Via het vaste meetnet LMW wordt ook golfdata ingewonnen met een tijdsresolutie van 30 minuten. Daarnaast wordt op station Vlakte van de Raan chlorideconcentratie en temperatuur gemeten op -3,25 m van het wateroppervlak en -9,0 m NAP met een resolutie van 10 minuten. De bovenste sensor beweegt dus mee met het getij. De data van het meetnet LMW is opvraagbaar via: <https://waterinfo.rws.nl>. De locaties van de waterstandsstations en golfboeien is te vinden in Figuur 2-3.



Figuur 2-3: Vaste stations in de Schelde-monding van het Landelijk Meetnet Water. De bollen geven waterstandsstations weer en de ruiten golfboeien. Saliniteit en wind worden ook gemeten bij station Vlakte van de Raan.

### 2.1.1.2 RWS debietraaien

Debietraaien zijn metingen waarbij er met behulp van een ADCP sensor onder een schip snelheden worden gemeten. De ADCP meet met behulp van een akoestisch signaal de stroomsnelheden. Rijkswaterstaat meet via het MWTL programma ieder jaar debietraaien. In de Schelde-monding zijn tussen 2021 en 2025 de raaien 11, 12 en 14 bemeaten. De locaties van deze raaien is weergegeven in Figuur 2-4 en de coördinaten samen met de meetperiode zijn te vinden in Tabel 2-3.



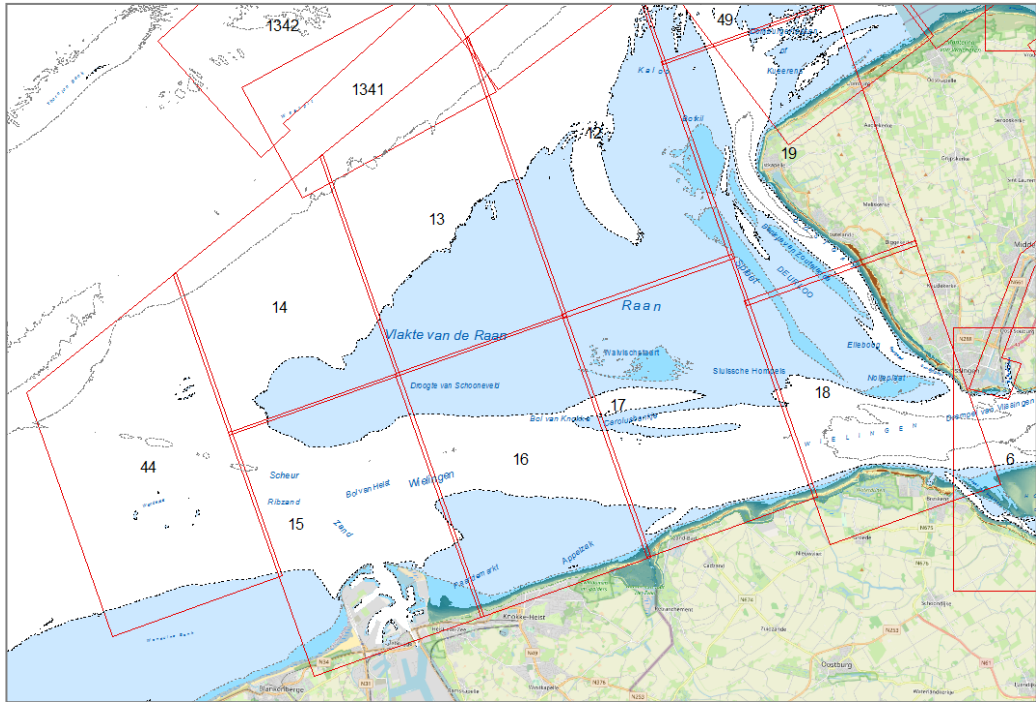
Figuur 2-4: Locaties standaard debietraaien 11, 12 en 14 van Rijkswaterstaat. De onderliggende bathymetrie is de vaklodingen uit 2023.

Tabel 2-3: Locatie standaard debietraaien 11, 12 en 14 van Rijkswaterstaat.

| Debietraaien | X-coördinaat (m RD) | Y-coördinaat (m RD) | Meetperiode(s)     |
|--------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 11           | 26.630              | 381.250             | 24 juni 2021       |
|              | 27.280              | 386.245             | 17-18 oktober 2024 |
| 12           | 21.000              | 380.000             | 15-16 oktober 2024 |
|              | 23.250              | 389.600             |                    |
| 14-1         | 1.731               | 377.100             | 25 juni 2021       |
|              | 1.731               | 383.000             |                    |
| 14-2         | 1.731               | 383.000             | 28-29 mei 2021     |
|              | 11.000              | 392.000             |                    |
| 14-3         | 11.000              | 392.000             | 24 juni 2021       |
|              | 19.500              | 394.530             |                    |

### 2.1.1.3 Vaklodingen

De vaklodingen worden ingewonnen op vaste raaien met een afstand van 200 m, deze worden hierna vergrid tot een raster met een resolutie van 20 bij 20 m. De vaklodingen bladen 12 t/m 19 en 44 (zie Figuur 2-5) zijn vanaf 2022 jaarlijks ingemeten. Dit wordt samengevoegd met de vaklodingen van de Westerschelde en de laseraltimetrie kust en Westerschelde tot één totaalraster (ascii bestand) met een resolutie van 20 bij 20 m.

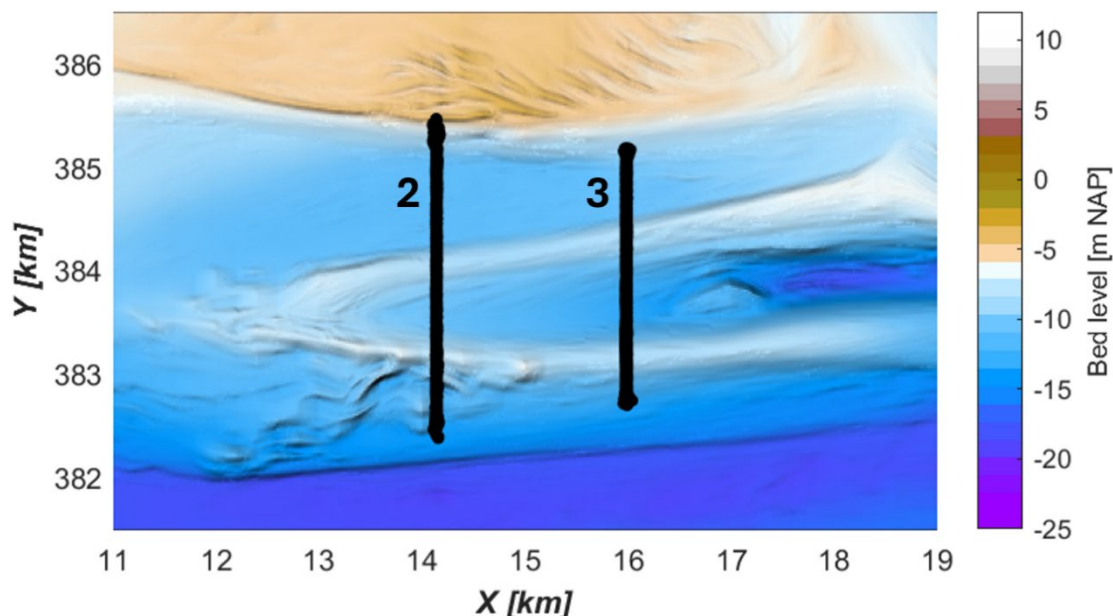


Figuur 2-5: Nummering van vaklodings bladen in de Schelde-monding (Schrijver, 2025).

### 2.1.2 Varende ADCP raaien

Naast de standaard debietraaien van Rijkswaterstaat zijn er 5 raaien gemeten in de omgeving van de suppletie (zie raaien in Figuur 2-1). Een subset van de data, namelijk raai 2 en 3 zijn hieronder uitgewerkt.

Het theoretische begin- en eindpunt van de raaien 2 en 3 is te vinden in Tabel 2-4, de bemeten punten in deze raai zijn te vinden in Figuur 2-6. De raaien 2 en 3 zijn gemeten voor respectievelijk 8 en 13 uur, zie Tabel 2-5. De verticale resolutie van deze metingen is 0,5 m. Raai 2 is 12 keer gevaren; de gemiddelde duur van een raaimeting bedroeg rond de 17-18 minuten (van Helvert, 2023a). Raai 3 is 27 keer gevaren met een gemiddelde meetduur van ongeveer 15 minuten elk (van Helvert 2023b). De snelheidsdata heeft een temporale resolutie van 5-10 s. De instellingen voor de ADCP sensor zijn te vinden in Tabel 2-6 en zijn hetzelfde voor raai 2 en 3.



Figuur 2-6: Locatie van debietraai 2 (links) en debietraai 3 (rechts) in de buurt van de suppletielocatie. De onderliggende bathymetrie is de vaklodingen uit 2023.

Tabel 2-4: Overzicht meetlocatie debietraaien 2 en 3.

| Debietraaien | X-coördinaat (m RD) | Y-coördinaat (m RD) |
|--------------|---------------------|---------------------|
| 2            | 14.139              | 385.500             |
|              | 14.139              | 382.500             |
| 3            | 15.983              | 385.157             |
|              | 15.983              | 382.757             |

Tabel 2-5: Overzicht meetperiode debietraaien 2 en 3.

| Raai | Datum         | Begintijd | Eindtijd | Meetduur (uren) |
|------|---------------|-----------|----------|-----------------|
| 2    | 28 april 2022 | 08:50     | 16:41    | 8               |
| 3    | 15 juni 2022  | 07:45     | 20:44    | 13              |

Tabel 2-6: Instellingen voor debietraaien 2 en 3.

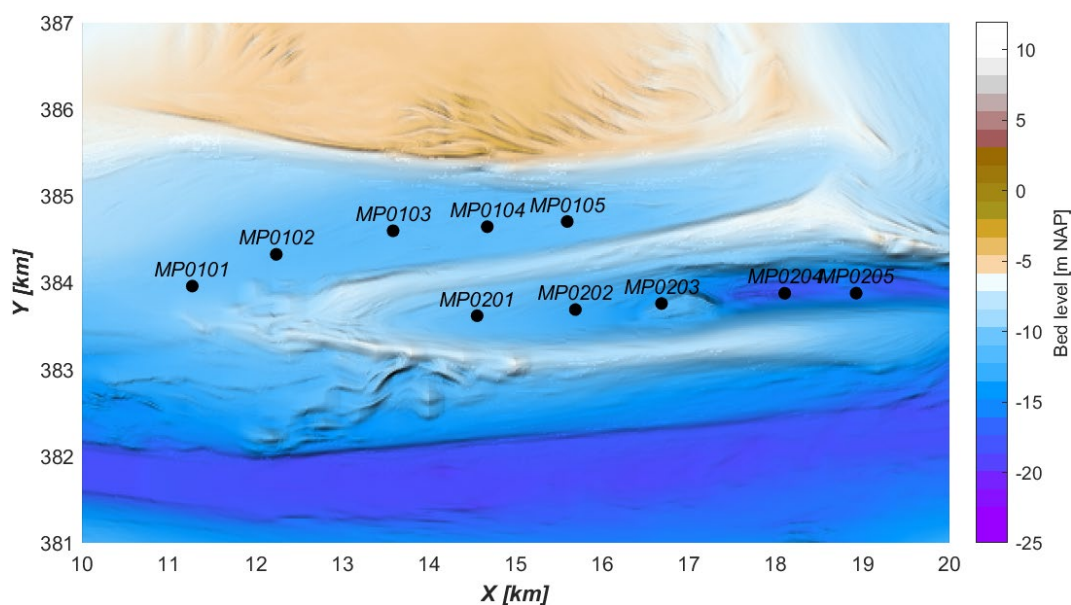
| Raai | Boot       | Meetapparatuur snelheden         | Celgrootte (m) | Openingshoek (°) | Insteekdiepte (m) |
|------|------------|----------------------------------|----------------|------------------|-------------------|
| 2    | RR Roompot | ADCP van Teledyne RD Instruments | 0,5            | 20               | 1,07              |
| 3    | RR Roompot | ADCP van Teledyne RD Instruments | 0,5            | 20               | 1,07              |

### 2.1.3 ADCP frames

Naast debietmetingen zijn er meetframes met Aquadopps uitgezet (5 stuks per meetcampagne). Figuur 2-1 laat de locaties (rode punten) zien van alle vier de meetcampagnes. Een subset van de data, namelijk de frames van meetcampagne MP01 en MP02, zijn hieronder uitgewerkt.

Figuur 2-7 laat de locatie zien voor de twee meetcampagnes MP01 en MP02. De exacte coördinaten en de meetperiode is te vinden in respectievelijk Tabel 2-7 en Tabel 2-8. Deze instrumenten (RDI Workhorse monitor instrumenten) zijn akoestische instrumenten die op de bodem worden gezet en naar boven gericht zijn. Deze instrumenten meten stroomsnelheid. De snelheid dicht bij de bodem wordt niet gemeten, wat twee oorzaken heeft. Ten eerste staat de sensor niet direct op de bodem, maar in een frame iets boven de bodem (op een hoogte van 0,6 m). Verder hebben deze sensoren een zogeheten “blanking distance” (meestal 1,05 m). Dit is de afstand waarbij de echo wordt genegeerd door de sensor. De verticale resolutie van de meetinstrumenten is ingesteld op 0,5 m.

De instellingen van de instrumenten zijn samengevat in Tabel 2-9. Beide instrumenten hebben een ensemble interval van 10 min, dit betekent dat de metingen die meerdere keren per minuut meten gemiddeld worden over een 10 min tijdsinterval. Het aantal pings dat voor hetzelfde ensemble interval is gebruikt verschilt per meetcampagne, de frames van de Spleet hebben 20 pings per minuut, terwijl de ebschaar slechts 5 pings per minuut uitvoert.



Figuur 2-7: Locatie van meetcampagnes MP01 en MP02 in de spleet en ebschaar. De onderliggende bathymetrie is de vaklodingen uit 2023.

Tabel 2-7: Coördinaten van elke ADCP meetframe van meetcampagne MP01 en MP02.

| Meetlocatie | X-coördinaat (m RD) | Y-coördinaat (m RD) |
|-------------|---------------------|---------------------|
| MP0101      | 14.555              | 383.620             |
| MP0102      | 15.688              | 383.691             |
| MP0103      | 16.681              | 383.761             |
| MP0104      | 18.102              | 383.879             |
| MP0105      | 18.926              | 383.880             |
| MP0201      | 11.270              | 383.962             |
| MP0202      | 12.239              | 384.328             |
| MP0203      | 13.586              | 384.600             |
| MP0204      | 14.672              | 384.647             |
| MP0205      | 15.594              | 384.707             |

Tabel 2-8: Meetperiode voor ADCP stroommetingen.

| Serie | Locatie  | Van        | Tot        |
|-------|----------|------------|------------|
| MP01  | Spleet   | 06-03-2024 | 21-05-2024 |
| MP02  | Ebschaar | 06-10-2023 | 30-11-2023 |

Tabel 2-9: Instellingen voor ADCP meetframes per meetcampagne.

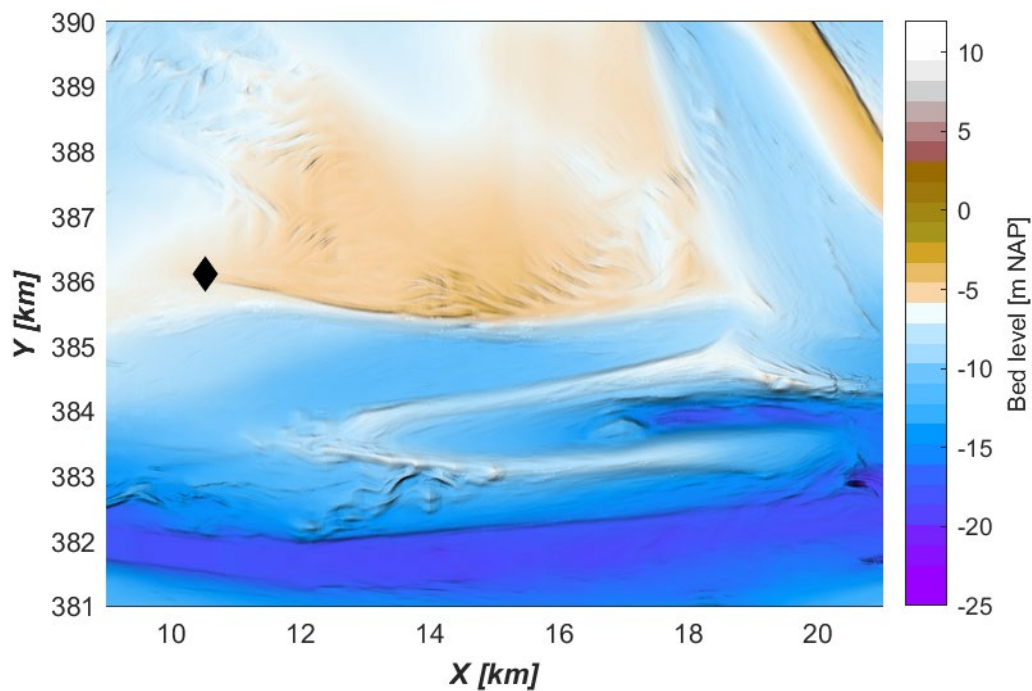
| Meetcampagne | Bandbreedte (kHz) | Pings | Tijd / ping (s) | Ensemble interval (s) | 1 <sup>STE</sup> bin range (m) | Bingrootte (m) |
|--------------|-------------------|-------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| MP01         | 1228.8            | 200   | 3               | 600                   | 1,05                           | 0,5            |
| MP02         | 1228.8            | 50    | 12              | 600                   | 1,05                           | 0,5            |

#### 2.1.4 Kustgenese-2 (KG2) frames

Tijdens de T0 monitoring zijn er verscheidene Kustgenese-2 frames uitgezet, zie de gele punten in Figuur 2-1. Hieronder wordt frame T8-F1 verder beschreven. Verder heeft Stobbelaar (2023) twee frames geanalyseerd in de Schelde-monding (T1-F1 en T1-F3, zie Figuur 2-4).

De locatie van het frame T8-F1 is te vinden in Figuur 2-12 en Tabel 2-10. Het frame heeft ongeveer 4 weken in het water gestaan (zie Tabel 2-10). De algemene lay-out van een Kustgenese frame is te vinden in Figuur 2-9 (Stobbelaar, 2023). Extra informatie over de frames is te vinden in van Prooijen et al. (2020) en Stobbelaar (2023). De instrumenten die erop zitten zijn te vinden in Tabel 2-11 samen met de positie van deze instrumenten op het frame (t.o.v. de onderkant van het frame).

Er zijn vier type instrumenten aangebracht op het frame. Ten eerste een RDI Workhorse ADCP sensor die vanaf het frame naar boven kijkt, deze meet het 3D stroomprofiel vanaf de bovenkant van het frame (2,3 m) tot het wateroppervlakte met een verticale resolutie van 0,5 m. Ten tweede de hoge resolutie Nortek Aquadopp. Deze meet de stroomsnelheid dicht bij de bodem op een hoogte van 0,5 m t.o.v. de onderkant van het frame. Deze sensor meet de snelheid met een resolutie van 3 cm en een bereik van 40 cm. Daarnaast zijn er twee Aquadopp vector sensoren geplaatst op een hoogte van 0.3 en 0.6 m t.o.v. de onderkant van het frame die het 3D stroomprofiel meten op deze hoogte. En ten vierde zijn er vier OBS (Optical Back Scatter) sensoren om de sedimentconcentraties te meten. De OBS sensoren meten de sedimentconcentraties op elk één locatie, de OBS sensoren hangen op een hoogte van ongeveer 0.2, 0.3, 0.5 en 0.8 m t.o.v. de onderkant van het frame.



Figuur 2-8: Locatie van Kustgenese frame T8-F1. De onderliggende bathymetrie is de vaklodingen uit 2023.

Tabel 2-10: Overzicht van de meetdata van de verschillende Kustgenese meetframes.

| Serie | Startdatum | Einddatum  | Kalibratiedatum | X-coördinaat (m RD) | Y-coördinaat (m RD) | Hoogte (m NAP) |
|-------|------------|------------|-----------------|---------------------|---------------------|----------------|
| T8    | 01-08-2024 | 29-08-2024 | 07-08-2024      | 10.524              | 386.119             | NB             |



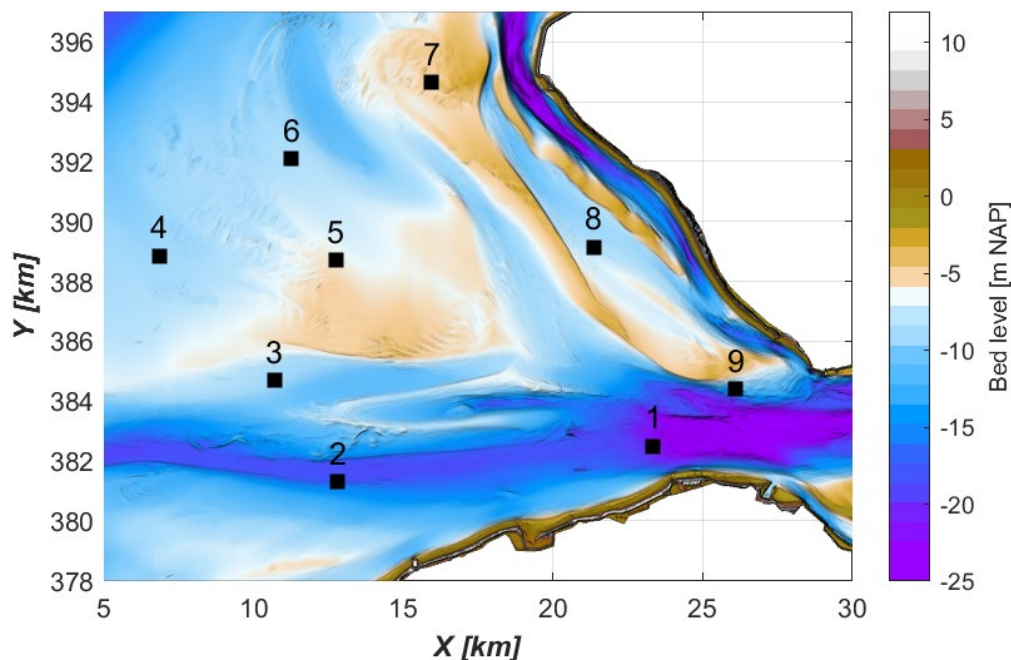
Figuur 2-9: Kustgenese 2 frame, figuur afkomstig uit Stobbelaar, (2023).

Tabel 2-11: Overzicht van de hoogte en locatie van de instrumenten op het Kustgenese 2 frame met locaties t.o.v. het midden van de onderkant van het frame.

| Instrument         | Locatie op frame x (m) | Locatie op frame y (m) | Locatie op frame z (m) |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| TeleDyne ADCP      | -0.05                  | 0.412                  | 2.297                  |
| Aquadopp HR        | -0.977                 | 0.733                  | 0.48                   |
| Aquadopp vector I  | -0.167                 | -1.246                 | 0.346                  |
| Aquadopp vector II | -0.17                  | -0.925                 | 0.645                  |
| OBS I              | -0.221                 | -1.503                 | 0.193                  |
| OBS II             | -0.001                 | -1.42                  | 0.3                    |
| OBS III            | -0.218                 | -1.414                 | 0.5                    |
| OBS IV             | 0.013                  | -1.286                 | 0.798                  |

### 2.1.5 Profielmetingen

Er zijn verschillende profielmetingen gedaan op negen locaties in de Schelde-monding, zie Figuur 2-10. Figuur 2-11 laat een foto zien van de meetopstelling waarbij de meetprobe in de meetvis (metalen behuizing) gemonteerd zit. Deze meetvis wordt met een kraan te water gelaten totdat de draad slap hangt, dan is de bodem bereikt. De meetmomenten van de profielmetingen zijn weergegeven in Tabel 2-12, door de weersomstandigheden zijn niet alle locaties elke keer bemeaten. De coördinaten op basis van de meting op 23-10-2022 zijn voor elk van de profielmetingen weergegeven in Tabel 2-13. Omdat de meetvis door de stroming onder water verplaatst, kan de locatie binnen een meting tot 200 m variëren. Daarnaast kan de meetlocatie tussen de verschillende profielmetingen verschillen tot 500 m. Bovendien is voor sommige profielmetingen de gemeten locatie niet exact bekend. Op de negen locaties wordt het zoutgehalte, temperatuur, chlorofyl en turbiditeit (NTU) gemeten over het diepteprofiel. Elke 1 tot 2 s wordt er een meting gedaan. De verticale resolutie hangt af van de snelheid waarmee de meetopstelling wordt afgezonken, dit resulteert in een verticale resolutie tussen de 2 en 10 cm.



Figuur 2-10: Locaties van de 9 profielmetingen op basis van de data van de meting op 23-10-2022. De onderliggende bathymetrie is de vaklodingen uit 2023.

Tabel 2-12: Meetdata van de negen profielmetingen tussen 2022 en 2025.

| Meetmoment | Profielnummers |   |   |   |   |   |   |   |   |
|------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
|            | 1              | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 23-10-2022 | X              | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 03-04-2023 | X              | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 24-10-2023 |                |   |   |   |   |   | X | X | X |
| 12-12-2023 | X              | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 02-05-2024 |                | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 11-12-2024 | X              | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 24-04-2025 | X              | X | X | X | X | X | X | X | X |

Tabel 2-13: Locatie van de 9 profielmetingen op basis van de data van de meting op 23-10-2022.

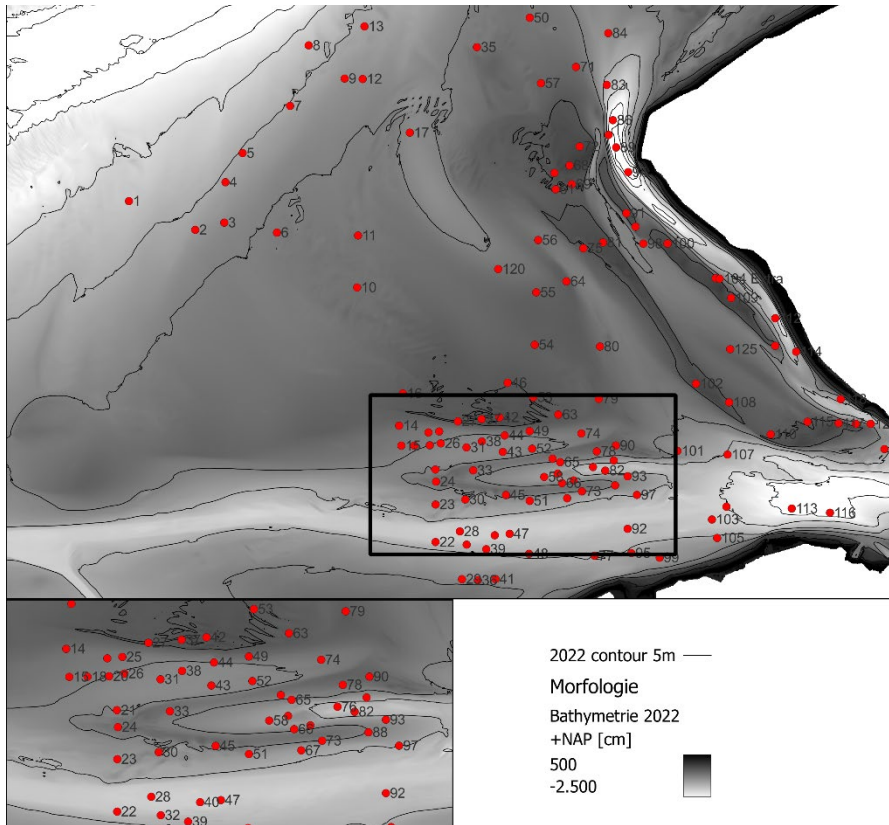
| Profielnummer | X-coördinaat (m RD) | Y-coördinaat (m RD) |
|---------------|---------------------|---------------------|
| 1             | 23350               | 382500              |
| 2             | 12800               | 381300              |
| 3             | 10700               | 384700              |
| 4             | 6850                | 388850              |
| 5             | 12750               | 388700              |
| 6             | 11250               | 392100              |
| 7             | 15950               | 394650              |
| 8             | 21350               | 389150              |
| 9             | 26100               | 384400              |



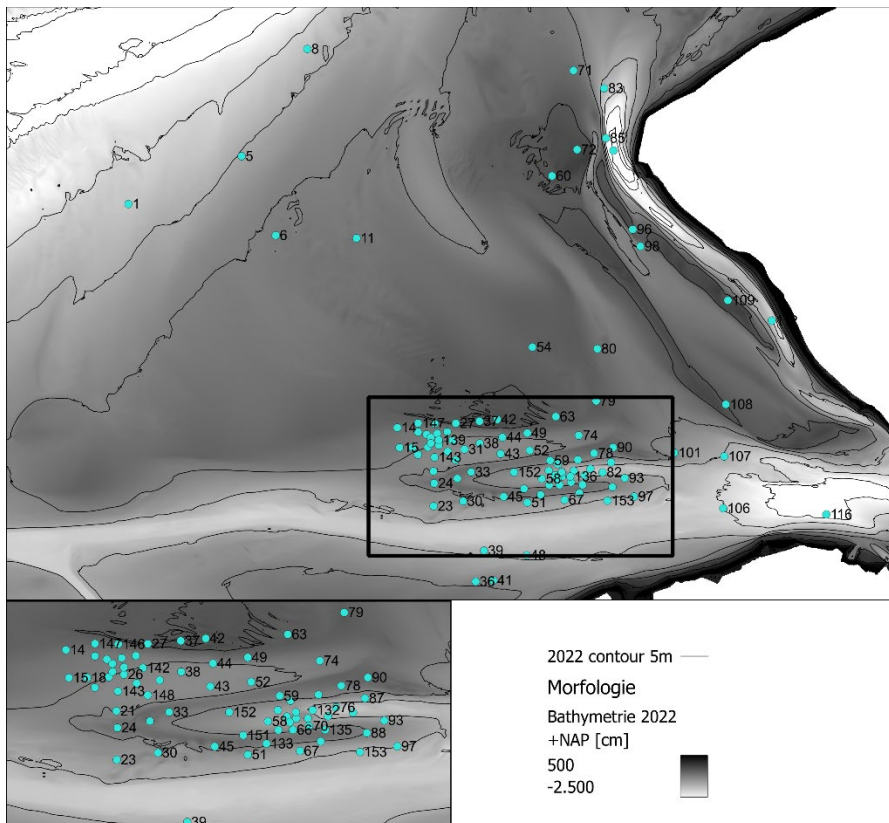
*Figuur 2-11: Profielmetingen met de meetvis op 12-12-2023, foto genomen tijdens meetcampagne door Mariska.*

### 2.1.6 Bodemmonsters

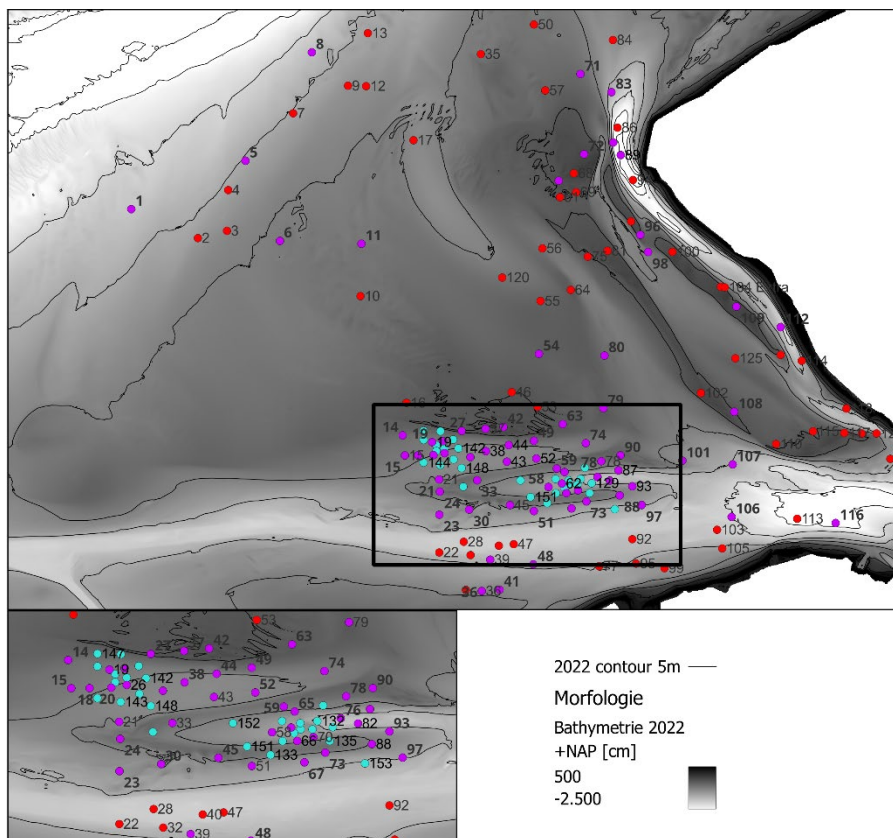
De variabiliteit van het sediment in de toplaag van de bodem van de Westerschelde monding is geanalyseerd door het nemen van bodemmonsters in 2022 en 2023. De bodemmonsters zijn genomen door Waardenburg Ecology op 20 okt 2022 (meting 2022) en 26 - 28 sept, 2 okt, 12 okt 2023 (meting 2023). In verband met weersomstandigheden was het in 2023 niet mogelijk om de bodemmonsters op één dag te nemen. Figuur 2-12 toont de monsterlocaties van 2022 en Figuur 2-13 de monsterlocaties van 2023. In 2023 is besloten om de ruimtelijke variatie van sediment in de geulen Ebschaar en Spleet beter in kaart te brengen en daarom zijn in dit gebied meer bodemmonsters genomen. Omdat andere delen van de Westerschelde monding alleen relevant zijn voor de vergelijking, zijn daar minder bodemmonsters genomen in 2023. Figuur 2-14 toont de locaties die zowel in 2022 en 2023 zijn bemonsterd (paars) en de locaties die alleen in 2023 zijn bemonsterd (cyaan). Bodemmonsters (boxcores) werden genomen vanaf een schip met een boxcorer, waarbij een bodemmonster een hoogte heeft van 30 cm.



Figuur 2-12: Bodemonsterlocaties in de Westerschelde monding 2022. Interesse gebied Ebschaar en Spleet aangeduid met zwarte rechthoek.



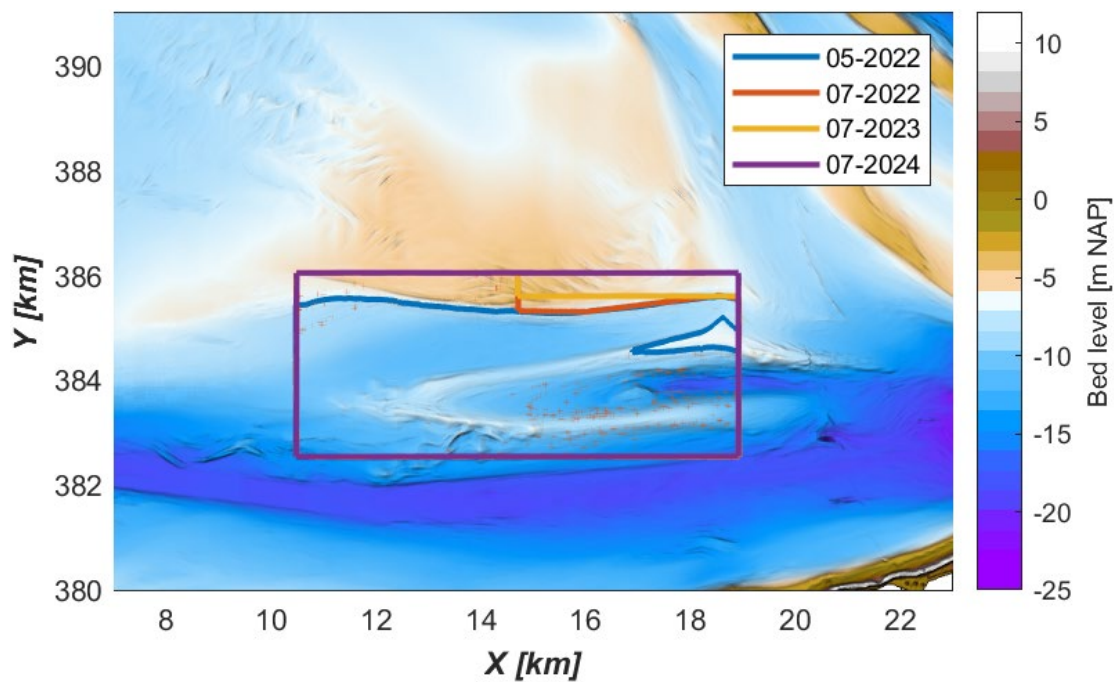
Figuur 2-13: Bodemonsterlocaties in de Westerschelde monding 2023. Interesse gebied Ebschaar en Spleet aangeduid met zwarte rechthoek.



Figuur 2-14: De locaties die zowel in 2022 en 2023 zijn bemonsterd (paars), de locaties die alleen in 2023 zijn bemonsterd (cyaan) en de locaties die alleen in 2022 zijn bemonsterd (rood). Interesse gebied Ebschaar en Spleet aangeduid met zwarte rechthoek.

### 2.1.7 Multibeam meting

Er zijn voor de T0 analyse vier hoge-resolutie (1 bij 1 m) multibeam metingen beschikbaar. Figuur 2-15 laat de locatie zien van de 4 multibeam metingen en het gemeten gebied. De opnamepolygoon heeft een oppervlakte van 8400 bij 3500 m. De meetperiode van elk van de multibeam metingen is te vinden in Tabel 2-14.



Figuur 2-15: Overzicht multibeam metingen rond de suppletie locaties. De coördinaten van de linkeronderhoek van alle polygonen is: (10.490, 382.540). De onderliggende bathymetrie is de vaklodingen uit 2023.

Tabel 2-14: Meetperiode van de multibeam metingen.

| Multibeam meting | Meetperiode                   |
|------------------|-------------------------------|
| 22WSM1701ml5_1   | 15 mei 2022 tot 19 mei 2022   |
| 22WSM1701ml7_2   | 17 juli 2022 tot 29 juli 2022 |
| 23WSM1701ml6_1   | juli 2023                     |
| 24wsm1701        | 20, 21, 24 en 25 juli 2024    |

## 2.2 Data-opwerking

Deze paragraaf beschrijft de dataverwerking en kalibratie van de metingen in Paragraaf 2.1 wanneer de opwerking en kalibratie door Rijkswaterstaat en/of partners is uitgevoerd. Deze paragraaf focust op de opwerking van de standaard RWS debietraaien, de ADCP raaien, de ADCP frames en de bodemonmonster resultaten. Voor de overige data is alleen de brondata gedeeld en niet de opwerkingsstappen en/of een kalibratieverslag (bijv. Kustgenese frames, profielmetingen en multibeam).

### 2.2.1 RWS debietraaien

Het debiet over een bepaalde raai wordt berekend door de snelheid van ADCP te meten en deze te vermenigvuldigen met het oppervlak van de raai. De gemeten snelheden wordt allereerst geprojecteerd op de theoretische meetraai. Daarna worden de loodrechte snelheidscomponent vermenigvuldigt met het celoppervlak. Alle cellen worden gesommeerd om het totale debiet te berekenen. Vanwege reflectie is het niet mogelijk dicht bij de bodem en te meten. Nabij het wateroppervlak kan niet worden gemeten omdat de sensor naar beneden is gericht en onder het schip hangt. Verder heeft het schip een minimale diepgang waardoor niet tot de kustlijn kan worden gemeten. Deze ontbrekende delen van de raaien worden ingevuld middels extrapolatie. De hierboven beschreven procedure is verder uitgewerkt en beschreven voor elk van de debietraaien (Bijlsma, 2021a; Bijlsma, 2021b; Bijlsma, 2021c; Mallants, 2021; Collart, 2024; Mallants, 2024). Deltares heeft het berekende totaaldebiet door de raaien gekregen voor verdere analyse.

De debietmetingen hebben een fout die kan worden toegeschreven aan korte-termijn fluctuatie van het debiet, turbulentie in de waterkolom, extrapolatie fouten en variaties in temperatuur en saliniteit die doorwerken in onzekerheden in de geluidssnelheid. De fout uitgedrukt in de standaardafwijking is ongeveer 5% van de gemeten waarde (Mol, z.d.).

### 2.2.2 ADCP debietraaien en sedimenttransport

In tegenstelling tot de standaard debietraaien hebben we voor de debietraaien in het interessegebied (Tabel 2-5) de ADCP data en sedimentconcentratie data gekregen. De meetprocedure en apparatuur zijn beschreven voor de snelheidsmetingen van raai 2 in van Helvert, (2023a) en voor de sedimentconcentratie metingen in van Helvert (2022). Voor raai 3 zijn de snelheidsmetingen beschreven in van Helvert (2023b).

Aan het begin van iedere raaimeting is de geluidssnelheid bepaald en geregistreerd aan de hand van een multiparameter probe (YSI, type Exo 3) die diepte, temperatuur, saliniteit, troebelheid en pH kan meten. Verder zijn er voor beide raaien om de 5 à 6 raaimetingen monsters genomen om de backscatter van het signaal te kalibreren voor sedimentconcentratie metingen.

Het akoestische echosignaal van de ADCP geeft informatie over de concentratie van het gesuspendeerde materiaal. Dit wordt gemeten in de vorm van de intensiteit van de ontvangen reflecties, oftewel de relatieve backscatter. De relatieve backscatter wordt omgezet naar concentratie door middel van 2 stappen, ten eerste wordt de gemeten relatieve backscatter omgezet naar absolute backscatter. Daarna wordt de absolute backscatter vergeleken met monsters om de backscatter te converteren naar een sedimentconcentratie.

De conversie van de gemeten waarde naar absolute backscatter bestaat uit meerdere stappen, deze stappen wordt uitgebreid beschreven in de data rapportage van Van Helvert (2022). Ten eerste wordt de gemeten eenheid (counts) geconverteerd naar decibel (relatieve backscatter). Ten tweede wordt de informatie van de ADCP gekarakteriseerd, het gaat hierbij om het elektrisch vermogen, golflengte van de puls en efficiëntie van de transducent, deze worden in de fabriek bepaald en verschillen per maatapparaat. Hier wordt de gemeten waarde voor geijkt.

Ten derde wordt de afstand genormaliseerd om de relatieve backscatter om te zetten naar absolute backscatter. Door akoestische spreiding, geluidsabsorptie in het water en geluidsverzwakking door sediment neemt de sterkte van het signaal af over een langere afstand.

De absolute backscatter wordt geconverteerd naar sediment concentraties. Hiervoor worden op verschillende momenten monsters genomen op punten langs de raai. De sedimentconcentraties en korrelgrootte verdeling worden gebruikt voor de conversie, dit gebeurt volgens een logaritmisch verband, zie vergelijking 2-1. De resultaten van de kalibratie zijn alleen bekend voor raai 2 en staan vermeld in Tabel 2-15.

$$SSC = 10^{\frac{\text{Absolute backscatter} - A}{B}} \quad (2-1)$$

Tabel 2-15: Kalibratiecoëfficiënten voor debietraaien 2 en 3.

| Debietraai | A-coëfficiënt | B-coëfficiënt |
|------------|---------------|---------------|
| 2          | 4,765         | 16            |
| 3          | NB            | NB            |

### 2.2.3 ADCP frames

De waterdiepte op de locatie van het frame wordt tijdens het uitzetten van het frame bepaald met een echolood. Vervolgens wordt voor het tijdstip van registratie de actuele waterstand afgeleid van een meetstation uit het LWM. Op basis van deze twee wordt de bodemligging ten opzichte van NAP berekend. Hoewel dit een redelijk accurate bodemligging geeft zijn er twee oorzaken waardoor deze meting niet overeenkomt met de werkelijkheid. Ten eerste wordt de invloed van golven niet meegenomen in de waterstand van het landelijk meetnet en wel in de meting met het echolood. Afhankelijk van de golfhoogte kan dit 1-1,5 m schelen in de werkelijke bodemhoogte. Ten tweede wordt het frame soms niet exact op de gemeten locatie neergezet, wat leidt tot verschillen in bodemhoogte. Hierdoor kunnen verschillen ontstaan tussen de geijkte hoogte en werkelijke hoogte van de metingen.

De ADCP frames meten alles boven 1.05 m boven het frame en geven dus ook 'snelheidsresultaten' boven de waterlijn, er kan namelijk nog steeds reflectie plaatsvinden boven de waterlijn. Maar aan het signaal is ongeveer te zien of waardes boven of onder de waterlijn liggen. Bovendien is de waterlijn zelf zeer gevoelig door extra reflectie van het wateroppervlak. Op basis van deze informatie kan ongeveer de waterlijn bepaald worden vanuit de metingen. Deze "gemeten" waterlijn wordt vergeleken met waterstandsmetingen om de bodemhoogte te checken en indien nodig up te daten.

Om de waterstanden te bepalen bij de meetframes wordt gebruikt gemaakt van de M2-reductiemethode van Rijkswaterstaat. Deze methode gebruikt meerdere referentiestationen, in dit geval zijn dat Vlake van de Raan en Wielingen. Op basis van deze stations wordt de amplificatie van de getijslag en het faseverschil voor de M2 component bepaald voor de waterstanden op een interesselocatie. De amplificatie en het faseverschil worden dan verwerkt op het volledige waterstandssignaal van Vlake van de Raan om een proxy te krijgen van de waterstanden op de interesselocatie (van Cauwenberghe, 1993). Deze waterstanden worden gebruikt om de waterlijn van de ADCP frames te vergelijken. De gemeten bodemhoogtes en waardes bepaald door de waterlijn te matchen met de waterstanden zijn te vinden in Tabel 2-16. De verschillen tussen deze twee methodes kunnen oplopen tot ongeveer 2 m. In de rest van dit rapport wordt de bodemhoogte gebruikt die is bepaald m.b.v. de waterlijn.

Tabel 2-16: Bodemdiepte bepaald via een meting vanaf de boot of door de waterlijn in de metingen te matchen met waterstanden van RWS.

| Meetframe | Gemeten bodemhoogte (m NAP) | Bodemhoogte bepaald via waterlijn methode (m NAP) |
|-----------|-----------------------------|---|
| MP0101    | -10,4                       | -9,8  |
| MP0102    | -10,9                       | -9,9  |
| MP0103    | -11,0                       | -10,1   |
| MP0104    | -10,9                       | -9,2  |
| MP0105    | -10,6                       | -9,6  |
| MP0201    | -10,9                       | -9,3  |
| MP0202    | -12,5                       | -10,5   |
| MP0203    | -12,5                       | -10,2   |
| MP0204    | -18,0                       | -16,3   |
| MP0205    | -16,7                       | -14,5   |

#### 2.2.4 Bodemmonsters

Van ieder bodemmonster is een submonster van de bovenste 10 – 15 cm genomen, gestoken vanaf de bovenkant van het bodemmonster, zie Figuur 2-16. De bodemeigenschappen van de submonsters zijn geanalyseerd door het Waterbouwkundig Laboratorium, Borgerhout, België. De onderzochte eigenschappen betreffen korrelgrootteverdeling, watergehalte en gewicht droge stof. De korrelgrootteverdeling is bepaald op basis van zeven (materiaal groter dan 2 mm) en laser diffractie (materiaal kleiner dan 2 mm). Het watergehalte en gewicht droge stof is bepaald door de monsters (herhaaldelijk) te wegen en te drogen. Omdat het materiaal gedroogd en gewogen is bij verschillende temperaturen, was het ook mogelijk om het gewicht van het organisch materiaal en van schelpen te bepalen. Een verdere beschrijving van de monsternamen en sedimentproeven is beschreven voor 2022 in Kruijt et al. (2022) en voor 2023 in De Haan et al. (2023).



Figuur 2-16: Boxcore en bodemmonster van locatie 82 genomen uit de Ebschaar, oktober 2022.

Het percentage slib, de mediane korrelgrootte ( $D_{50}$ ), de uniformiteit van het materiaal, het watergehalte en gewicht schelpen zijn bepaald op basis van de meetresultaten van de sediment eigenschappen. Het percentage slib is het percentage materiaal van een monster kleiner dan  $63 \mu\text{m}$ . De uniformiteit van het materiaal,  $U$ , is bepaald op basis van de korrelgrootte waarvoor 10% van het monster kleiner is ( $D_{10}$ ) en korrelgrootte waarvoor 90% van het monster kleiner is ( $D_{90}$ ).

$$U = \sqrt{\frac{D_{90}}{D_{10}}} \quad [-] \quad (2-2)$$

Het watergehalte  $W$  is:

$$W = \frac{(W_{nat\ monster} - W_{droog\ monster\ 100})}{W_{nat\ monster}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-3)$$

Waarbij  $W_{nat\ monster}$  het gewicht van het monster voor drogen,  $W_{droog\ monster\ 100}$  het gewicht van het monster na drogen bij een temperatuur van  $100^\circ\text{C}$ .

Omdat de monsters mogelijk ook schelpen bevatten, die de resultaten van de korrelgrootte verdeling beïnvloeden, is ook het schelpengehalte  $W_{schelpen}$  van de bodemmonsters bepaald. Schelpen verbranden bij een temperatuur tussen de  $550^\circ\text{C}$  en  $1000^\circ\text{C}$ .

$$W_{schelpen} = \frac{(W_{droog\ monster\ 550} - W_{droog\ monster\ 1000})}{W_{droog\ monster\ 550}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-4)$$

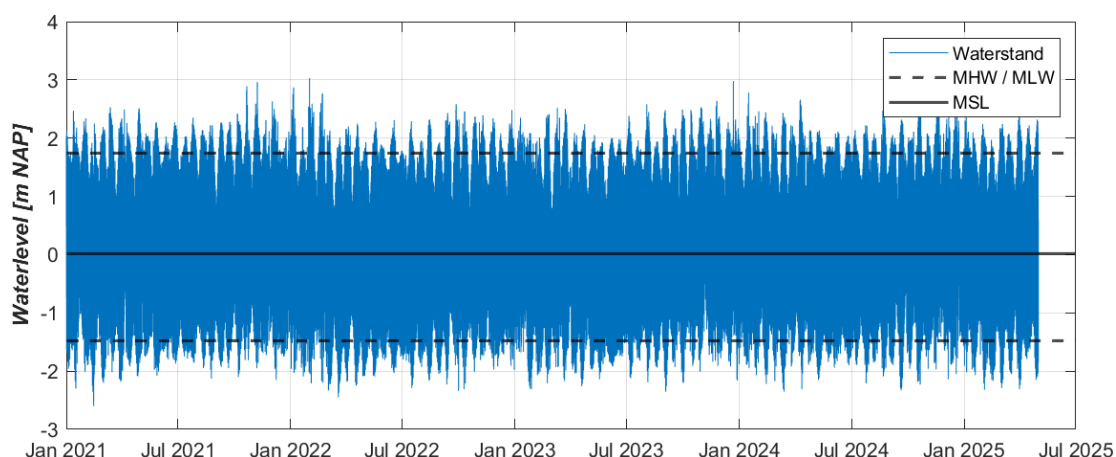
Waarbij  $W_{droog\ monster\ 550}$  het gewicht van het monster inclusief schelpen maar zonder watergehalte en organisch materiaal (verbrand bij een temperatuur hoger dan  $550^\circ\text{C}$ ),  $W_{droog\ monster\ 1000}$  het gewicht van het monster na drogen bij een temperatuur van  $1000^\circ\text{C}$ .

## 3 Hydrodynamica en sedimenttransport

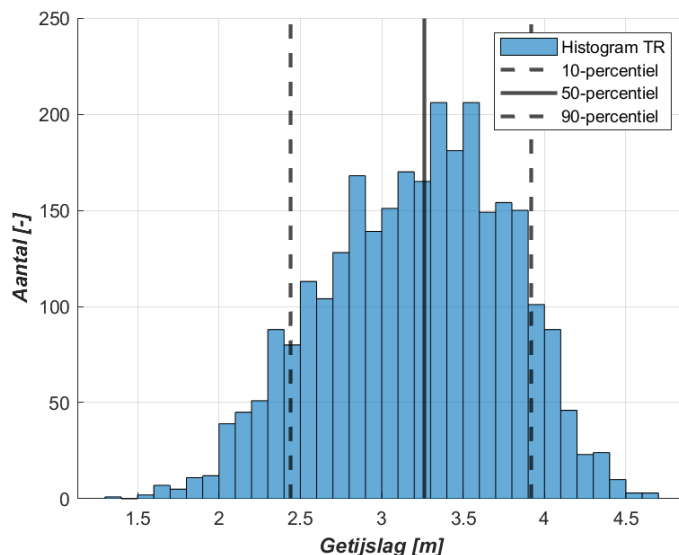
### 3.1 Karakterisering hydrodynamica, golven en wind op de Vlakte van de Raan

Op basis van waterstandsstation Vlakte van de Raan wordt een korte karakterisering gegeven van de hydrodynamische condities in dit deel van de monding. Station Vlakte van de Raan is ongeveer 10-12 km verwijderd van het interessegebied, maar is het dichtstbijzijnde RWS meetstation voor waterstanden. Voor de volgende analyses zijn waterstanden gebruikt van 01-Jan-2021 tot 01-Jan-2025. Figuur 3-1 laat de waterstanden gedurende deze periode zien. Het gemiddeld hoogwater, bepaald door het gemiddelde te nemen van alle hoogwaters tijdens de meetperiode, is +1,73 m NAP. Het gemiddeld laagwater ligt op -1,47 m NAP en de gemiddelde waterstand is +0,01 m NAP voor de geanalyseerde periode. Tijdens hoogwater in combinatie met een storm stijgen waterstanden tot ongeveer +3 m NAP, de maximaal gemeten waterstand tijdens deze periode is +3,03 m NAP.

Figuur 3-2 laat een histogram zien van de getijslag berekend door het verschil tussen de hoog waters en laag waters te bepalen. De gemiddelde getijslag is ongeveer 3,3 m en tijdens doortij daalt de getijslag tot 2,4 m (10-percentiel). Tijdens springtij neemt de getijslag toe tot ongeveer 3,9 m (90-percentiel). De maximale getijslag is ongeveer 4,6 m en de minimale getijslag ligt rond de 1,4 m.

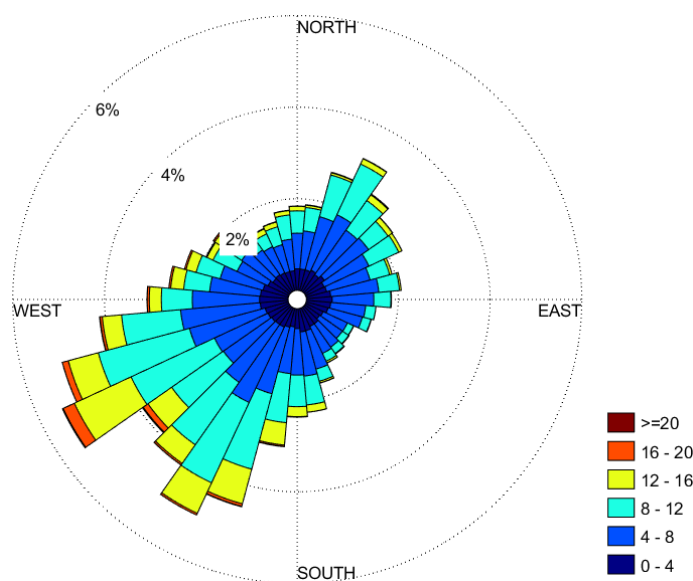


Figuur 3-1: Waterstanden van meetstation Vlakte van de Raan met berekende waarden voor gemiddeld hoog water, gemiddeld laag water en de gemiddelde waterstand.



Figuur 3-2: Overzicht van de getijslag van station Vlake van de Raan.

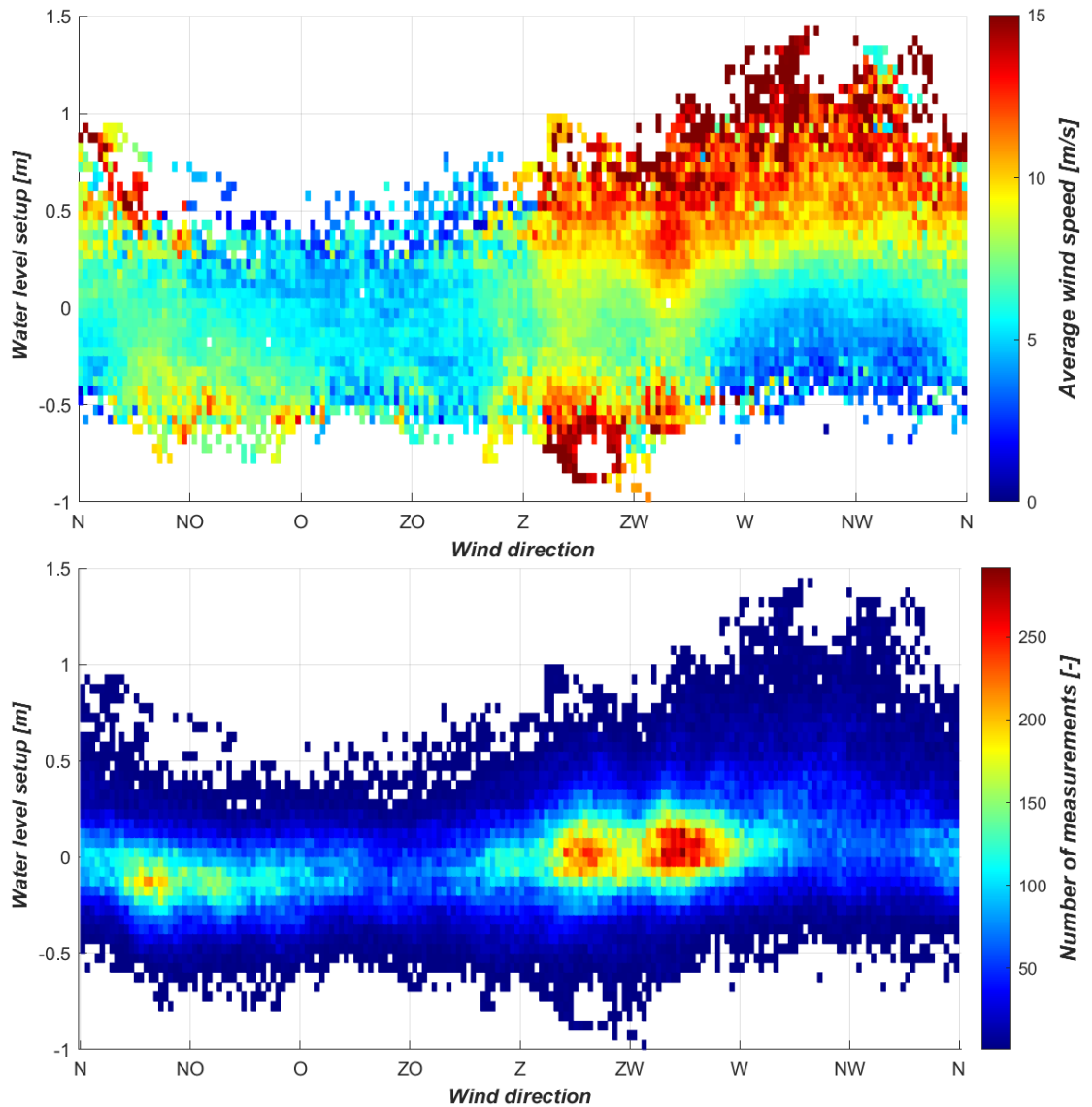
Naast waterstanden worden er ook windmetingen gedaan bij station Vlake van de Raan. De windroos van de metingen tussen 01-Jan-2021 tot 01-Jan-2025 is te vinden in Figuur 3-3. De meest dominante windrichting ligt tussen het zuiden en westen, verder komt de wind ook af en toe uit het noordoosten. Op station Vlake van de Raan zijn windsnelheden gemeten tot 26 m/s (10 Beaufort; zware storm), maar de gemiddelde windsnelheid ligt rond de 7,3 m/s (4 Beaufort; matig).



Figuur 3-3: Windroos van meetstation Vlake van de Raan voor de periode 01-Jan-2021 tot 01-Jan-2025.

De waterstanden bij station Vlake van de Raan zijn met behulp van  $t_{\text{tide}}$  (Pawlowicz et al., 2002) opgesplitst in astronomisch getijcomponenten en een waterstandsopzet. De waterstandsopzet is uitgezet tegen de windrichting en -snelheid in Figuur 3-4. Over het algemeen is er regelmatig een waterstandsopzet (of fout in de fit met het astronomische getij) tussen de -0,2 en 0,2 m. Dit geldt voor alle mogelijke windrichtingen en windsnelheden. Naast deze standaard waterstandsopzet, zien we dat wind vanuit het westen tot het noorden in combinatie met windsnelheden boven de 10 m/s kan leiden tot hoge waterstandsopzet op de Vlake van de Raan. De wind tussen het zuiden en zuidwesten met een snelheid boven de 10 m/s leidt eerder tot een waterstandsverlaging, al zijn er ook momenten met harde wind uit het zuiden tot zuidwesten die leiden tot een waterstandsverhoging. Dit verband is niet zo sterk als

de wind uit het westnoordwesten en noorden komt. Harde wind uit het noordoosten tot zuiden komt niet zo vaak voor (zie Figuur 3-3) en leidt niet tot significante waterstandsopzet of -verlaging. Bovendien kan een opzet ook ontstaan door een windveld of storm op een ander deel van de Noordzee. In dat geval hoeft er geen lokaal windveld aanwezig te zijn omdat de opzet verder weg wordt gegenereerd.



Figuur 3-4: Waterstandsopzet van station Vlakte van de Raan uitgezet tegen de windrichting en windsnelheid van station Vlakte van de Raan. De windrichting is opgesplitst in delen van 2 graden en de waterstandsopzet in delen van 0.05 m. Boven: gemiddelde windsnelheid per cel. Onder: Het aantal metingen per cel.

## 3.2 Varende ADCP meting

Deze paragraaf focust op de resultaten van de varende ADCP metingen van 22 april (raai 2) en 15 juni 2022 (raai 3). In Appendix A is de methode opgenomen van het middelen van de 3D snelheden over de diepte en het bepalen van het raaidebiet en de sedimentflux.

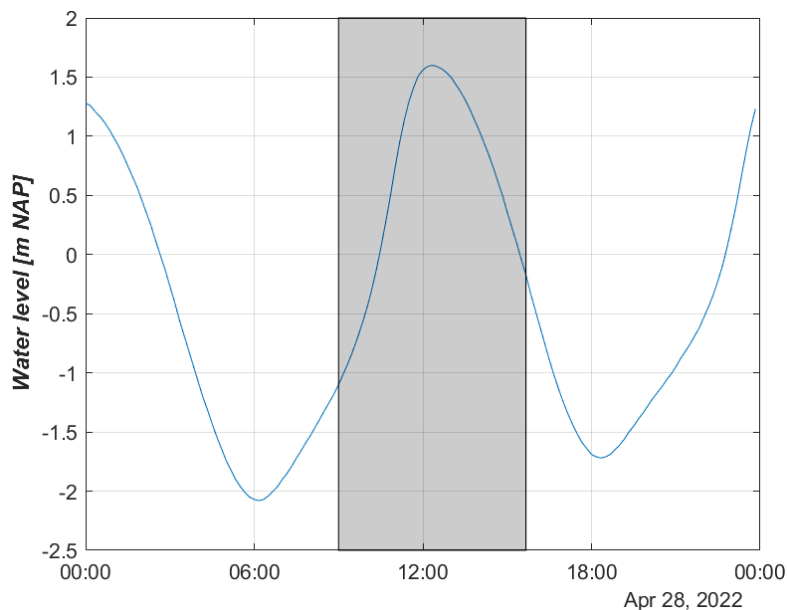
### 3.2.1 Hydrodynamica en sedimenttransport raai 2

De locatie van raai 2 is weergegeven in Figuur 2-6. De raai ligt in het uiterste zuiden net in de Wielingen, waarna deze noordwaarts de ebschaar doorsteekt en daarna de Spleet. Figuur 3-5 laat de waterstanden tijdens de meting zien bij station Vlakte van de Raan. De meetcampagne begint na laag water, om ongeveer 12:30 wordt hoog water bereikt waarna de waterstanden

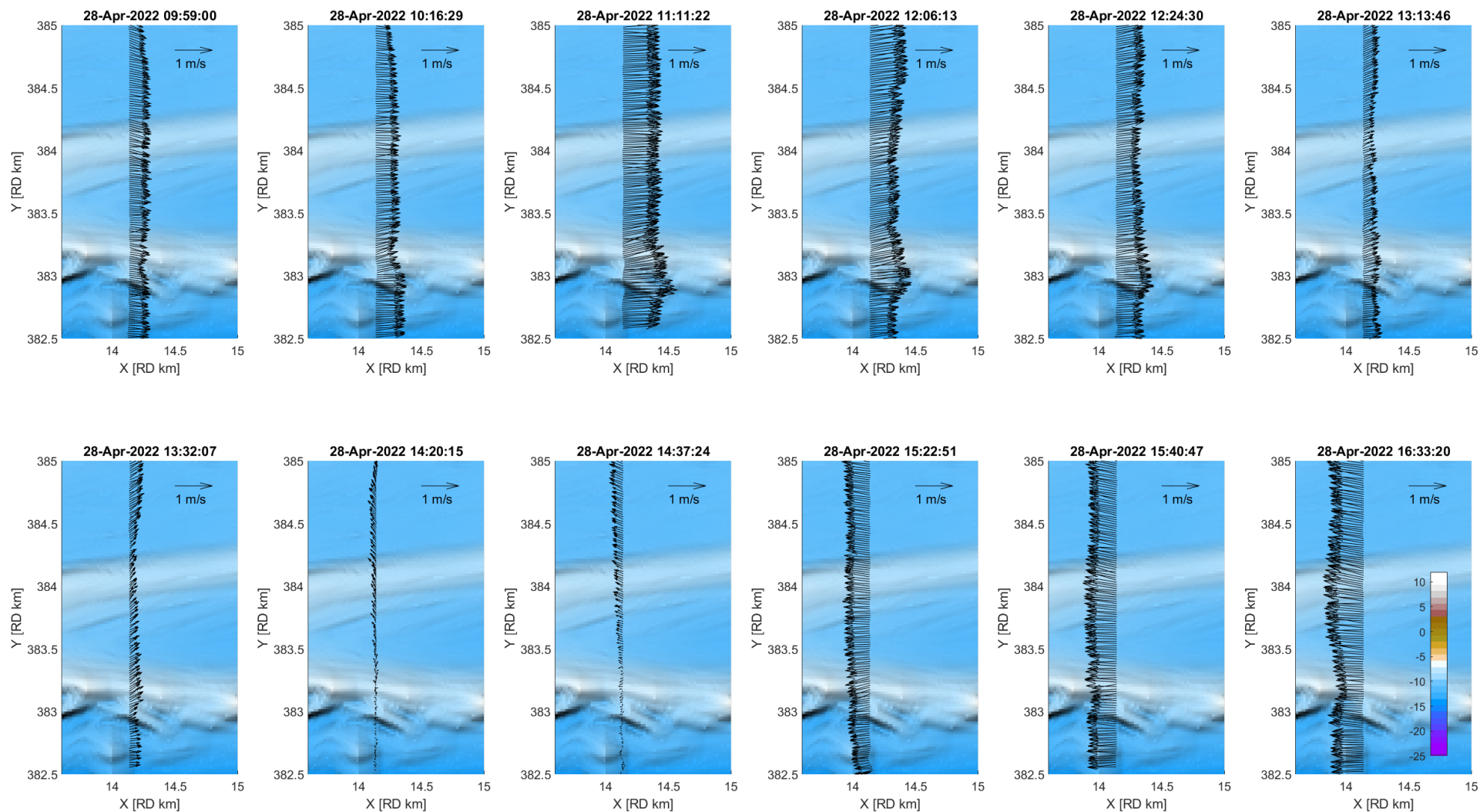
weer afnemen. De getijslag tijdens deze meting was ongeveer 3,6 m, de getijslag ligt boven het gemiddelde van station Vlake van de Raan (Figuur 3-2). De gemiddelde windsnelheid tijdens deze meetcampagne was ongeveer 8 m/s (5 Beaufort; vrij krachtig) en de wind kwam uit noordelijke richting.

Figuur 3-6 laat voor elk van de gevaren raaien de diepte-gemiddelde stroomsnelheden zien. De vectoren zijn vooral oostwaarts (vloed) en westwaarts (eb) gericht. De bemeten periode start in de vloedfase, waarbij de snelheden toenemen tussen 09:59 en 11:11. Na de piek vloodsnelheden, nemen de snelheden af tot 13:32, waarna de snelheden kenteren naar het westen (eb). Vanaf 14:20 nemen de westelijk gerichte snelheden toe tot piek eb snelheden tijdens de laatste bemeten raai om 16:33.

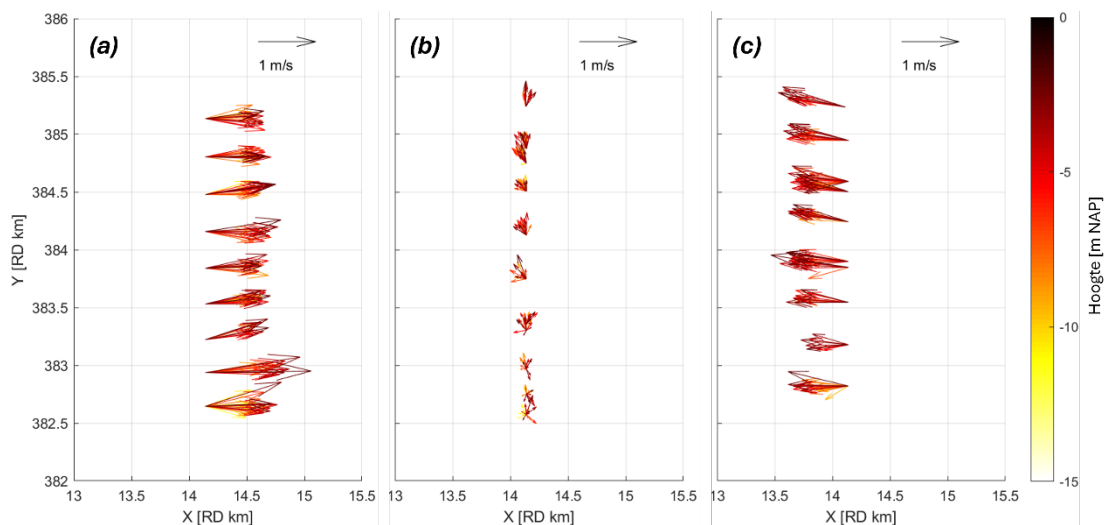
Figuur 3-7 laat voor drie van de raaien de variatie van de magnitude en richting van de snelheden over de diepte zien. De 3D stromingsvectoren van Figuur 3-7a en Figuur 3-7c zijn de momenten van respectievelijk piek vloed- en eb. Deze laten zien dat de magnitude afneemt naar de bodem toe en dat de variatie in stromingsrichting over het profiel niet zo groot is. Tijdens de kentering van het getij (Figuur 3-7b) zijn de stromingsvectoren een stuk kleiner en is de variatie in richting en magnitude groter.



Figuur 3-5: Waterstand op meetstation Vlake van de Raan tijdens meetcampagne (zwarte blok) van raai 2.

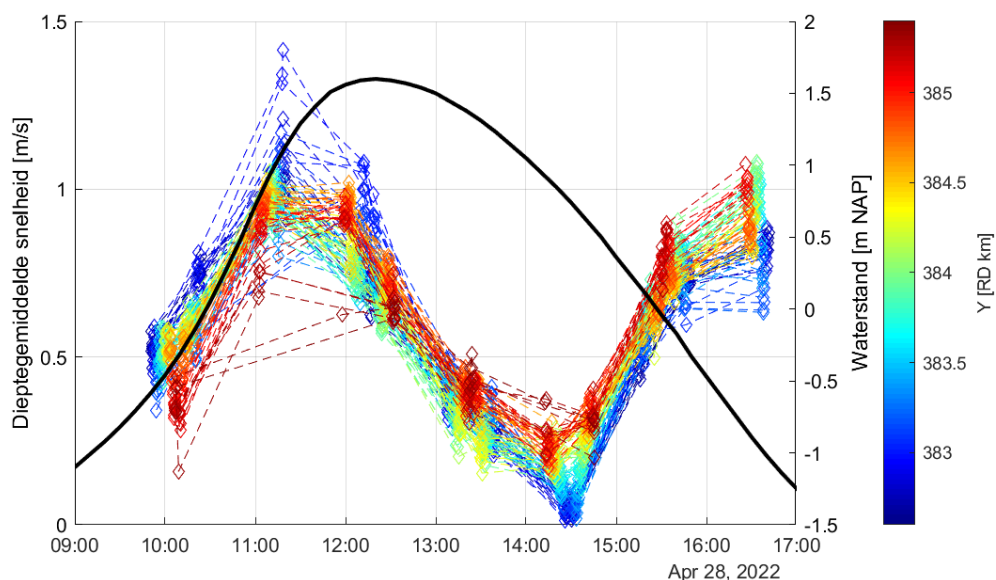


Figuur 3-6: Variatie van de dieptegemiddelde snelheden voor raai 2 over de tijd.



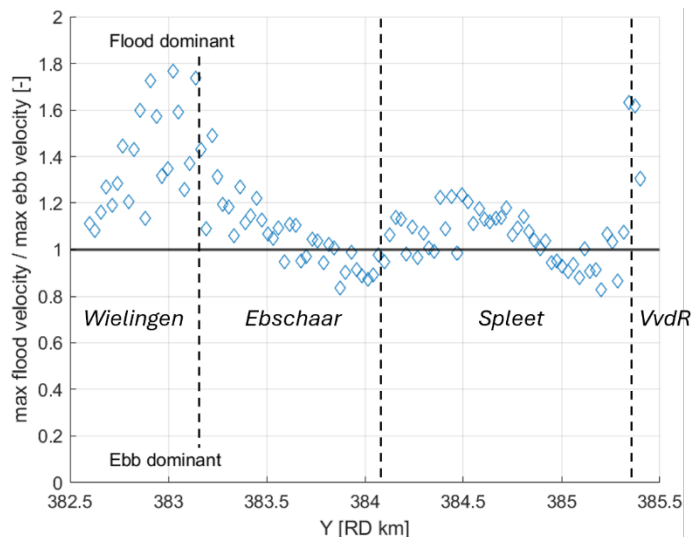
Figuur 3-7: Snelheidsvectoren als functie van verticale positie voor raai 2 gemeten op 28 april 2022: (a) tijdens de vloedpiek (11:11), (b) kentering (14:20) en tijdens de ebpiek (16:33).

Figuur 3-8 laat een tijdserie zien die gebaseerd is op de diepte-gemiddelde stromingsvectoren van Figuur 3-6. De theoretische meetraai wordt opgedeeld in punten met een interval van 100 m. Voor elk van de punten wordt voor elke gevaren raai een locatie geselecteerd die binnen 10 m van dit punt ligt. Op deze manier kunnen we een tijdserie maken van het gemeten getij van locaties die op ongeveer dezelfde plek gemeten zijn. De kleur van de lijnen in Figuur 3-8 geeft de positie langs de raai weer (zuidelijk is blauw, noordelijk is rood). De tijdsperiode van  $\pm 10:00$  tot  $\pm 14:30$  laat de snelheden in de vloedperiode zien, na  $\pm 14:30$  zijn het de eb snelheden. De pieksnelheden tijdens vloed zijn in het zuiden (blauwe punten; geul Wielingen) hoger dan in het noorden van de raai. Dit is omgekeerd voor de piek eb snelheden die in het noorden van de raai (groene en rode punten) hoger is dan in het zuiden. Tegelijkertijd is deze raai niet volledig bemeet, dus na 16:30 zouden de snelheden nog hoger kunnen zijn.



Figuur 3-8: Tijdserie voor locaties met een interval van 100 m langs raai 2. In kleur is het snelheidsverloop over tijd weergegeven, de zwarte lijn laat de waterstand zien van station Vlake van de Raan.

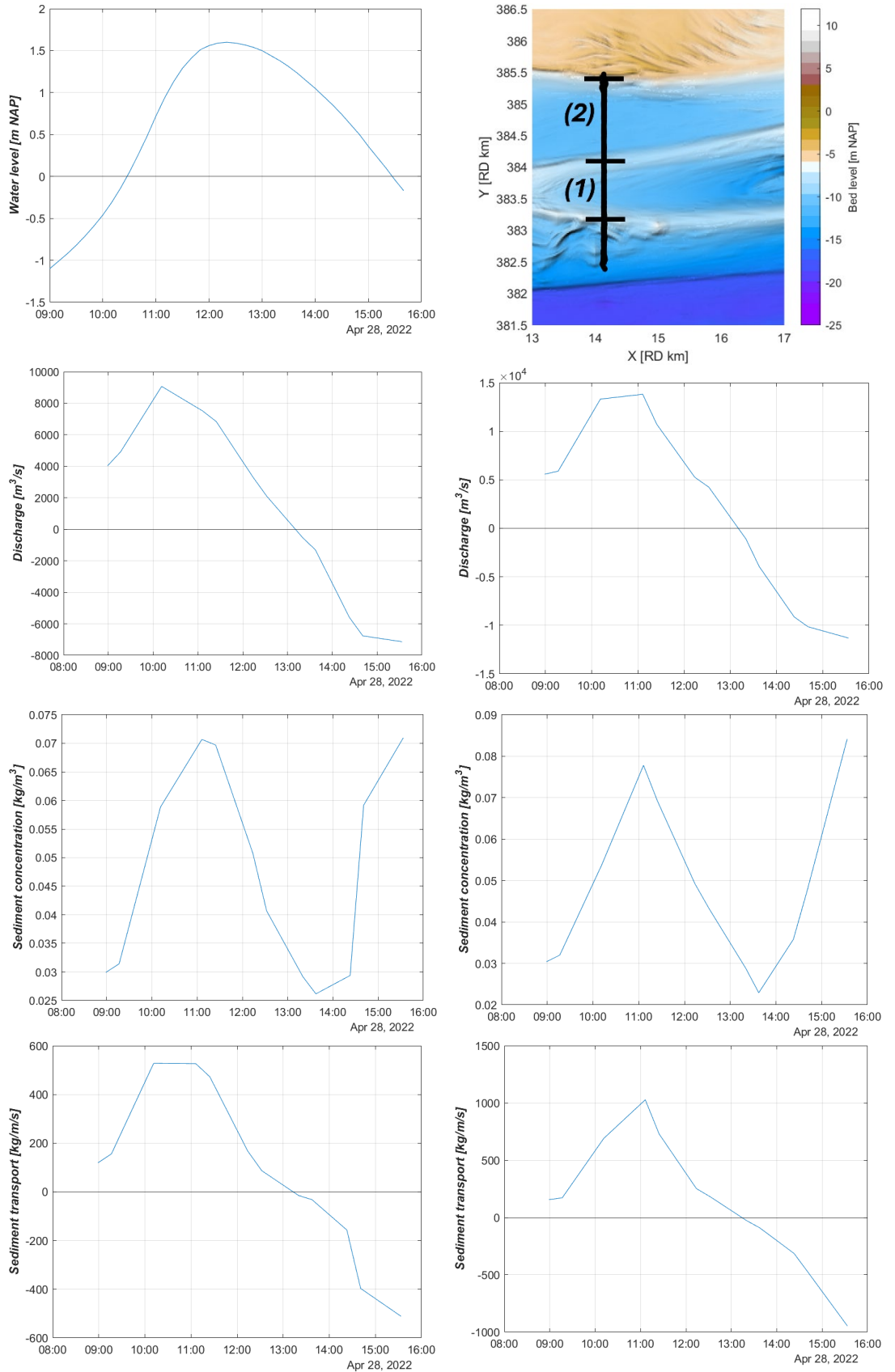
Door de piek vloed- en ebsnelheden te vergelijken, kunnen we iets zeggen over de eb- of vloeddominantie langs deze raai. We gebruiken dezelfde locaties met een interval van 100 m als Figuur 3-8. Dit laat een ruimtelijk variërend beeld zien langs de raai (zie Figuur 3-6). In het uiterste zuiden (km 382,5 tot km 383,2) valt de raai in de Wielingen met een duidelijk vloeddominant karakter. Tussen km 383,2 en km 384,1 valt de raai in het einde van de ebschaar, er is hier geen duidelijk eb- of vloeddominant karakter te onderscheiden. Tussen km 384,1 en km 385,4 valt de raai in de Spleet en hier zijn de vloodsnelheden over het algemeen net wat groter dan de ebsnelheden. Ondanks dat de pieksnelheden een indicatie zijn voor eb- en vloeddominantie, zijn er twee grote onzekerheden bij deze meetraai. Ten eerste is niet de volledige getijcyclus bemeten, waardoor de piek eb snelheid gemist kan worden. Ten tweede is deze raai 12 keer gemeten in 8 uur, wat ongeveer 1 datapunt per 40 minuten geeft. Hierdoor zouden pieken gemist kunnen worden tijdens het 40 minuten interval.



Figuur 3-9: Vloed- en ebdominantie bepaald door de maximale dieptegemiddelde vloodsnelheid te delen door de maximale dieptegemiddelde ebsnelheid.

De volgende analyses gaan over de raai-gemiddelde resultaten. Een overzicht van de raai-gemiddelde resultaten is weergegeven in Figuur 3-10. Hierbij is de raai opgedeeld in twee delen die corresponderen met het deel van de raai dat de ebschaar doorkruist en het deel van de raai dat de Spleet doorkruist, de grenzen zijn hetzelfde als voor Figuur 3-9. Het debiet door de ebschaar is kleiner dan het debiet door de Spleet, dit komt mede doordat de raailengte kleiner is. Op basis van de debietcurves kunnen we concluderen dat het piek vloeddebiet goed binnen de tijdserie valt en het piek ebdebiet waarschijnlijk plaatsvond op of vlak na de laatste tijdstep. Er is al een afname in de richtingscoëfficiënt te zien van de debietcurve, wat erop duidt dat het piekdebiet (bijna) is bereikt. Het piek vloeddebiet is voor beide raaien groter dan het piek ebdebiet.

De sedimentconcentraties zijn hoger bij hogere snelheden (debieten) en variëren als raai-gemiddelde waarden tussen de 20 en 90 mg/l (0,02-0,09 g/l), dit zijn relatief lage concentraties die dicht bij de achtergrondwaarden komen. De maximale sedimentconcentraties zijn tijdens eb en vloed ongeveer even hoog en vinden plaats rond de piekdebieten. De sedimenttransporten worden berekend door de diepte gemiddelde snelheden te vermenigvuldigen met de diepte gemiddelde concentraties en die vervolgens te sommeren voor de gehele raai. In beide gevallen leiden de hogere vloed debieten tot een groter maximaal sedimenttransport tijdens vloed dan tijdens eb.



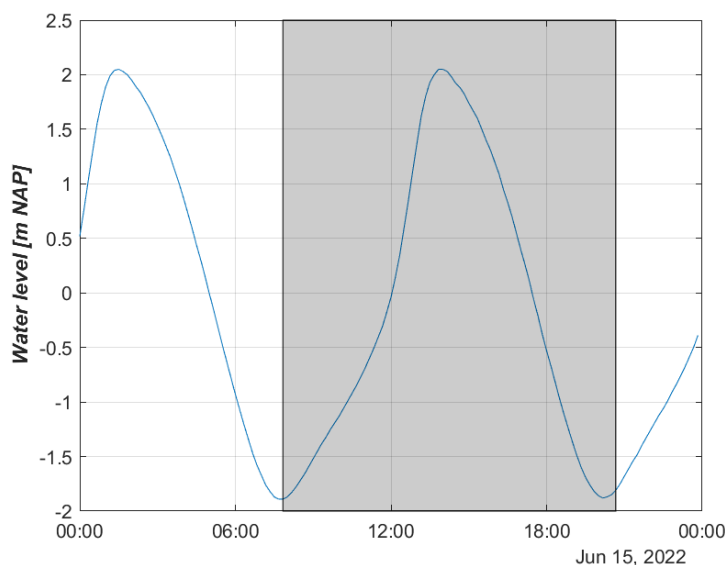
**Figuur 3-10: Raagemiddelde debieten, sedimentconcentraties en sedimenttransporten voor twee delen van raai 3. Deel (1) is de ebschaar waarvan de resultaten links zijn gepresenteerd en deel (2) is de vloedschaar de Spleet waarvan de resultaten rechts zijn gepresenteerd.**

### 3.2.2 Hydrodynamica en sedimenttransport raai 3

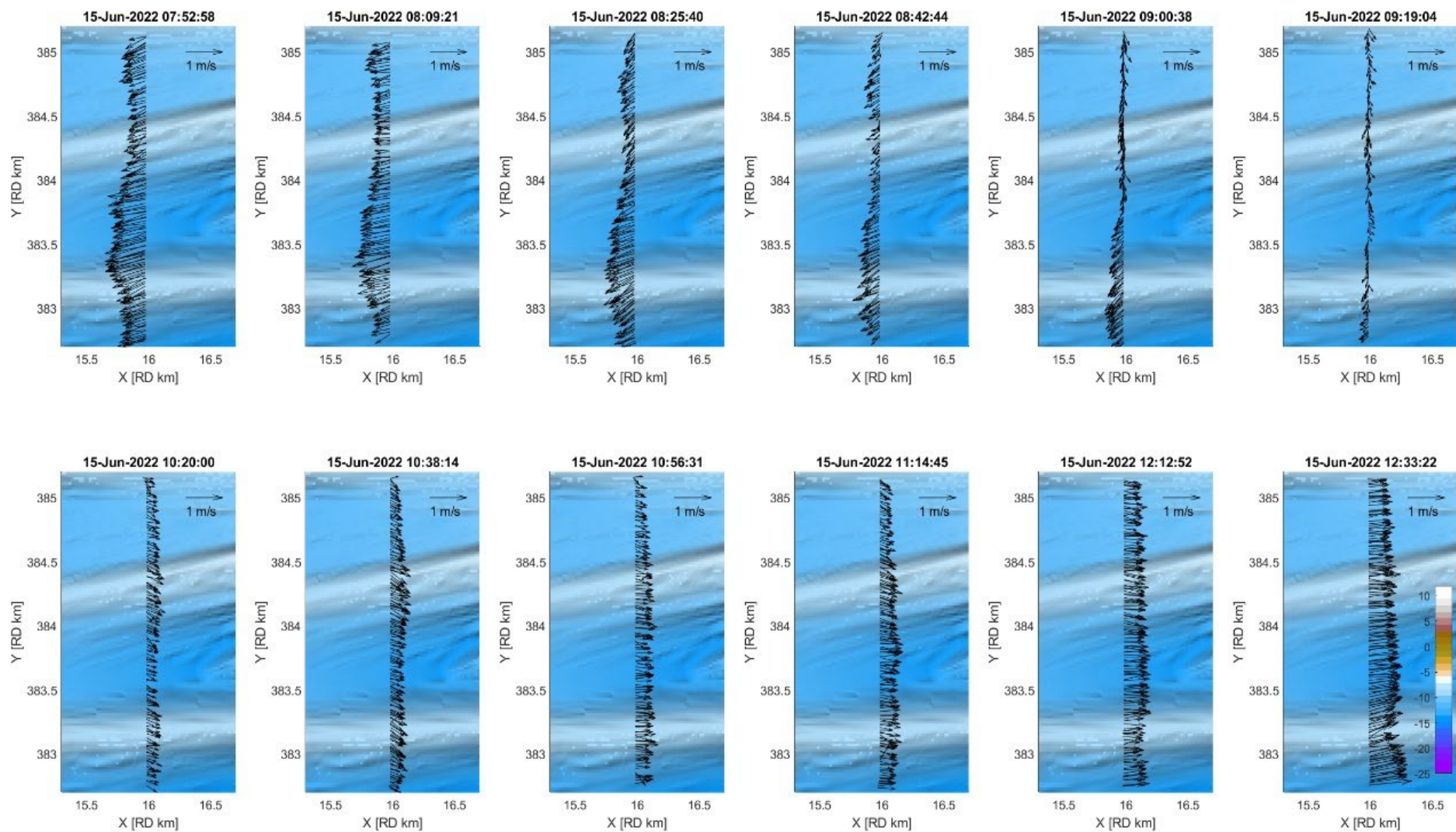
De locatie van raai 3 is weergegeven in Figuur 2-6 en is 27 keer bemeten gedurende 13 uur. De meting begon tijdens laag water (-1,8 m NAP) en de getijslag was ongeveer 4 m tijdens het gemeten getij. De getijslag is iets hoger dan tijdens het meten van raai 2 (zie Figuur 3-5) en vergeleken met de getijslag bij station Vlake van de Raan is deze meting tijdens springtij condities gevaren. De gemiddelde windsnelheid tijdens deze meetcampagne was ongeveer 6 m/s (4 Beaufort; matig) en de wind kwam uit noordnoordoostelijke richting (30°).

Figuur 3-12, Figuur 3-13 en Figuur 3-14 laten de diepte gemiddelde snelheid zien voor elk van de gemeten keren. De snelheden zijn over het algemeen westelijk gericht (tijdens eb) of oostelijk (tijdens vloed). De meting begint tijdens eb rond 07:52 waarna de snelheden afnemen tot de kentering van het getij om 09:19. Hierna nemen de snelheden in vloedrichting (oosten) toe tot pieksnelheden rond 12:52, waarna de snelheden weer afnemen tot de kentering van het getij om 15:33. De meting gaat de tweede eb-periode in en de snelheden nemen toe tot ongeveer 19:43 waarna deze weer afnemen tot het einde van de meting om 20:35.

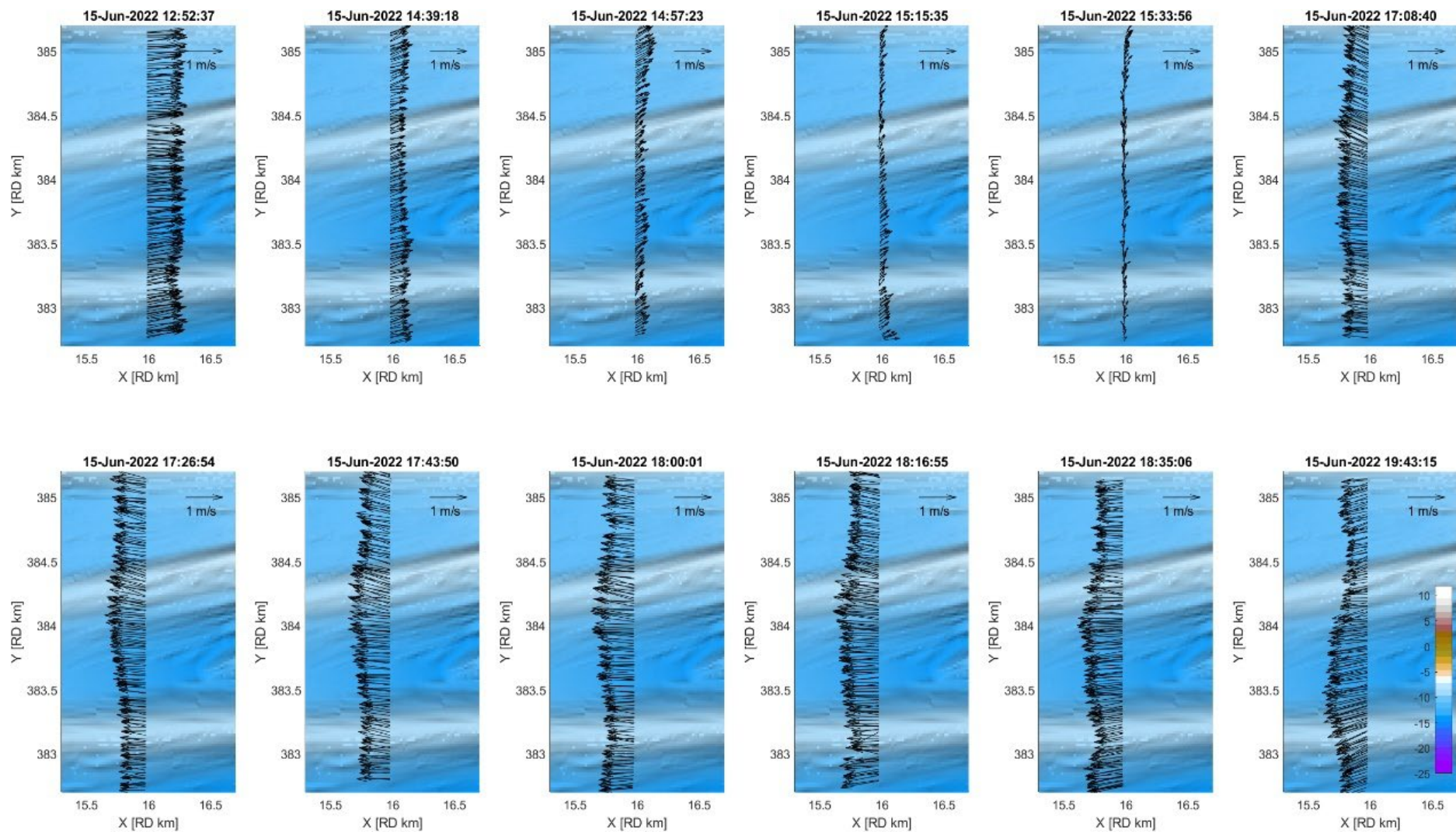
De 3D stromingsprofielen van Figuur 3-15 laten vergeleken met Figuur 3-7 iets meer variëteit zien in richting dan de stromingsvectoren van raai 2, maar de eb en vloedrichtingen zijn duidelijk te onderscheiden. Tijdens vloed zijn de vectoren oostwaarts gericht en tijdens eb westwaarts. Over het algemeen nemen de snelheden af naar de bodem. Tijdens kentering van het getij (Figuur 3-15b) zijn de snelheden kleiner en neemt de variabiliteit in richting toe, dit was ook te zien voor raai 2.



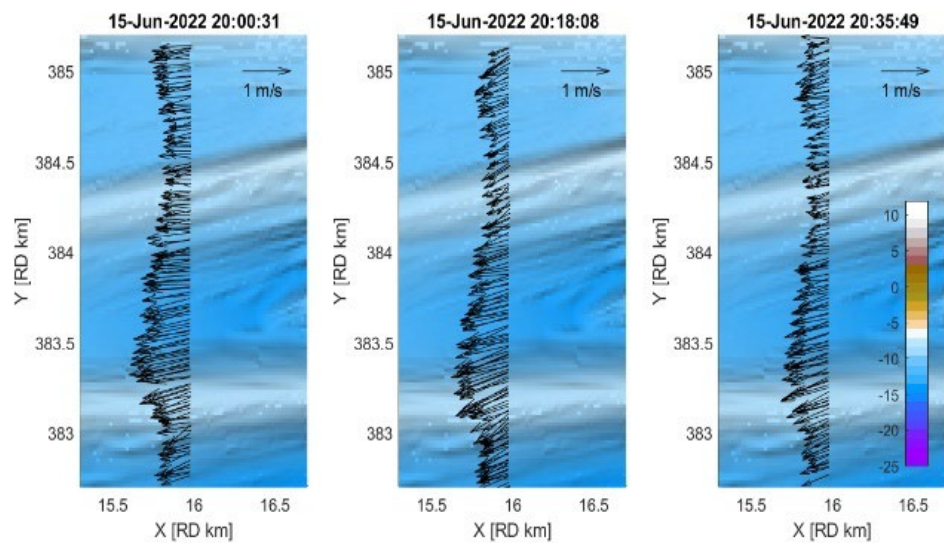
Figuur 3-11: Waterstanden op meetstation Vlake van de Raan tijdens meetcampagne (zwarte blok) van raai 3.



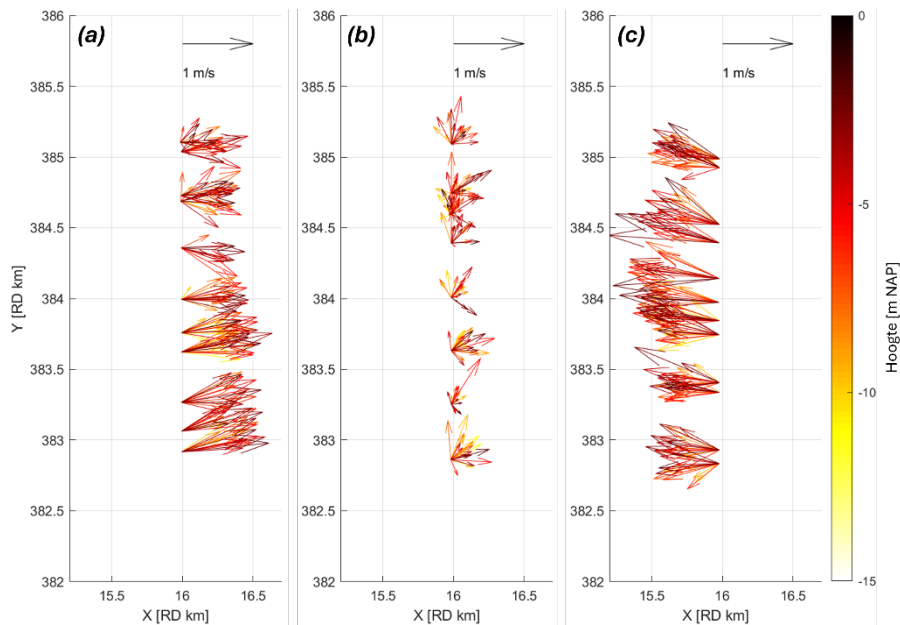
Figuur 3-12: Dieptegemiddelde snelheden van raai 1 tot 12 voor debietraai 3.



Figuur 3-13: Dieptegemiddelde snelheden van raai 13 tot 24 voor debietraai 3.



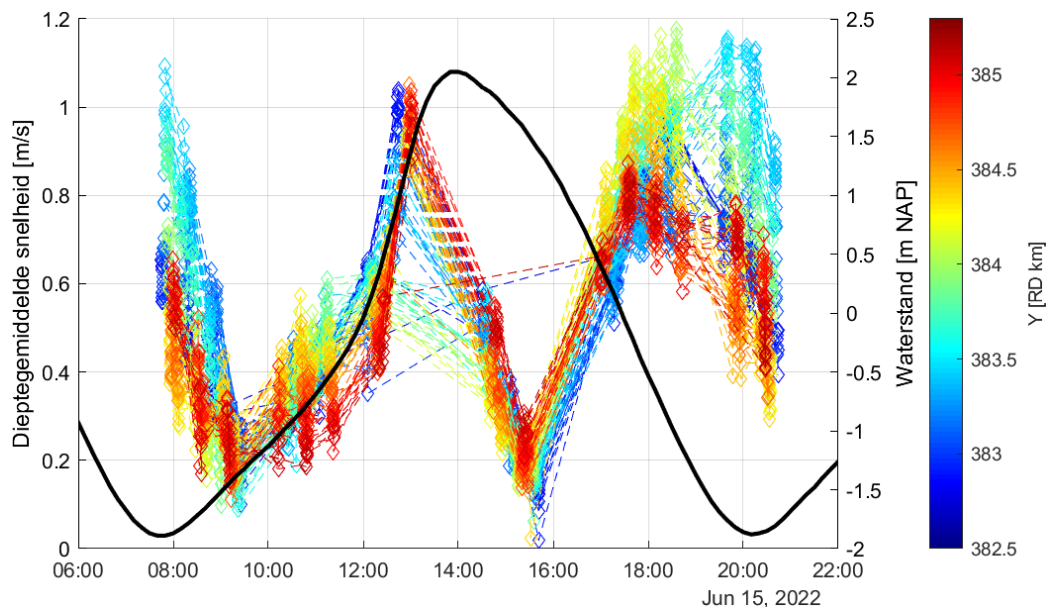
Figuur 3-14: Dieptegemiddelde snelheden van raai 25 tot 27 voor debietraai 3.



**Figuur 3-15:** snelheidsvectoren voor raai (a) tijdens de vloedpiek (12:12), (b) tijdens kentering van het getij (15:15) en (c) tijdens ebpiek (17:43).

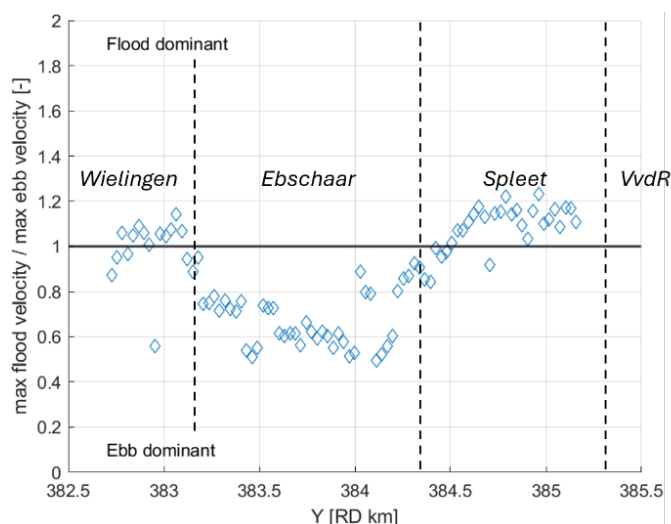
Net zoals voor raai 2, is er voor raai 3 een tijdserie gemaakt op basis van dieptegemiddelde stroomvectoren die dicht bij elkaar liggen. Voor locaties langs raai 3 met een interval van 100 m worden de punten, die binnen 10 m van elkaar liggen samengevoegd tot één tijdserie. De kleur van de tijdserie hangt af van de positie langs de raai, blauw is zuidelijk en rood is noordelijk. Tussen de start van de metingen ( $\pm 09:00$ ) en  $\pm 11:00$  zijn de stromingen ebgericht, waarna tussen  $\pm 11:00$  en  $\pm 16:00$  de stromingen vloedgericht zijn. Tussen 13:00 en 14:30 is er een periode zonder metingen, helaas valt dit net samen met de pieksnelheden van het getij. Hierdoor zouden de pieksnelheden tijdens vloed in de vervolganalyses onderschat kunnen worden. Na  $\pm 16:00$  zijn de metingen tot het einde weer ebgericht ( $\pm 21:00$ ).

De piekvloedsnelheden vinden voor alle locaties plaats rond 13:00, en de snelheid is ongeveer even groot voor de verschillende locaties. Voor de piek ebsnelheden is een duidelijk verschil te zien met de locatie van de raai. Ebsnelheden in de ebschaar (lichtblauwe tot groene ruiten) zijn duidelijk groter dan de eb snelheden in de Spleet (rode ruiten). Ook is de timing van de piek ebsnelheid verschillend langs de raai, voor lichtblauwe ruiten vindt deze plaats rond 20:00 terwijl die voor de rode ruiten rond 18:00 plaatsvindt.



Figuur 3-16: Tijdsree voor locaties met een interval van 100 m langs raai 3. In kleur is het snelheidsverloop over tijd weergegeven, de zwarte lijn laat de waterstand zien van station Vlake van de Raan.

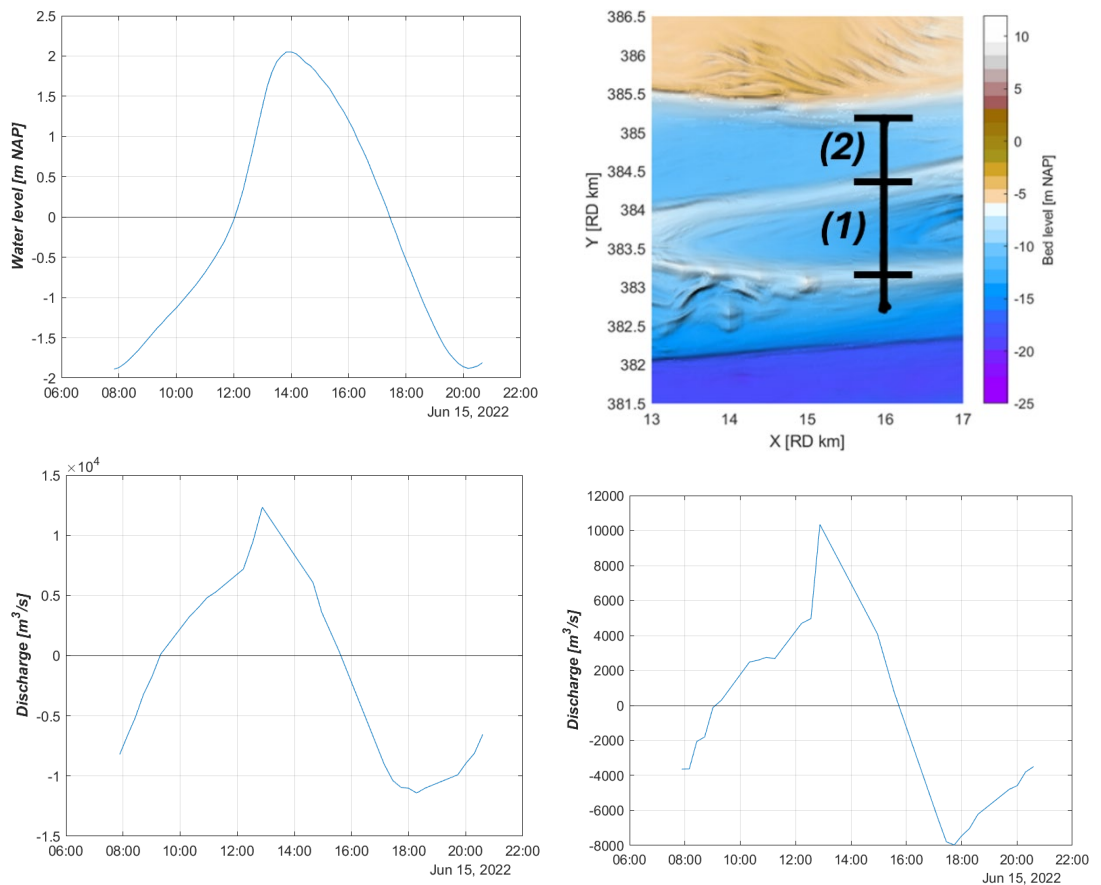
Omdat deze raai voor een volledige getijdencyclus is gemeten, weten we dat we de piek eb- en vloedsnelheden beide vangen in het meetbereik. In deze 13 uur is er ongeveer 27 keer gemeten, wat een tijdsinterval van 1 meting per 30 minuten geeft. Helaas is er een langere periode zonder metingen tussen 13:00 en 14:30 waarin de piek vloedsnelheden plaats zouden kunnen vinden. Toch zijn de piek vloedsnelheid en de piek ebsnelheid bepaald om een mogelijke indicatie te krijgen van de eb- of vloeddominantie. Tussen km 383,2 en 384,3 ligt de raai in de ebschaar, hier is volgens de meting een duidelijk ebdominant profiel zichtbaar. Vanaf km 384,3 tot km 385,3 ligt de raai in de Spleet en hier zijn de vloedsnelheden hoger dan de ebsnelheden, wat dit deel van de raai licht vloeddominant maakt. Wanneer we de pieksnelheden vergelijken met raai 2 (Figuur 3-9) zien we een ander beeld. In de ebschaar zijn de ebsnelheden significant hoger dan de piek vloedsnelheden, dit is niet het geval bij raai 2, waar de piek vloed- en ebsnelheden ongeveer gelijk zijn. Het deel van de Wielingen en de spleet is in beide gevallen vloed dominant. Maar de vloed dominantie in de Wielingen is een stuk groter voor raai 2 dan raai 3.

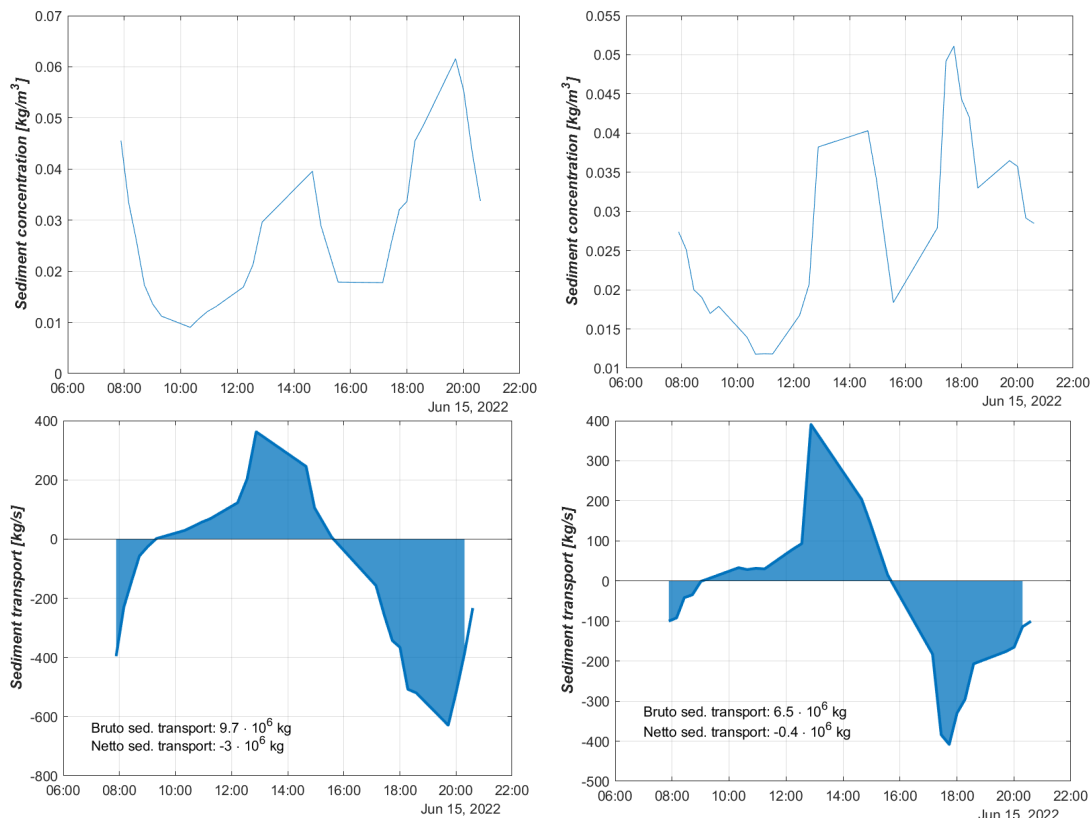


Figuur 3-17: Vloed-eb dominantie bepaald door de maximale dieptegemiddelde vloedsnelheid te delen door de maximale dieptegemiddelde eb snelheid.

Een overzicht van de raai-gemiddelde resultaten is weergegeven in Figuur 3-18, hierbij is de raai opgedeeld in twee delen die corresponderen met het deel van de raai dat de ebschaar doorkruist en het deel van de raai dat de Spleet doorkruist, de grenzen zijn hetzelfde als in Figuur 3-17. De debieten van de ebschaar en de spleet laten zien dat het piek vloeddebiet iets groter is dan het piek ebdebiet. Verder hebben de debieten ongeveer een faseverschil van 1,5 uur met de waterstanden, i.e. het piekvloeddebiet vindt 1,5 uur voor hoog water plaats en het piek eb debiet vindt ongeveer 1,5 uur voor laag water plaats. De debieten in de ebschaar zijn in vergelijking met raai 2 hoger, dit komt ook omdat de lengte van de raai die de ebschaar doorkruist groter is. Het piek vloeddebiet is hier 13000 m<sup>3</sup>/s terwijl dit voor raai 2 rond de 9000 m<sup>3</sup>/s lag. Voor de Spleet is dit precies andersom de debieten in raai 2 zijn hoger dan raai 3. De getijslag tijdens deze meting was ook iets hoger, wat leidt tot een hoger debiet.

De sedimentconcentraties geven ondanks het grillige karakter een duidelijk gedrag weer, met hogere snelheden (debieten) is de sedimentconcentratie ook hoger. De maximale sedimentconcentratie is hoger tijdens eb dan tijdens vloed voor de ebschaar en de Spleet en de concentraties liggen lager dan voor raai 2. Over het algemeen zijn de gemiddelde concentraties 10 tot 70 mg/l (0,01-0,07 kg/m<sup>3</sup>). Het is van belang om te benadrukken dat het signaal zo laag is dat meeton nauwkeurigheden en andere effecten invloed kunnen hebben op de resultaten. Ondanks dat de vloeddebieten hoger zijn dan de ebdebieten is door het concentratieverschil het maximale sedimenttransport tijdens eb groter dan tijdens vloed voor beide delen van de raai. Dit concentratieverschil tussen eb en vloed bepaalt feitelijk de netto sedimentrichting. Dit resulteert in een bruto sedimenttransport van ongeveer 10 miljoen kg per getij door de ebschaar en 6 miljoen kg per getij door de vloedschaar. De netto transporten zijn ebgericht voor de ebschaar met 3 miljoen kg/getij. Voor de vloedschaar zijn de netto sedimenttransporten ook ebgericht, maar dit verschil is niet zo groot en subtieler (0,4 miljoen kg/getij).





Figuur 3-18: Raaigemiddelde debieten, sedimentconcentraties en sedimenttransporten voor twee delen van raai 3. Deel (1) is de ebschaar waarvan de resultaten links zijn gepresenteerd en deel (2) is de Spleet waarvan de resultaten rechts zijn gepresenteerd.

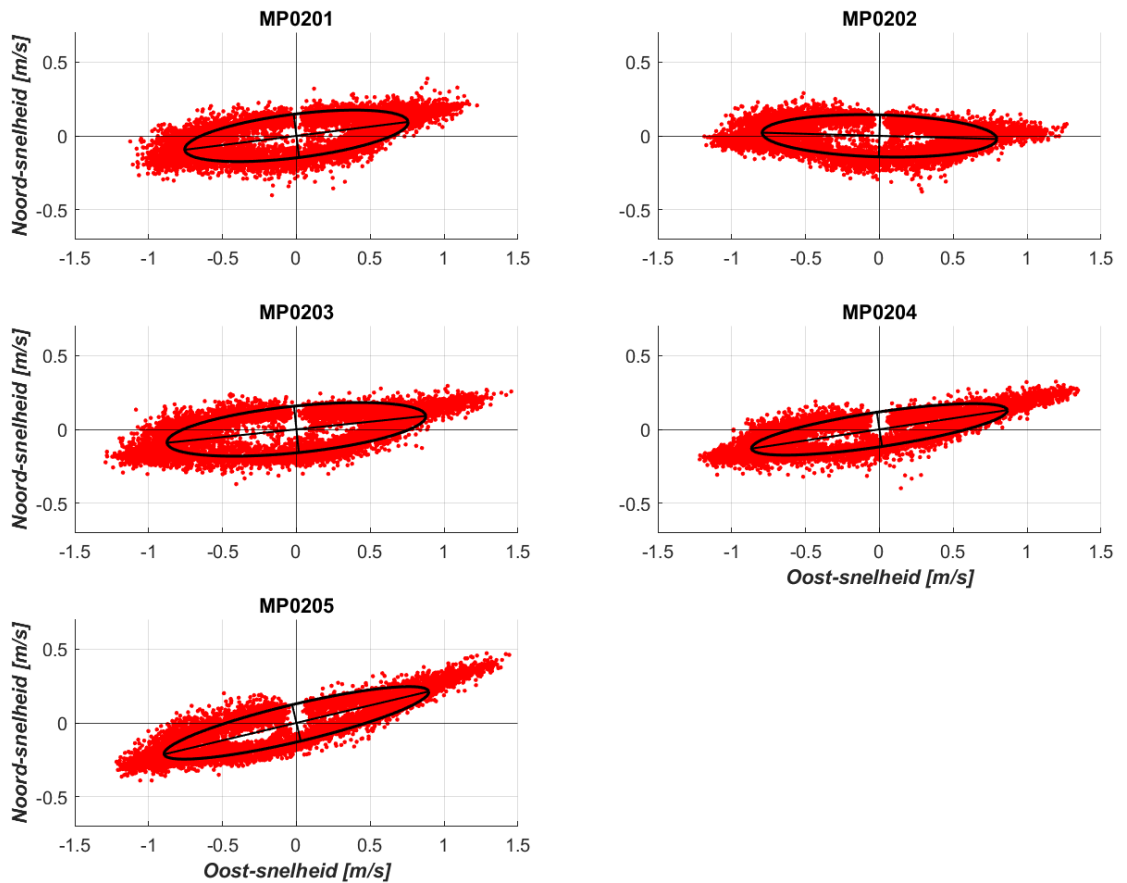
### 3.3 ADCP frames

Deze sectie presenteert de resultaten van de meetframes. Ter verificatie is in Appendix B geanalyseerd of het missen van snelheidsdata bij de bodem gevolgen heeft voor de dieptegemiddelde snelheid. Dit levert een kleine overschatting op van de dieptegemiddelde snelheid, maar is dermate klein dat het de conclusies in deze sectie niet verandert.

#### 3.3.1 Hydrodynamica meetframes ebschaar

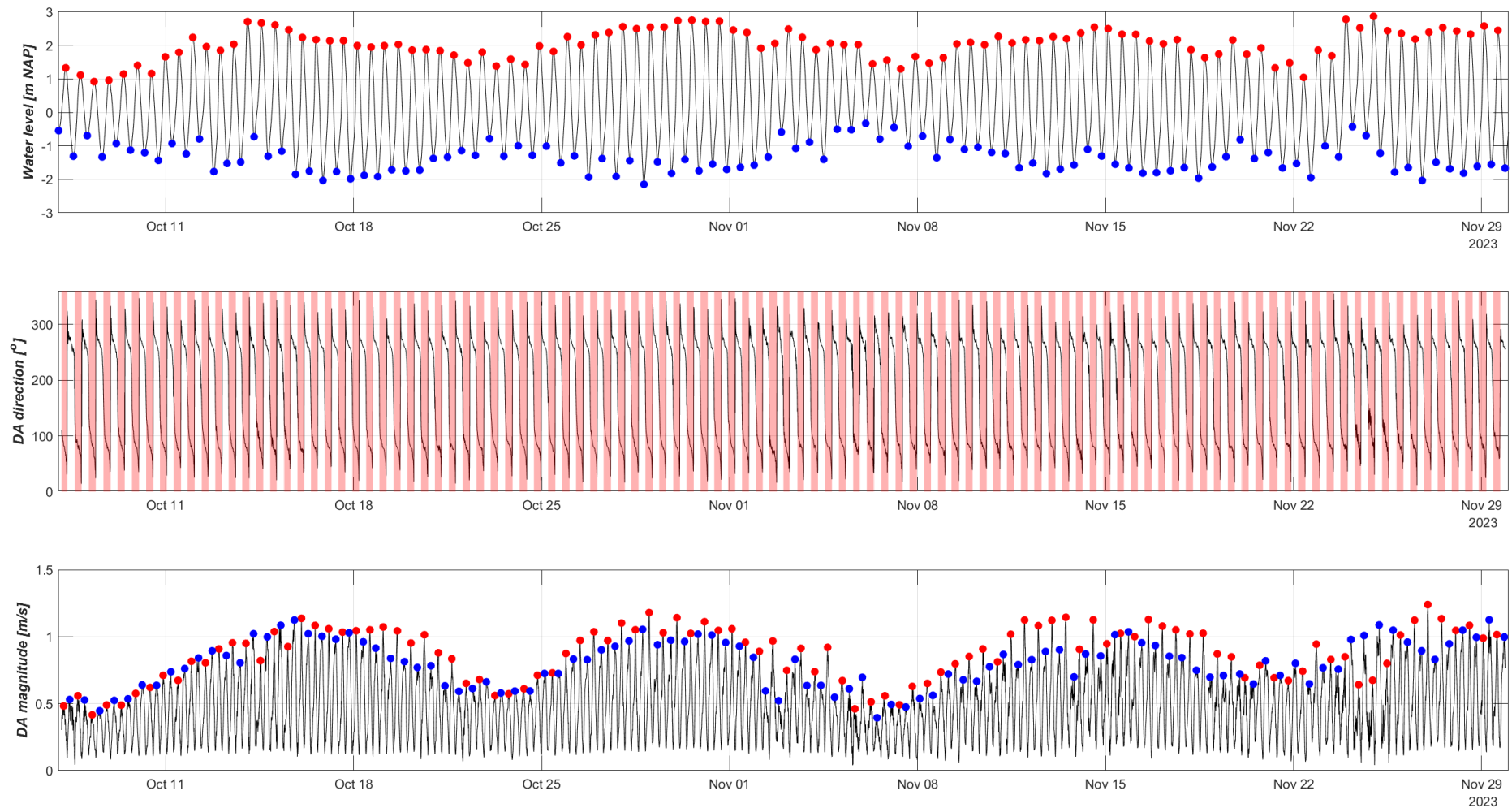
Er zijn 5 ADCP frames geplaatst in de ebschaar om snelheden te meten. Figuur 2-7 geeft de locaties van de verschillende frames weer; ze staan allemaal ongeveer in het midden (diepste) gedeelte van de ebschaar. De frames hebben van 6 oktober 2023 tot 30 november 2023 snelheden gemeten. Deze periode bevat drie volledige spring-doodtij cycli. Figuur 3-19 laat voor elk van de meetframes de Oost-West gerichte snelheid zien uitgezet tegen de Noord-Zuid gerichte snelheid. De dominante vloedrichting is naar het oosten gericht en de dominante eb-richting naar het westen. De Oost-West snelheid is significant groter dan de Noord-Zuid snelheid. Verder is voor elk frame de maximale snelheid richting het oosten groter dan de maximale snelheid richting het westen, wat al aangeeft dat oostelijke (vloed-gerichte) momenten de hoogste snelheid hebben.

Op basis van de twee snelheidscomponenten kan een ellips gefit worden door de data, dit wordt gedaan op basis van de covariantie tussen de twee snelheidscomponenten, zie Rashid et al. (2022) voor meer informatie. Het belangrijkste resultaat van deze analyse is de hoek die de ellips maakt t.o.v. de y-as. Met behulp van deze hoek kunnen alle snelheidspunten opgesplitst worden in vloedgerichte en ebgerichte punten.



Figuur 3-19: Spreidingsdiagram van de Noord-Zuid en Oost-West snelheid voor de vijf meetframes in de ebschaar. In zwart de berekende getij-ellips per meetframe.

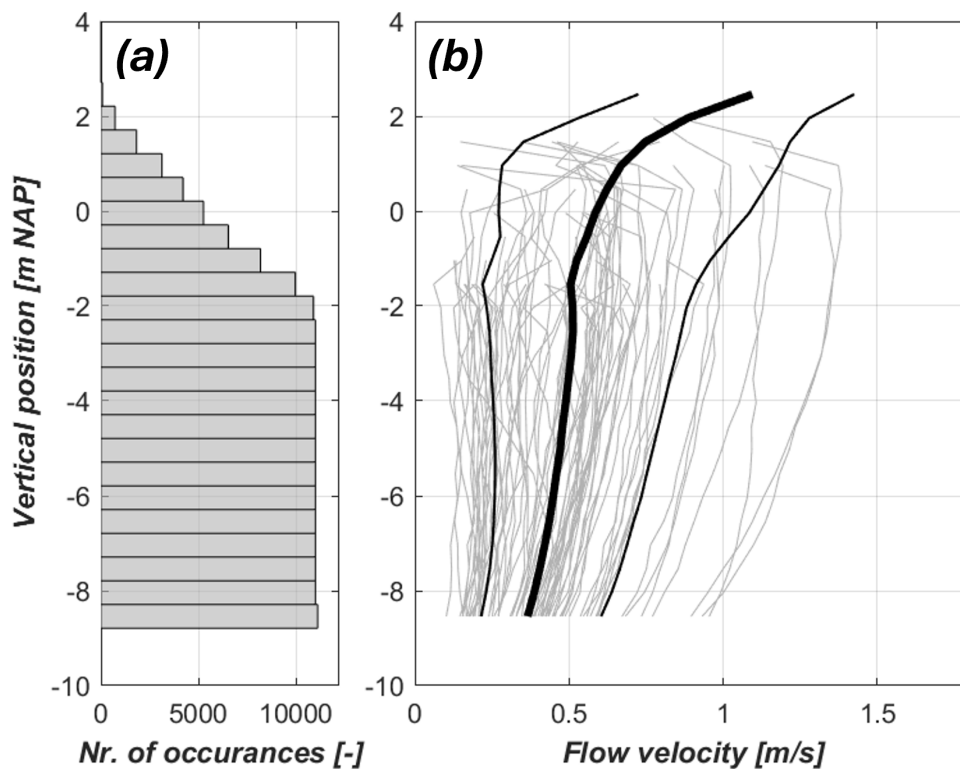
De berekende waterstanden volgens de M2-reductiemethode samen met de dieptegemiddelde richting en snelheid is weergegeven in Figuur 3-20 voor frame MP0201, de andere frames zijn te vinden in Appendix C. De eb- en vloedperiode is gesplitst op basis van de getij-ellipsen. Voor elk van de meetframes is de maximale eb- en vloedsnelheid bepaald. Ook is de maximale en minimale waterstand bepaald voor de meetperiode.



Figuur 3-20: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0201 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0201. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.

De tijdseries van Figuur 3-20 en Appendix C laten ongeveer hetzelfde gedrag zien voor elk van de frames. Er is een duidelijke vloedrichting ( $\pm 90^\circ$ ; oostelijk) en ebrichting ( $\pm 270^\circ$ ; westelijk). Tijdens springtij zijn de pieksnelheden tijdens eb én vloed hoger dan tijdens doortij. De maximale snelheden verschillen per frame, voor MP0201 en MP0202 ligt de maximale snelheid op ongeveer 1,2 m/s, terwijl de frames die oostelijker liggen (MP0203 tot MP0205) een hogere maximale snelheid hebben tot 1,5 m/s. Het faseverschil tussen de snelheden en waterstanden is ongeveer 1 tot 1,5 uur, i.e. het tijdsverschil tussen piek vliedsnelheid en hoog water en piek ebsnelheid en laag water. Over het algemeen zijn de piek vloedsnelheden net iets groter dan de piek ebsnelheden, wat bijzonder is voor een ebschaar, Paragraaf 3.3.3 gaat hier verder op in.

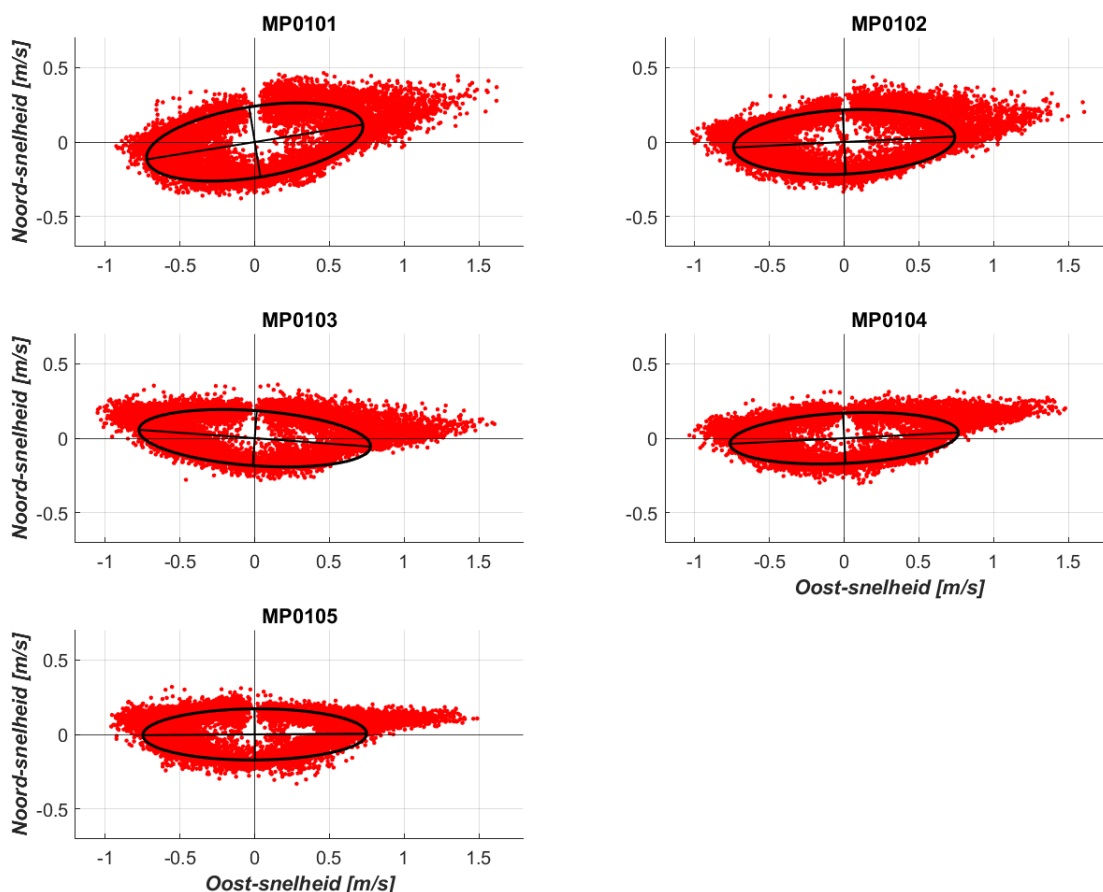
De meetframes meten snelheden voor de gehele verticaal, die worden gemiddeld over de diepte (zie Appendix A). Figuur 3-21 laat het volledige snelheidsprofiel zien over de verticaal voor meetframe MP0201, deze figuren zijn ook beschikbaar voor de andere meetframes, maar geven geen nieuwe informatie. In Figuur 3-21a is het aantal metingen per diepteklasse weergegeven, deze nemen af vanaf -2 m NAP, dit komt door het verschil in hoog en laag water. Het gemiddelde snelheidsprofiel in Figuur 3-21b laat zien dat over het algemeen de snelheden bij de bodem het laagst zijn en toenemen tot -2 m NAP. Na de laagwaterstand zien we snelheden toenemen bij het wateroppervlak. Dit kan een fysische oorzaak hebben, bijvoorbeeld door wind gegenereerde stroming of Stokes drift door de aanwezigheid van golven. Maar dit kan ook door extra reflectie van het wateroppervlakte komen, wat een overschatting van snelheden kan veroorzaken of een bias door de weinige metingen die tijdens vloed bij hoogwater zijn gedaan.



Figuur 3-21: 3D snelheidsmagnitudeprofiel voor meetframe MP0101. (a) histogram van het aantal metingen per diepteklasse. (b) 3D snelheidsprofiel voor de snelheidsmagnitude van individuele metingen (grijs), het 50-percentiel als proxy voor het gemiddelde snelheidsprofiel (zwarte dikke lijn) en het 25- en 75-percentiel voor de spreiding van de snelheidsmetingen.

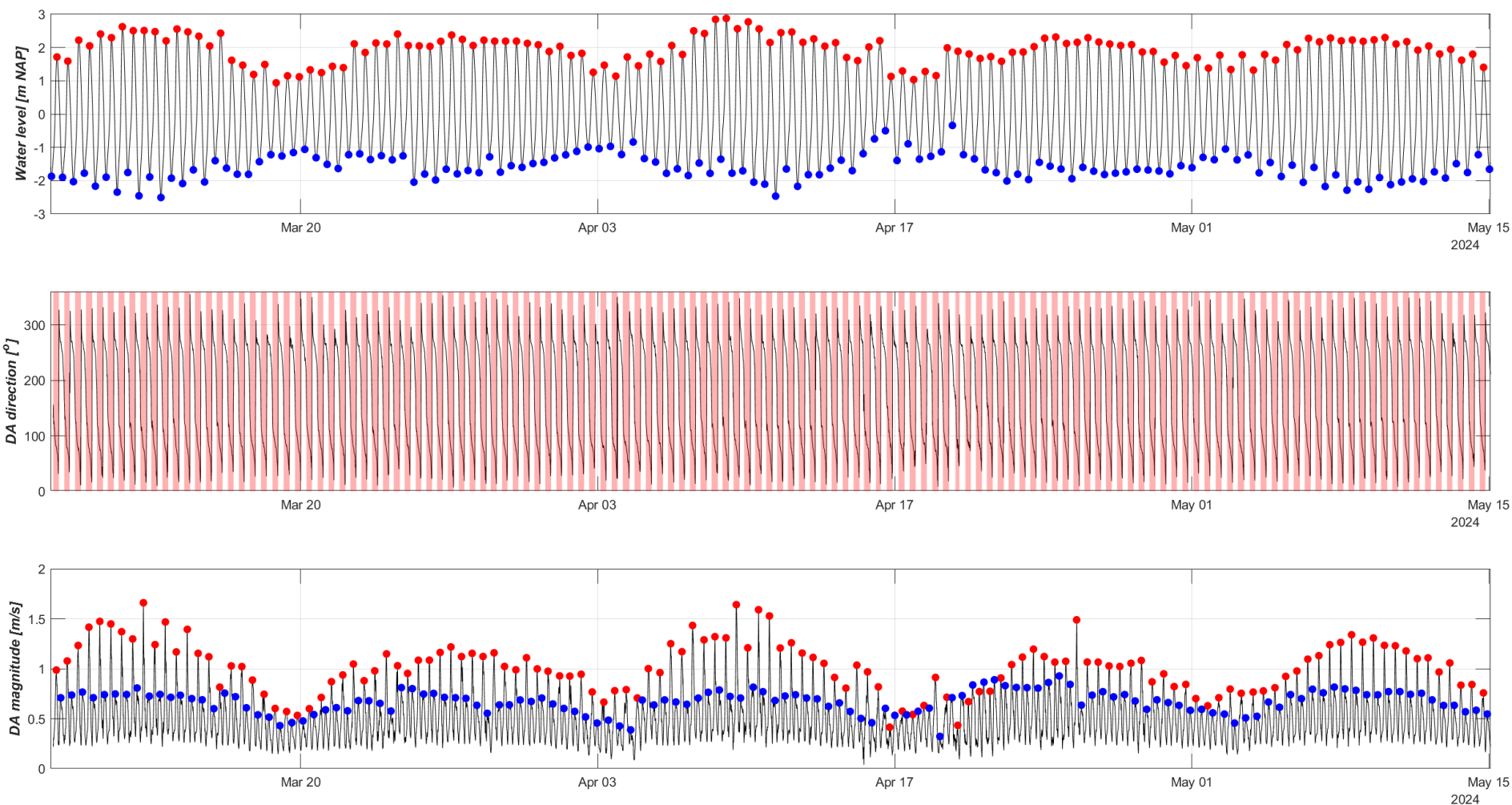
### 3.3.2 Hydrodynamica meetframes vloedschaar

De tweede meetserie die wordt geanalyseerd in dit rapport, beslaat een meetserie van 5 ADCP frames in de Spleet, zie Figuur 2-7 voor de exacte locaties. De frames stonden meer dan twee maanden in het water, van 6 maart 2024 tot 21 mei 2024 (meetdata tot 15 mei 2024). Figuur 3-22 geeft de spreiding van de Noord-Zuid snelheidscomponent en de Oost-West snelheidscomponent weer. Snelheid gericht naar het oosten correspondeert met vloedrichting en het westen met de ebrichting. Hieruit komt direct naar voren dat snelheden in oostelijke richting (snelheden tot 1,5 m/s) hoger zijn dan snelheden in westelijke richting (snelheden tot 1 m/s). Net zoals bij de meetserie in de ebschaar wordt er gebruik gemaakt van getij-ellipsen om de punten op te splitsen in vloed- en ebrichting.



Figuur 3-22: Spreidingsdiagram van de Noord-Zuid en Oost-West snelheid voor de vijf meetframes in de Spleet. In zwart de berekende getij-ellips per meetframe.

De volledige meettijdserie wordt voor elk van de frames gepresenteerd in Figuur 3-23 voor MP0101, de andere meetframes zijn te vinden in Appendix D. Het faseverschil tussen de metingen en de waterstanden ligt tussen de 1 en 1,5 uur, i.e. het tijdsverschil tussen piek vliedsnelheid en hoog water en piek ebsnelheid en laag water. De getijslag is tijdens doortij ongeveer 3 m en stijgt tijdens springtij naar 4,5 m. De piek vloed-snelheden zijn over het algemeen significant hoger dan de piek ebsnelheden. Het verschil tussen de piek vloed-snelheden en piek ebsnelheden is over het algemeen groter tijdens springtij dan doortij. Tijdens doortij is soms de piek ebsnelheid hoger dan de piek vloed-snelheid.



Figuur 3-23: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0101 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0101. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.

### 3.3.3 Eb- en vloeddominantie

Op basis van de gemeten snelheden van de meetframes kunnen er conclusies over piek eb- en vloedsnelheden worden getrokken. Figuur 3-25 geeft een overzicht van de eb/vloed dominantie, bepaald door de piek vloedsnelheid van een getij te delen door de bijbehorende piek ebsnelheid. Het midden van Figuur 3-25 geeft de gemiddelde waarde weer voor elk van de frames. Het is belangrijk om te realiseren dat de tijdserie van de twee meetcampagnes verschillen, de frames in de Spleet stonden in het voorjaar van 2024, terwijl de frames in de ebschaar aan het eind van 2023 hebben gemeten.

De gemiddelde waarde voor de verhouding tussen de piek vloedsnelheid over de piek ebsnelheid fluctueert voor de verschillende meetframes in de Spleet tussen de 1,25 en 1,55. Dat betekent dat over het algemeen de piek vloedsnelheden 25 tot 55% hoger zijn dan de piek ebsnelheden, wat een duidelijk verschil is. Wanneer we beter kijken naar de tijdseries (Figuur 3-25 – boven), zien we dat voor bijna de gehele periode de piek vloedsnelheid hoger is dan de piek ebsnelheid. De enkele getijden wanneer dit niet het geval is, vinden plaats tijdens rond 19 april en 21 maart. Dit vindt plaats wanneer het doortij is.

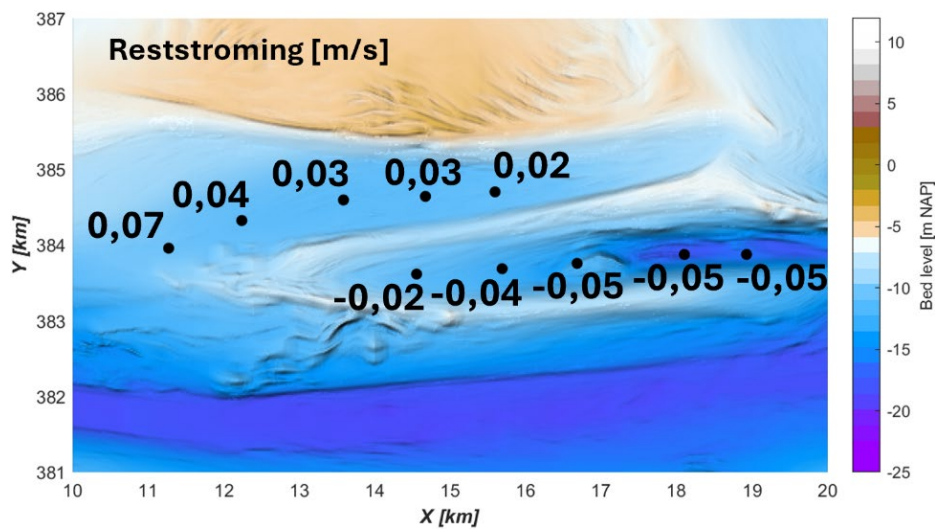
In de ebschaar is de gemiddelde verhouding tussen de piek vloedsnelheden ook hoger dan de piek ebsnelheden, dit is tegen het natuurlijk gedrag in van een ebschaar die over het algemeen duidelijk ebdominant zijn. En dit is tegengesteld aan wat de ADCP raai 3 liet zien voor de ebschaar, met duidelijk hogere piek ebsnelheden dan piek vloedsnelheden. De gemiddelde waarde voor de piek vloedsnelheid over de piek ebsnelheid ligt wel lager dan in de Spleet, de waardes variëren voor de meetframes tussen de 1,06 en 1,12. Dit betekent dat de piek vloedsnelheden gemiddeld 6 tot 12% hoger zijn dan de piek ebsnelheden. Wanneer we kijken naar de tijdseries (Figuur 3-25 – onder) zien we dat over tijd de verhouding ook regelmatig onder de 1 valt, wat betekent dat de ebsnelheid hoger is dan de pieksnelheid.

Om een beter inzicht te verkrijgen in de processen die een belangrijke rol spelen voor de eb- en vloeddominantie in het geulensysteem vergelijken we de verhouding tussen de piek eb- en vloedsnelheid met de getijslag (zie Figuur 3-26). Hieruit kunnen we concluderen dat er voor de meetframes in de Spleet een verband is tussen de sterkte van de vloed dominantie en de getijslag (Figuur 3-26 – boven). De correlatiecoëfficiënt tussen de eb/vloed dominantie en de getijslag ligt voor de meetframes in de Spleet tussen de 0,4 en 0,6. Dit is ook te zien in de tijdseries (Figuur 3-23 en Appendix D), het verschil in vloedsnelheid tussen dood- en springtij is veel groter dan het verschil in ebsnelheid. Dat betekent dat de verhouding tussen de piek vloedsnelheid en piek ebsnelheid (oftewel vloeddominantie) ook toeneemt met de getijslag. Voor de meetframes in de ebschaar is dit verband veel minder goed zichtbaar. De correlatiecoëfficiënten voor frame MP0201 tot MP0203 ligt tussen de 0,04 en 0,16. Dit zien we ook terug in de tijdseries, ook tijdens een hoge getijslag kan soms de ebsnelheid hoger liggen dan de vloedsnelheid. Voor frame MP0204 en MP0205, de twee frames waar de ebschaar wat dieper is, is het verband weer iets sterker met een correlatiecoëfficiënt van ongeveer 0,4. Maar voor de frames in de ebschaar geldt dat er meer getijden zijn waarvoor de piek ebsnelheid hoger is dan de piek vloedsnelheid en deze vinden soms ook plaats bij een hogere getijslag.

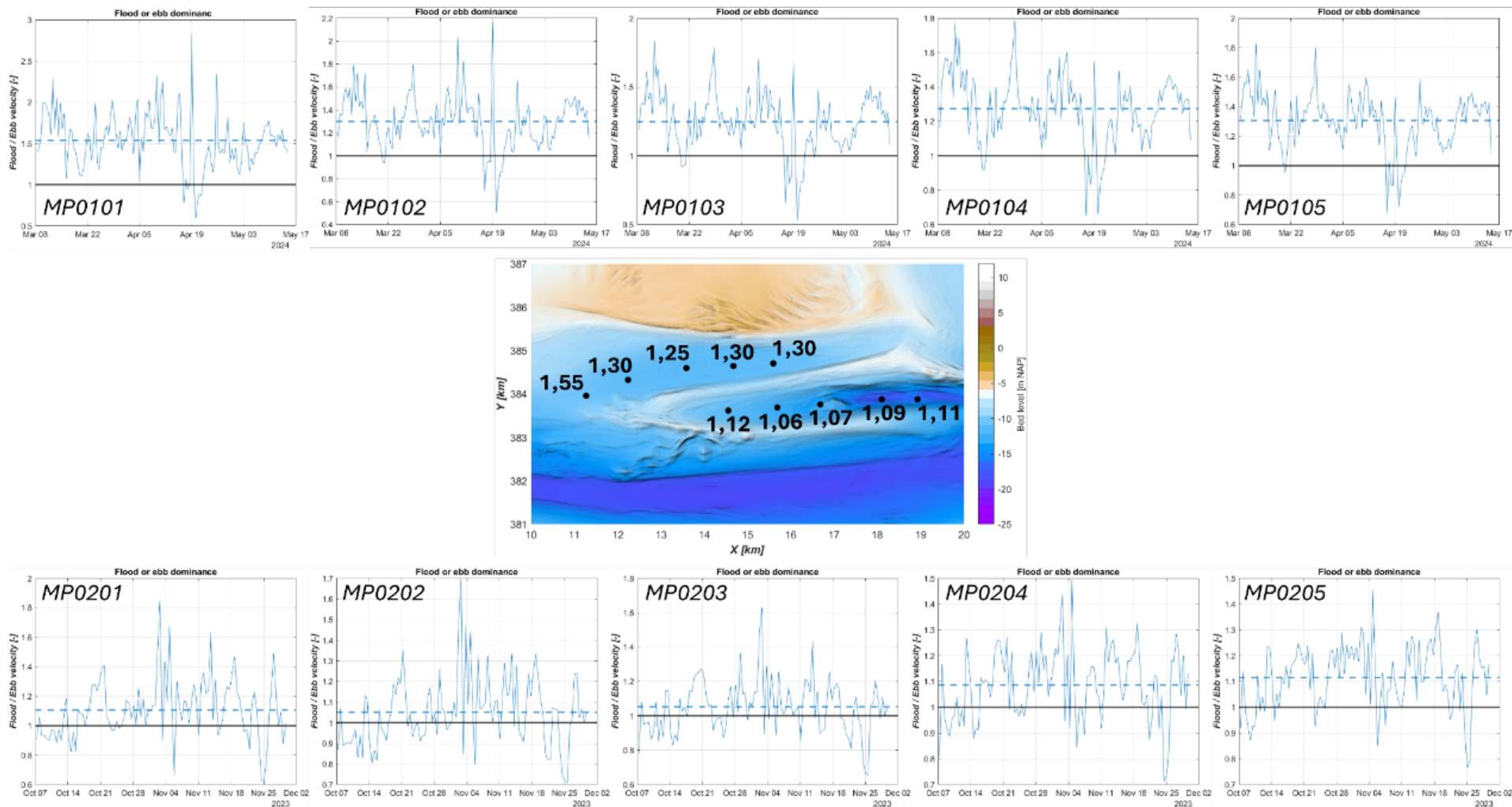
Om nog verder te analyseren wat de reden kan zijn van de ebdominantie voor de ebschaar wordt er een vergelijking gemaakt met waterstandsopzet en windrichting en -snelheid. Vanuit station Vlake van de Raan weten we dat sterke wind uit het westen tot noorden kan leiden tot waterstandsopzet in de Schelde-monding, zie Paragraaf 3.1. Op basis van de waterstanden wordt met  $t_{tide}$  (Pawlowicz et al., 2002) de waterstandsopzet bepaald en gecorrigeerd aan de eb- en vloeddominantie, zie Figuur 3-27. De kleur van de bollen is de 3-uurs gemiddelde windrichting en de grootte geeft de 3-uurs gemiddelde windsnelheid weer. Op deze manier kan de eb/vloed dominantie vergeleken worden met meteorologische condities. We zien in beide

gevallen dat een hoge waterstandsopzet vaak samenvalt met wind uit het Westen tot Noordwesten. In de Spleet vinden we correlaties tussen de -0,02 en -0,14 voor de relatie tussen de eb/vloed dominantie en de waterstandsopzet. Hieruit kunnen we concluderen dat er geen directe correlatie is tussen deze twee variabelen. In de ebschaar is het gedrag anders, voor de meetlocaties MP0201 tot MP0203, waar de correlatie met getijslag erg laag was, is de correlatie met waterstandsopzet wat hoger met een waarde van ongeveer -0,3. De zeer eb dominante getijden vallen over het algemeen samen met een hogere waterstandsopzet (en vaak i.c.m. wind uit het westen tot noorden).

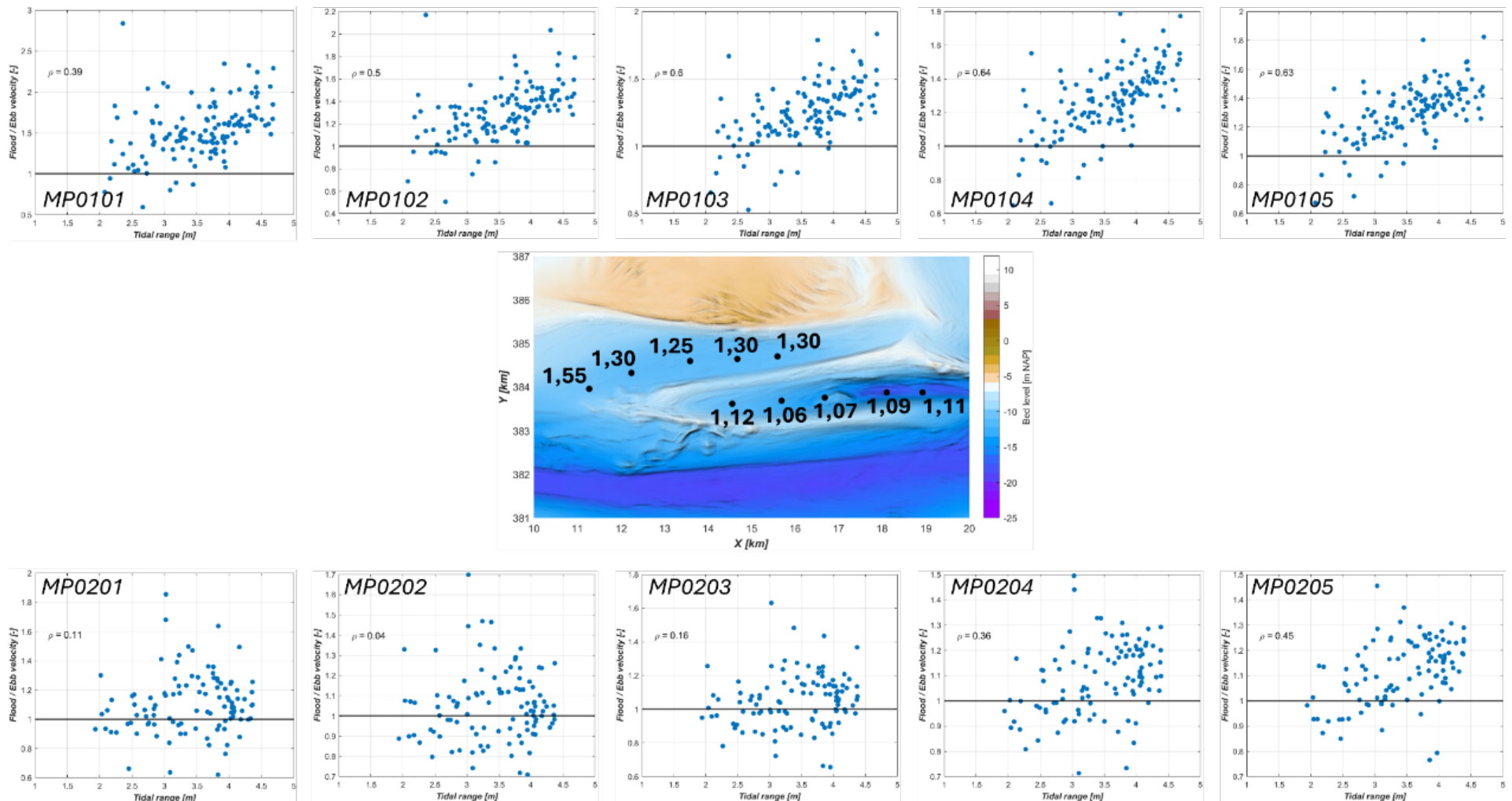
Om het verschil in stroming tussen de Spleet en ebschaar verder uit te diepen is de reststroming berekend en gepresenteerd in *Figuur 3-24*. De reststroming is bepaald in twee stappen. Ten eerste is de gemeten snelheid (in oost en noord richting) omgezet naar de hoofdrichting volgend uit de getij ellips (lange as van de ellips, zie *Figuur 3-19* en *Figuur 3-22*). Vervolgens is het gemiddelde bepaald van de snelheid in de richting van de lange as van de ellips gedurende de meetperiode. De meetperiode is lang genoeg zodat een verschil in begin- en eindmoment niet de reststroming beïnvloedt. Uit deze analyse blijkt dat de reststroming in de Spleet positief (vloedgericht) is en de reststroming in de ebschaar negatief (ebgericht).



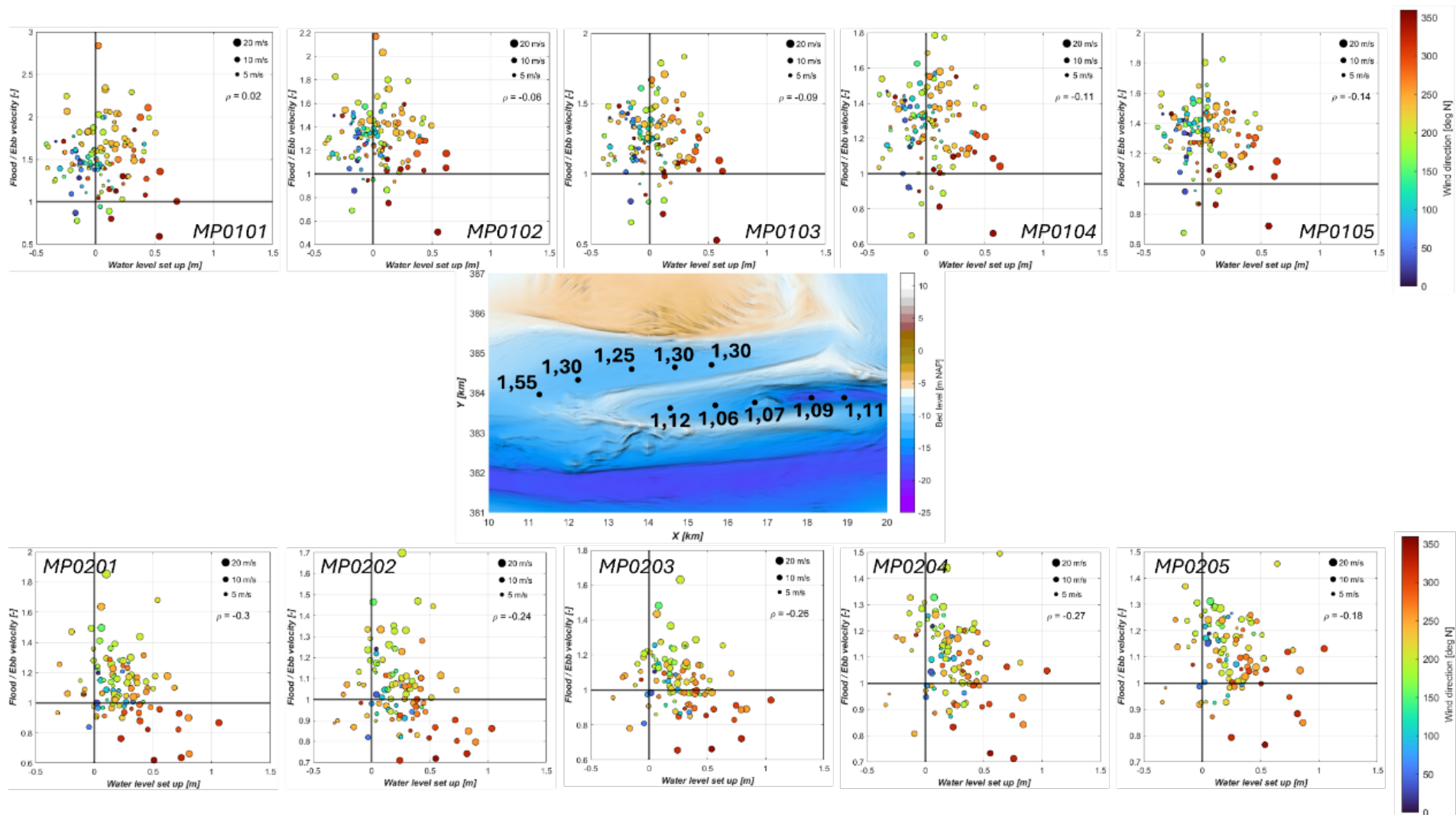
*Figuur 3-24: Berekende reststroming van de ADCP frames in de Spleet en ebschaar.*



Figuur 3-25: Overzicht van eb/vloed dominantie voor ADCP frames. Boven: tijdserie van vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden voor de meetserie MP0101 tot MP0105 (Spleet). Midden: vlakdningen bodem uit 2023 met gemiddelde vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden. Onder: tijdserie van vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden voor de meetserie MP0201 tot MP0205 (ebschaar).



Figuur 3-26: Overzicht van eb/vloed dominantie voor ADCP frames uitgezet tegen de getijslag. Boven: Verhouding van vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden voor de meetserie MP0101 tot MP0105 (Spleet) uitgezet tegen de getijslag. Midden: vakkoningen bodem uit 2023 met gemiddelde vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden. Onder: Verhouding van vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden voor de meetserie MP0201 tot MP0205 (ebschaar) uitgezet tegen de getijslag.



Figuur 3-27: Overzicht van eb/vloed dominantie voor ADCP frames uitgezet tegen de windopzet. De kleuren representeren de windrichting en de grootte van de bollen representeert de windsnelheid. Boven: Verhouding van vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden voor de meetserie MP0101 tot MP0105 (Spleet) uitgezet tegen de windopzet. Midden: vaklodingen bodem uit 2023 met gemiddelde vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden. Onder: Verhouding van vloed pieksnelheden gedeeld door eb pieksnelheden voor de meetserie MP0201 tot MP0205 (ebschaar) uitgezet tegen de windopzet.

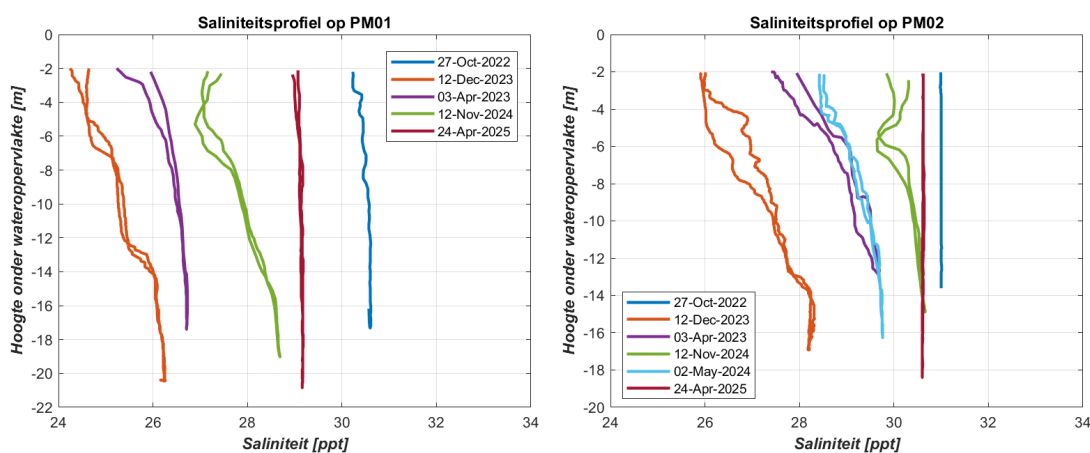
## 3.4 Profielmetingen

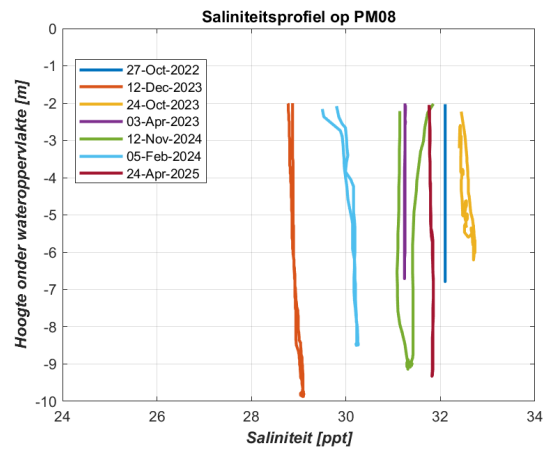
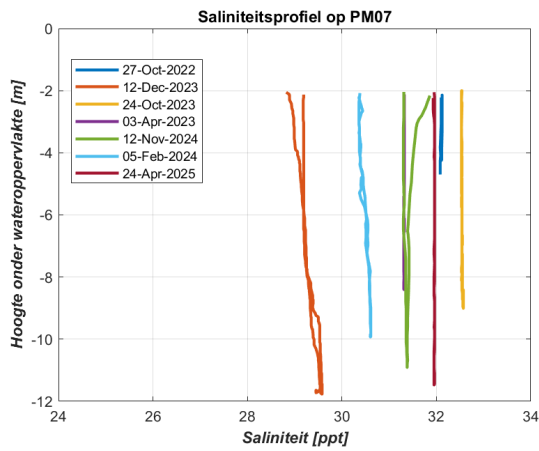
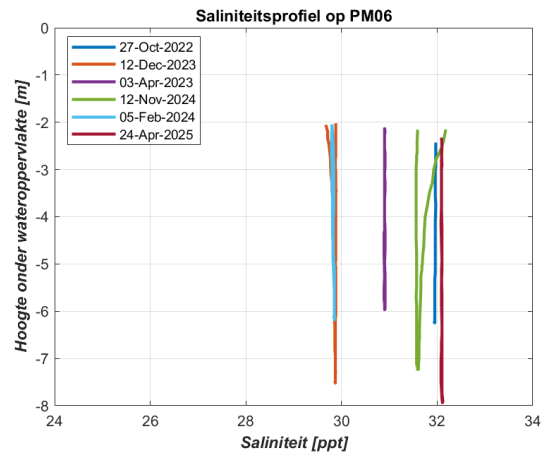
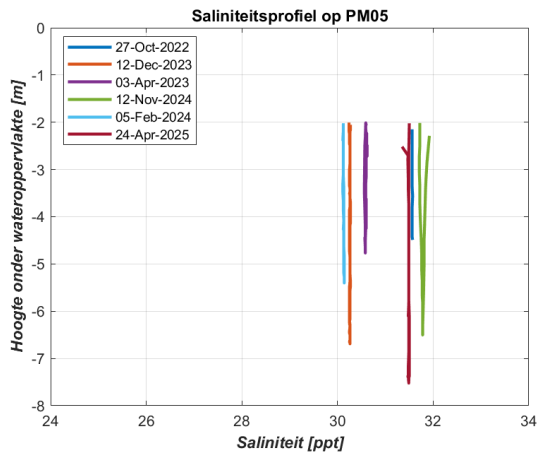
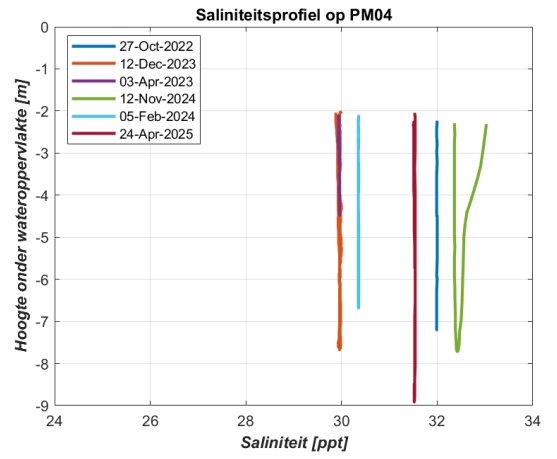
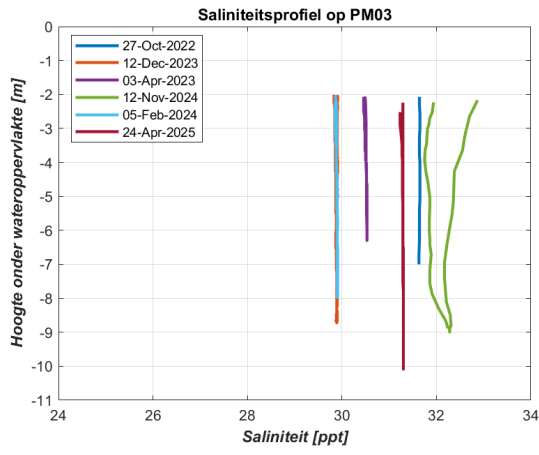
Deze paragraaf presenteert de saliniteits- en temperatuurresultaten van de profielmetingen. De turbiditeit en chlorofielconcentratie zijn ook gemeten, maar deze zijn niet geanalyseerd. Voornamelijk omdat er geen meetpunt van het landelijk meetnet is waarmee de data vergeleken kunnen worden. De profielmetingen zijn gemeten op negen locaties voor zeven verschillende momenten in het jaar (zie Tabel 2-12). De resultaten van de profielmetingen zullen worden vergeleken met saliniteitsmetingen via het landelijk meetnet van RWS (station: Vlake van de Raan).

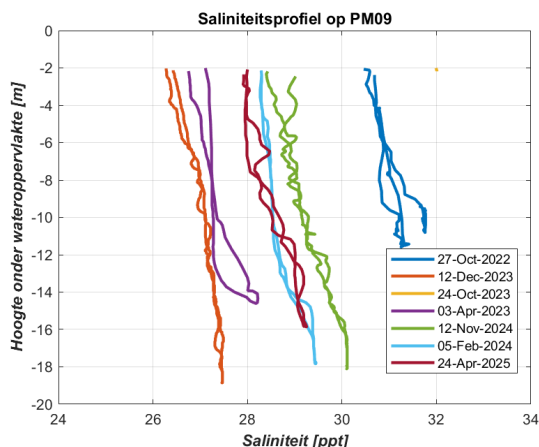
### 3.4.1 Saliniteit

De saliniteit van de profielmetingen is per locatie gepresenteerd in Figuur 3-28. De locaties van de metingen is te zien in Figuur 2-10, de profielmetingen PM01, PM02 en PM09 zijn bemeaten in of net naast de geul de Wielingen. Metingen PM03, PM04, PM05, PM06 liggen op de Vlake van de Raan en PM07 en PM08 liggen rond de geul van de Walvisstaart. Voor elk van de metingen is de data boven de 2 m diepte afgeknipt. Dit komt omdat de meetprobe zich tijdens het in het water laten, moet aanpassen aan de watertemperatuur.

We zien dat de saliniteitsmetingen voor elke locatie verschillen met het moment in de tijd dat gemeten is. Dit verschil is per meetlocatie maximaal 5 ppt. Er is niet direct een seizoenvariatie terug te vinden in deze metingen, voor b.v. PM03 en PM04 ligt het grootste verschil in saliniteitsconcentraties tussen de metingen in december 2023 en november 2024. De locaties op de Vlake van de Raan en de geul van de Walvisstaart hebben over het algemeen (behalve de meting van 12-nov-2024) geen verschil over de diepte; de saliniteit is constant en er is weinig stratificatie over het diepteprofiel. De locaties in de Wielingen laten een meer gevarieerd diepteprofiel zien voor sommige metingen: het verschil tussen de top (lagere saliniteit) en de bodem (hogere saliniteit) kan voor deze profielen oplopen tot 2 ppt.



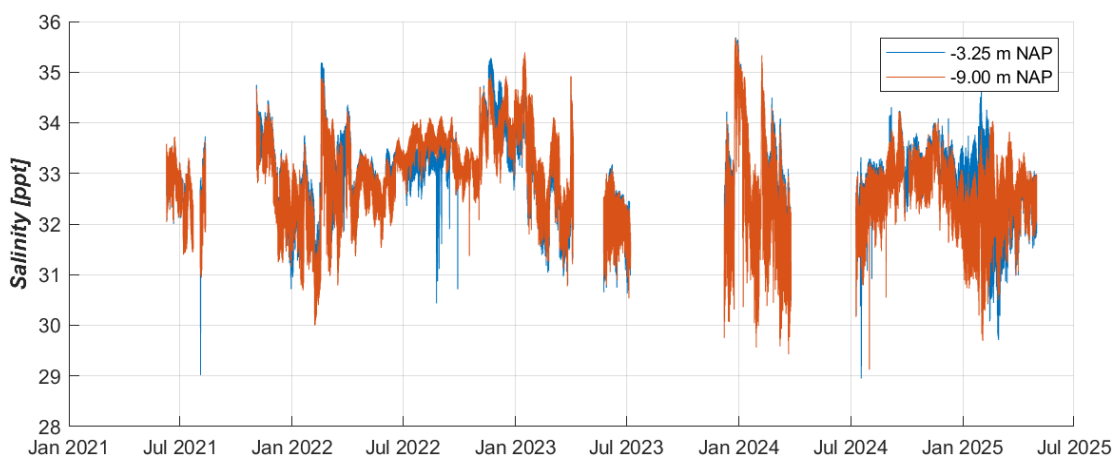




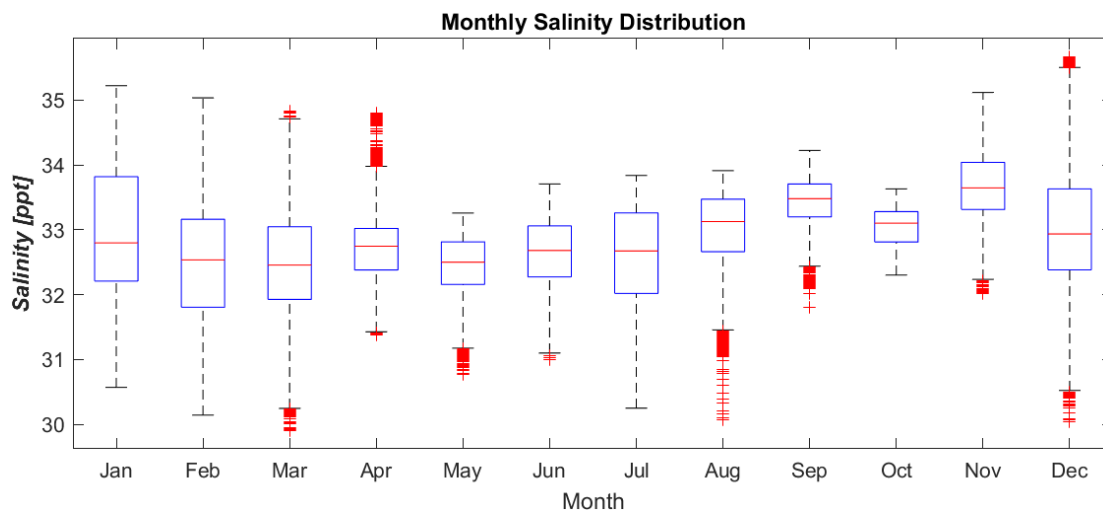
Figuur 3-28: Overzicht van de saliniteitswaarde van de profielmetingen over de diepte per locatie. Het apparaat meet de saliniteit van de waterlijn tot de bodem en weer terug naar de waterlijn, vandaar dat er twee lijnen zijn per meting.

De profielmetingen worden vergeleken met meetstation Vlakte van de Raan. Dit station meet constant de saliniteit op -3,25 m NAP en -9 m NAP en de locatie is te zien in Figuur 2-3. Figuur 3-29 laat de tijdserie zien voor de saliniteitsmetingen gedaan bij station Vlakte van de Raan. De saliniteit varieert tussen de 29 ppt en 36 ppt. Tijdens een getijcyclus varieert de saliniteit met ongeveer 0,05 tot 0,2 ppt. Het is opvallend dat tijdens sommige periodes de saliniteit van de -3,25 m NAP sensor hoger ligt dan de -9,0 m NAP sensor (bijv. juli 2024 tot maart 2025 of april 2024 tot juli 2023). Daarnaast zijn er ook periodes waarbij de -9,0 m NAP sensor hogere waarden heeft dan de -3,25 m NAP sensor (bijv. juli 2022 tot oktober 2022 of januari 2023 tot maart 2023). Er is geen verklaring voor deze wisselende trend.

Om de seizoenvariatie beter te analyseren wordt de gemeten saliniteit gepresenteerd in een boxplot, zie Figuur 3-30. Hieruit is te zien dat de gemiddelde saliniteit over het algemeen het hoogste is in september en november en het laagste in februari, maart en mei. De variatie in de Westerschelde zou een verklaring kunnen geven voor deze trend, zie bijvoorbeeld Deltares (2021) voor een weergave van de variatie in saliniteit in de Westerschelde. Verder is er veel variatie door het jaar heen, dat is ook te zien in de tijdserie van Figuur 3-29.



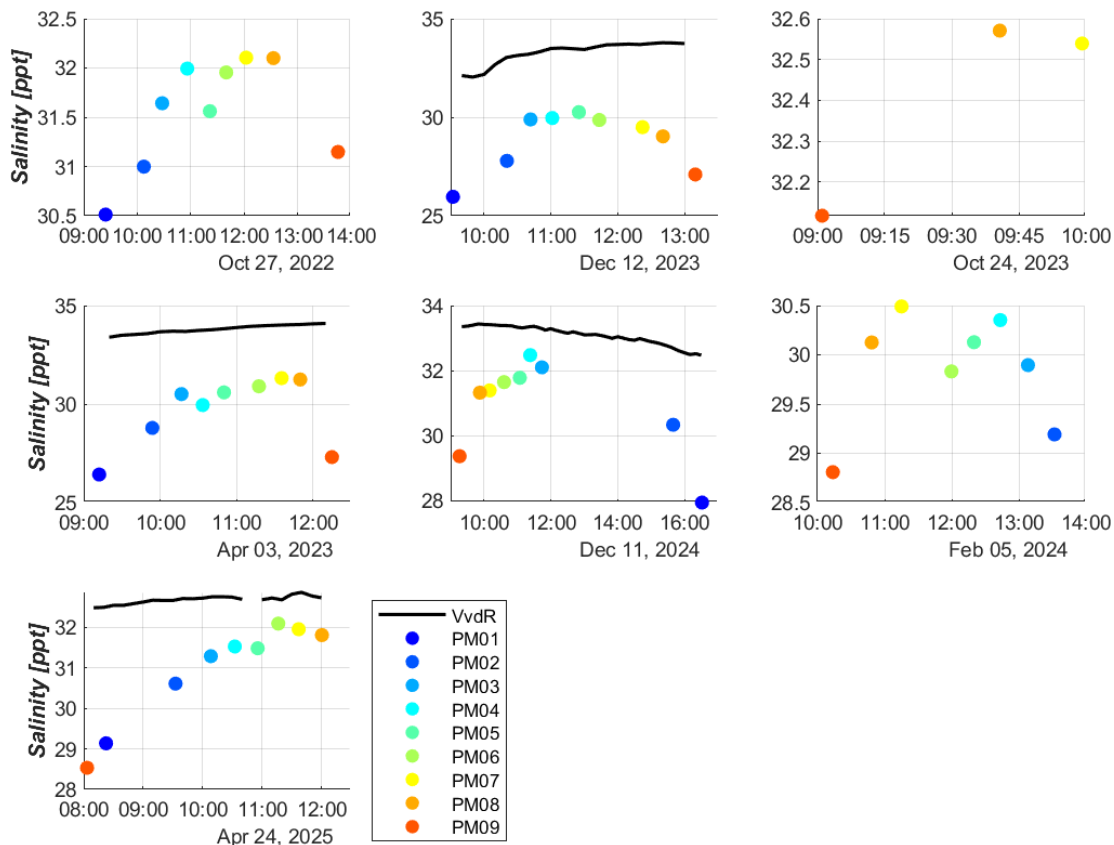
Figuur 3-29: Gemeten saliniteit van station Vlakte van de Raan.



Figuur 3-30: Box plot met gemiddelde, 25- en 75-percentiel waarde en outliers van saliniteitswaardes gegroepeerd per maand.

Voor elke meetcampagne zijn de resultaten van de profielmetingen dieptegemiddeld (gemiddelde van alle metingen onder -2 m). Deze zijn vergeleken met de dieptegemiddelde waarde van Vlakte van de Raan (gemiddelde van de -3,25 en -9 m NAP meting). Station Vlakte van de Raan heeft veel periodes zonder metingen, dus de vergelijking kan maar voor vier van de zeven momenten gemaakt worden. Wat opvalt is dat de profielmetingen een lagere saliniteit meten dan station Vlakte van de Raan. Station Vlakte van de Raan ligt het dichtst bij profielmeting PM06 en het verschil met deze profielmeting ligt voor de verschillende metingen tussen de 0,5 en 3 ppt.

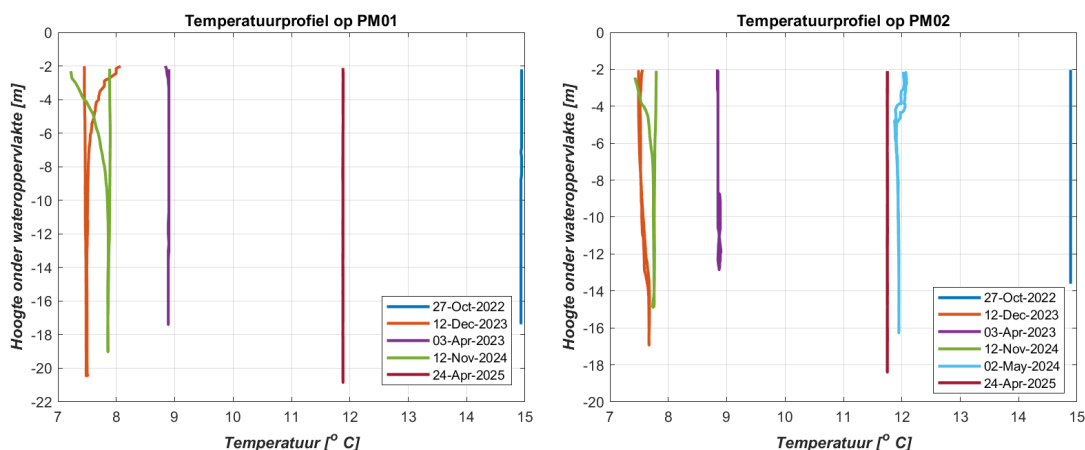
De profielmetingen laten ook variatie zien tussen de locaties, het verschil tussen de locaties kan oplopen tot 5 ppt (zie bijv. de meting van 3 april 2023). Locatie PM01 en PM09 liggen het dichtst bij de monding van de Westerschelde, terwijl locaties PM04 tot PM07 meer zeewaarts liggen. Over het algemeen liggen de saliniteitswaardes van de meer zeewaartse metingen hoger dan de meer landwaartse metingen. Het verschil tussen deze locaties en de overige ligt tussen de 0,5 en 3 ppt.

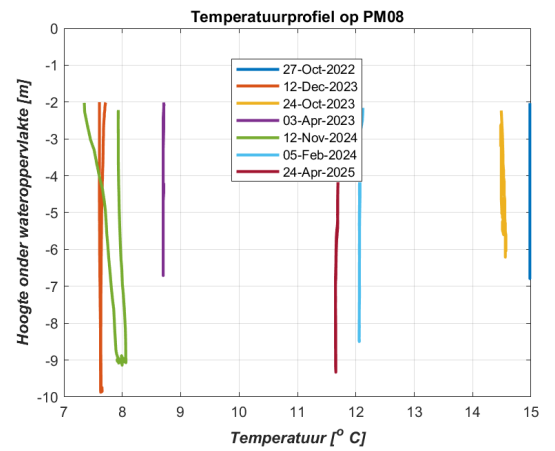
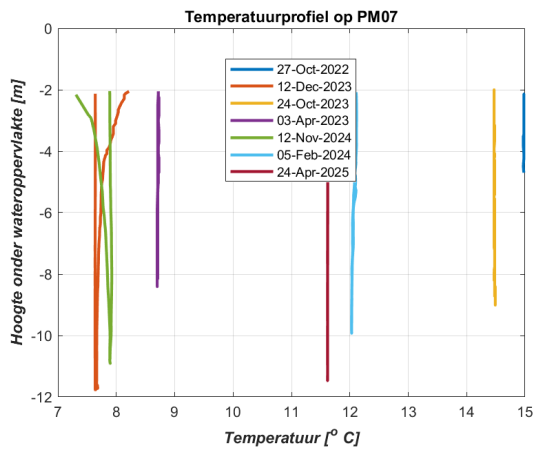
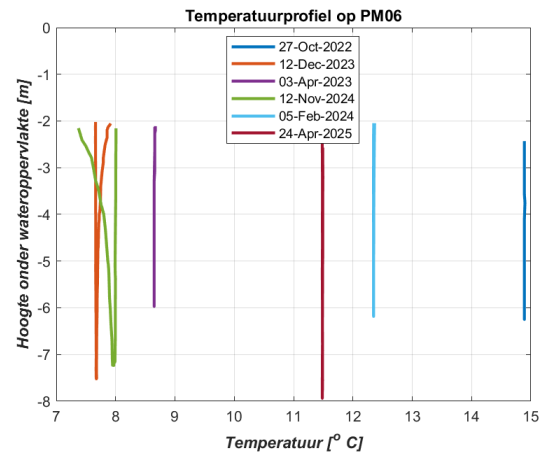
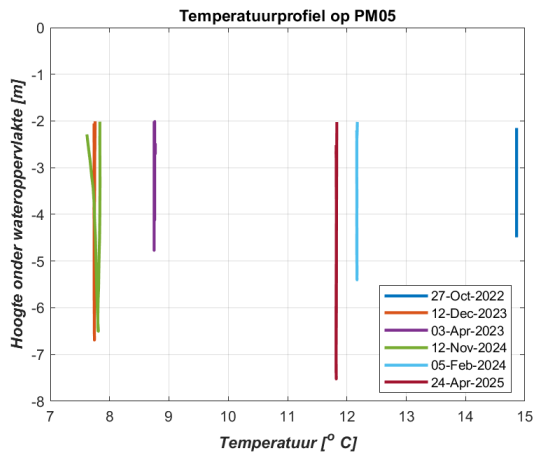
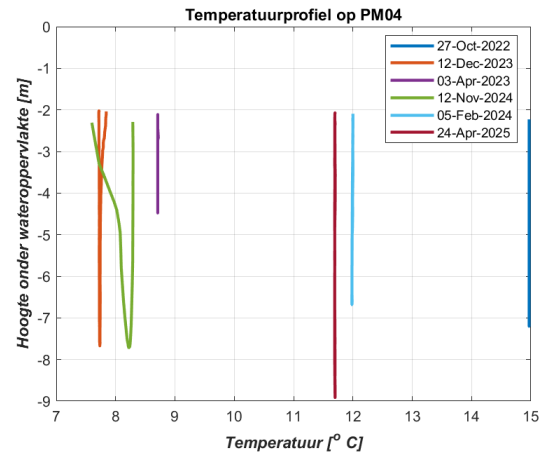
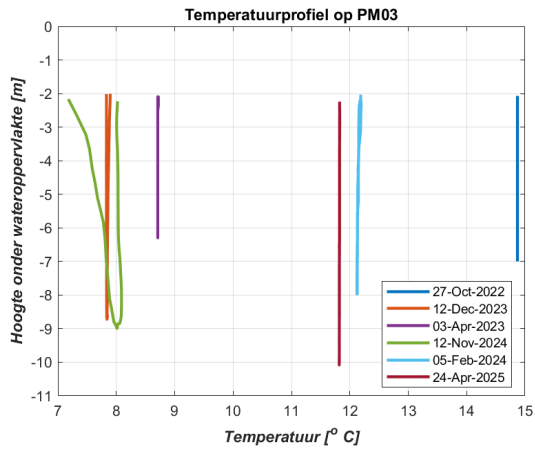


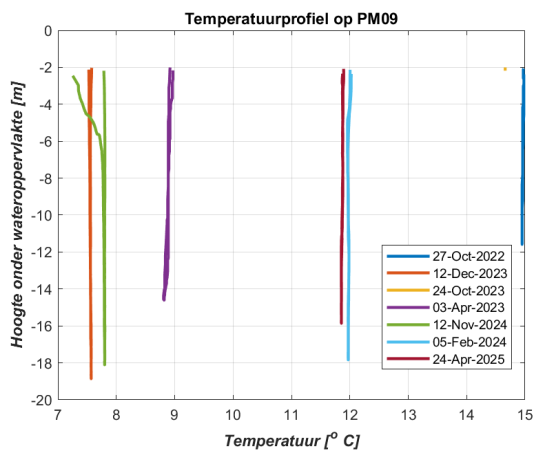
Figuur 3-31: Vergelijking tussen dieptegemiddelde saliniteit gemeten bij station Vlake van de Raan (zwarte lijn) en de profielmetingen op deze locaties (gekleurde bollen).

### 3.4.2 Temperatuur

Naast saliniteit is er voor alle profielmetingen ook temperatuur gemeten. De variatie van temperatuur over de diepte is zeer klein, alleen voor de meting van 12-nov-2024 is er wat variatie over de diepte te zien. Ook is er een duidelijke variatie te zien met de seizoenen, de metingen in de winter en het begin van het voorjaar laten de laagste temperaturen zien, metingen aan het eind van de zomer laten de hoogste temperaturen zien.

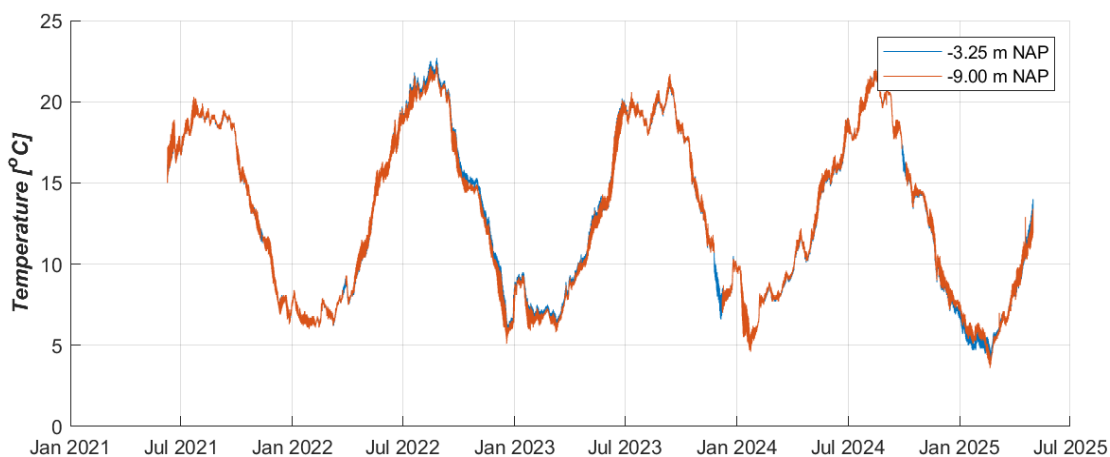




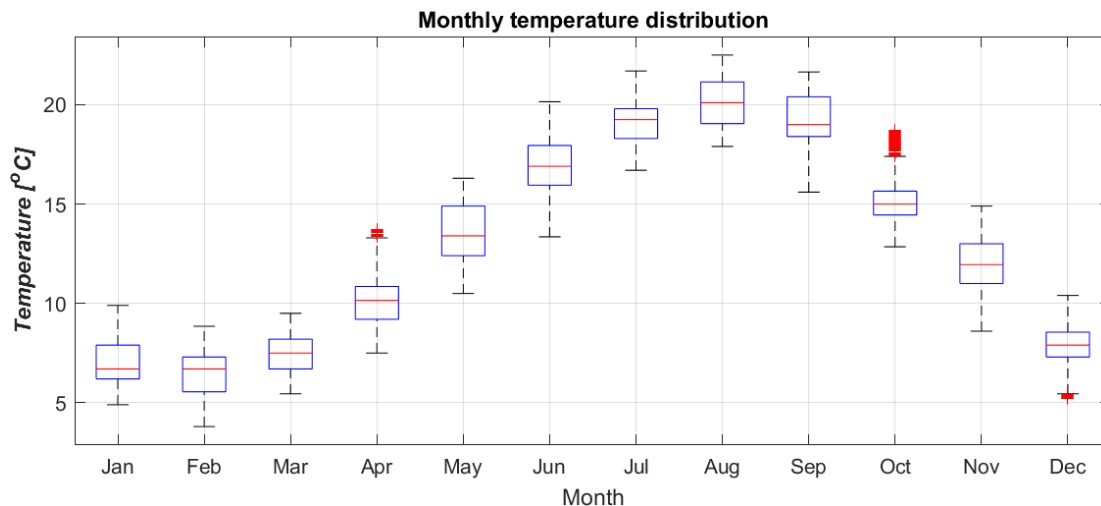


Figuur 3-32: Overzicht van de temperatuur van de profielmetingen over de diepte per locatie. Het apparaat meet de temperatuur van de waterlijn tot de bodem en weer terug naar de waterlijn, vandaar dat er twee lijnen zijn per meting.

Voor de profielmetingen wordt wederom een vergelijking gemaakt met meetstation Vlakte van de Raan. De temperatuur die wordt gemeten voor station Vlakte van de Raan tussen 01-jan-2021 en 01-nov-2025 is te vinden in Figuur 3-33. Temperatuur is (net zoals saliniteit) gemeten op twee waterhoogtes, -3,25 m NAP en -9 m NAP. De meting van -3,25 m NAP heeft soms hogere temperaturen (bijv. juli 2022 tot jan 2023) dan de meting van -9 m NAP en soms is dit andersom (bijv. okt 2024 tot feb 2025). Ondanks de verschillen tussen de meetinstrumenten zijn er duidelijke dagelijkse en jaarlijkse variaties te zien. De minimumtemperatuur ligt rond de 5 graden en stijgt in de zomer tot maximaal 22 graden. Figuur 3-34 geeft het verschil over een jaar duidelijk weer met een boxplot. In de wintermaanden zijn de temperaturen het laagst met een gemiddelde van 7 – 8 graden, in de zomer is de temperatuur het hoogste met een gemiddelde in augustus van ongeveer 20 graden.

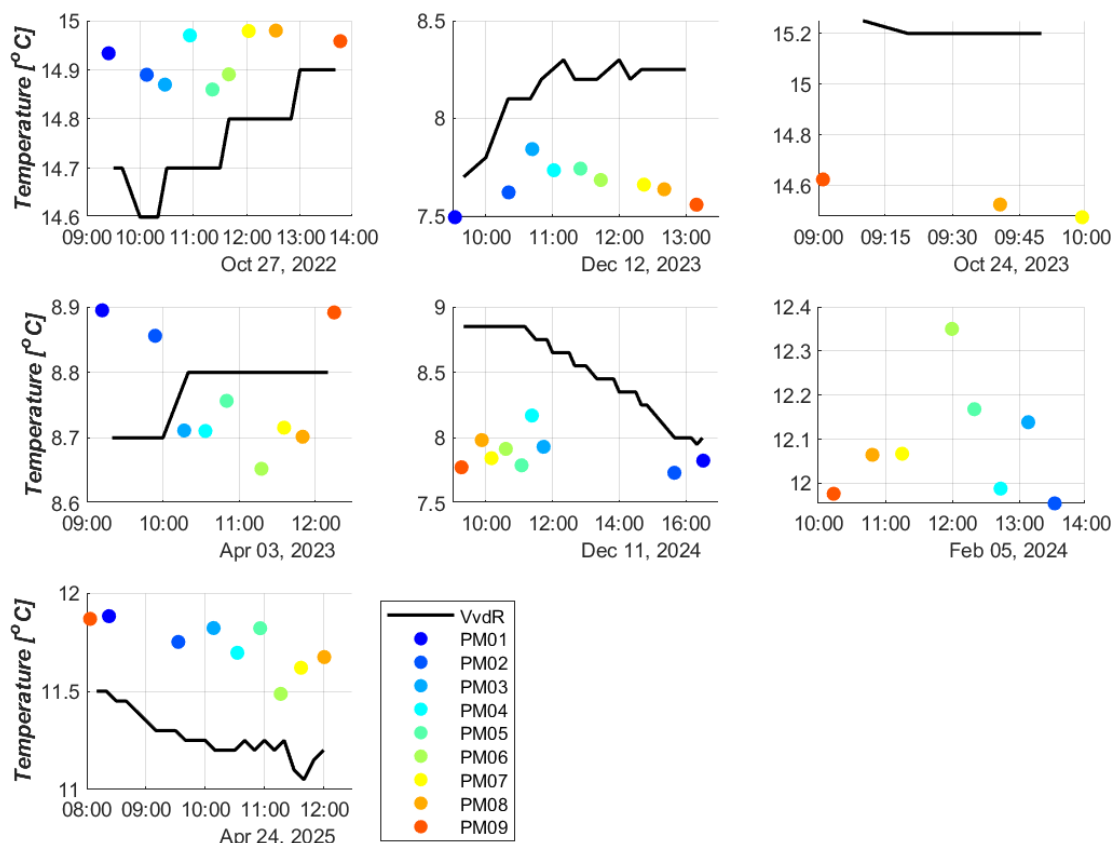


Figuur 3-33: Gemeten temperatuur van station Vlakte van de Raan.



Figuur 3-34: Box plot met gemiddelde, 25- en 75-percentiel waarde en outliers van temperatuurwaarden gegroepeerd per maand.

De gemeten temperatuur wordt op dezelfde manier gemiddeld als saliniteit. De temperatuur is heel constant over de diepte en daarom kunnen we deze middeling gebruiken. Voor zes van de zeven meetmomenten van de profielmetingen zijn er ook metingen van station Vlakte van de Raan. Het verschil tussen de gemeten temperatuur van station Vlakte van de Raan en de profielmetingen verschilt per meetmoment, soms is station Vlakte van de Raan hoger dan alle profielmetingen (bijv. 12-dec-2023) en soms lager dan alle profielmetingen (bijv. 27-okt-2022). Het verschil ligt tussen de 0,1 en 0,7 °C. De profielmetingen hebben een afwijking van 0,1 tot 0,3 graden t.o.v. elkaar.



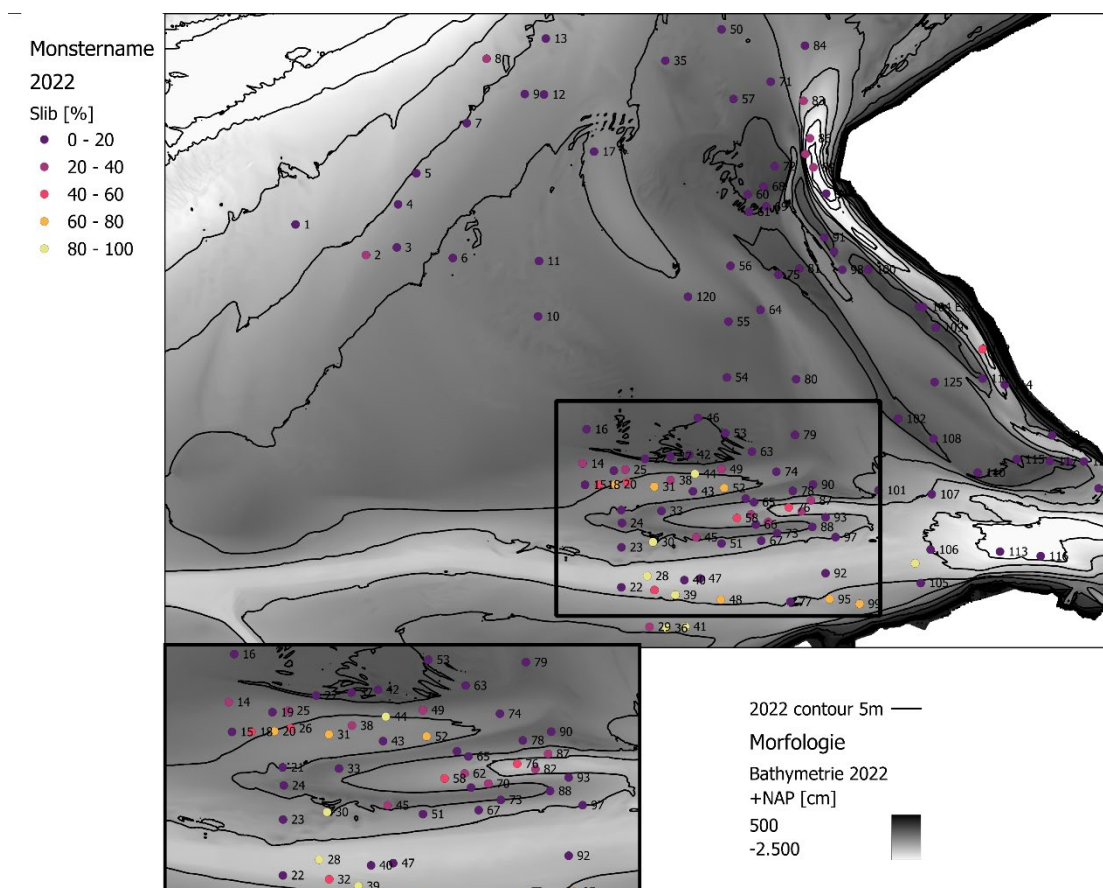
Figuur 3-35: Vergelijking tussen dieptegemiddelde temperatuur gemeten bij station Vlakte van de Raan (zwarte lijn) en de profielmetingen op deze locaties (gekleurde bollen).

## 4 Bodemsamenstelling

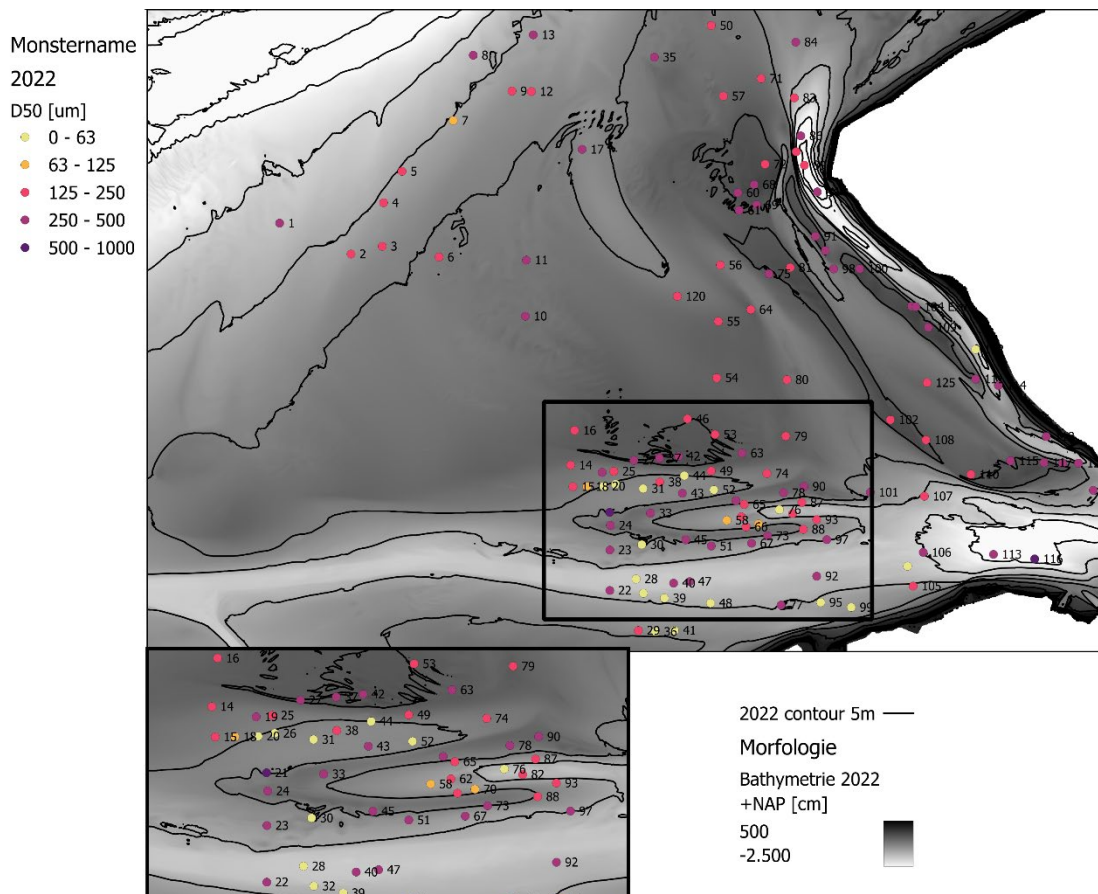
De ruimtelijke variatie en temporele veranderingen van de sedimenteigenschappen van de bodem van de Westerschelde monding zijn onderzocht op basis van bodemonsters genomen in 2022 en 2023. De bodemeigenschappen betreffen het percentage slib, de mediane korrelgrootte (D50), de uniformiteit van het materiaal, het watergehalte en het gehalte.

### 4.1 Sedimenteigenschappen 2022

Het slibpercentage en de D50 verschillen ruimtelijk in de Schelde-monding, zie respectievelijk Figuur 4-1 en Figuur 4-2. Van een aantal karakteristieke locaties zijn de korrelgrootte en het slibpercentage opgenomen in Tabel 4-1 en zijn foto's van de sedimentmonsters weergegeven in Figuur 4-3, Figuur 4-4 en Figuur 4-5. De data van alle locaties zijn te vinden in Appendix E. Op de Vlakte van de Raan en in het noordoosten van de Schelde-monding is het slibpercentage over het algemeen kleiner dan 20% en de D50 groter dan 63  $\mu\text{m}$ . Deze gebieden zijn relatief zandig, een voorbeeld van een van deze locaties is bodemonster 10 zoals te zien in Figuur 4-3. In de Ebschaar, Spleet en Wielingen zijn de bodemonsters slibrijker (percentages tot 90%), tegelijkertijd is de D50 over het algemeen groter dan 63  $\mu\text{m}$ . De lager gelegen delen in de ebschaar, Spleet en Wielingen bevatten slibrijker materiaal (zie bijv. bodemonster 58, Figuur 4-3), terwijl het materiaal van de hoger gelegen randen (bijv. bodemonsters 19 en 49, Figuur 4-4) zandig is.



Figuur 4-1: Slibpercentages van de bodemonsters genomen in 2022.



Figuur 4-2: D50 van de bodemonsters genomen in 2022.

Tabel 4-1: Slibpercentages en D50 van enkele geselecteerde bodemonsters in 2022, enkele karakteristieke locaties in de Vlakte van de Raan, ebschaar en Spleet. De volledige dataset is te vinden in Appendix E.

| ID bodemonster | Locatie            | Slib [%] | D50 [µm] |
|----------------|--------------------|----------|----------|
| 10             | Vlakte van de Raan | 4        | 285      |
| 19             | Rand Spleet        | 7        | 410      |
| 43             | Bodem Spleet       | 5        | 406      |
| 49             | Rand Spleet        | 36       | 234      |
| 52             | Bodem Spleet       | 63       | 18       |
| 58             | Bodem Ebschaar     | 48       | 79       |



Figuur 4-3: Bodemkern genomen bij locatie 10; Vlakte van de Raan (links) en locatie 58; Spleet (rechts).



Figuur 4-4: Bodemkern genomen van locaties 19 (links) en 49 (rechts), beide de zandige randen van de Spleet.

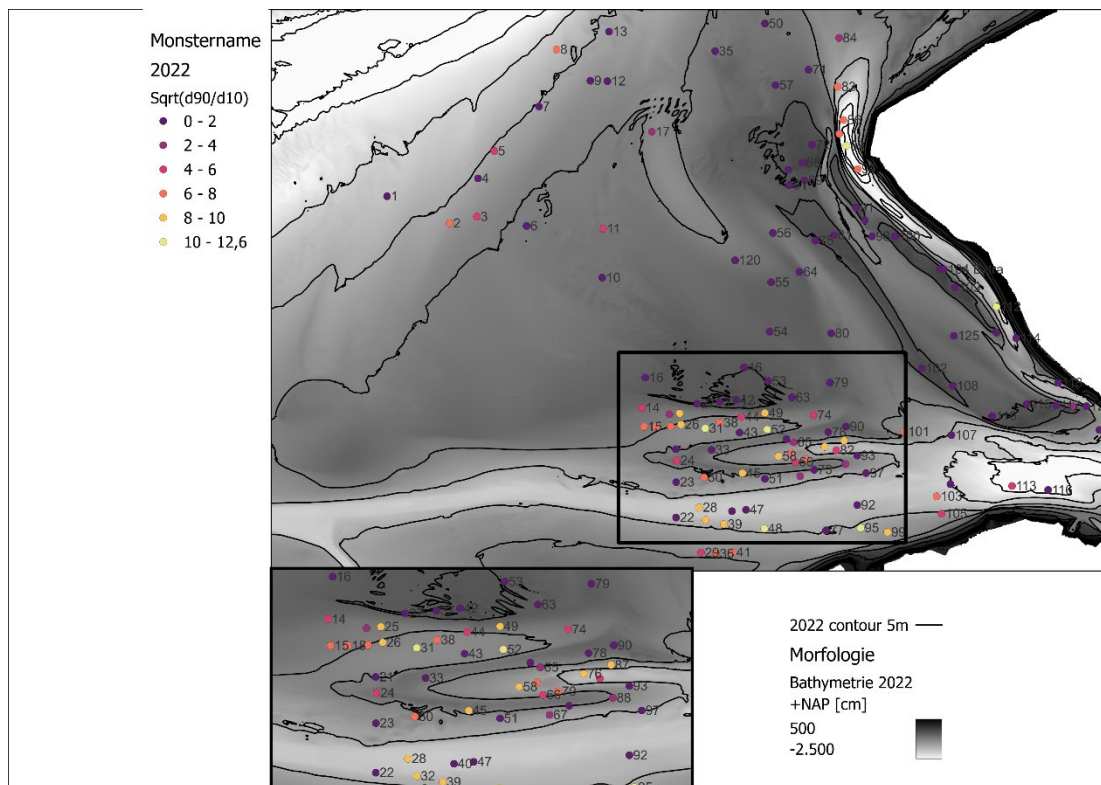
Ondanks dat het materiaal in de dieper gelegen delen van het interessegebied slibrijker is, zijn er ook enkele locaties met een lager slibpercentage en hogere D50 in de buurt van locaties met een hoog slibpercentage en lage D50. Oftewel, de ruimtelijke spreiding is groot. Een voorbeeld zijn bodemmonster 43 en 52 van de Spleet die te zien zijn in Figuur 4-5. Deze monsters hebben een significant verschil in D50 (388  $\mu\text{m}$ ) en slibpercentage (48%), zie hiervoor de getallen in Tabel 4-1. De afstand tussen de monsterlocaties is 1 km en ze bevinden zich beide in de bodem van de Spleet. Het verschil is mede het gevolg van de methode die

werd toegepast voor het analyseren van de bodemmonsters. Voor het analyseren van de korrelgrootte is het niet mogelijk om gedroogd materiaal te gebruiken. Hierdoor is ook schelpengruis en organisch materiaal aanwezig in het monster. Bij de analyse van de monsters kan door het instrument, dat werkt met laserdefractie, geen onderscheid worden gemaakt tussen verschillende typen materiaal. Schelpengruis en organisch materiaal, dat een grotere omvang heeft dan slibdeeltjes, wordt dan beschouwd als korrel waardoor de korrelgrootte verdeling naar grotere korrelgroottes schuift. In Figuur 4-5 is te zien dat bodemmonster 43 veel schelpengruis bevat. Dit verklaart het lage slibpercentage en hoge D50.



*Figuur 4-5 Bodemkern genomen van locaties 43 (links) en 52 (rechts), beide monsters van de bodem van de Spleet.*

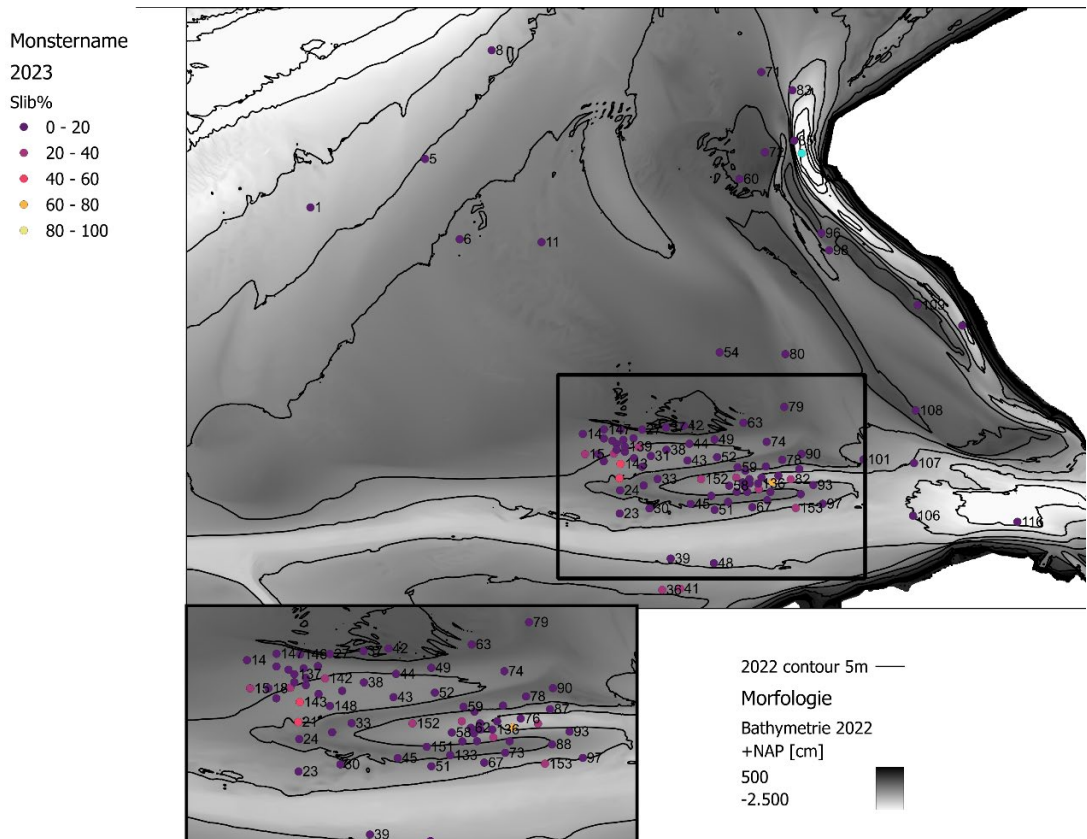
Op basis van de korrelgrootteverdeling is de uniformiteit van de bodemmonsters bepaald en weergegeven in Figuur 4-6 en vergelijking 2-2. Een lagere waarde (paarse kleur) duidt op een meer uniform mengsel, i.e. de D90 en D10 verschillen weinig van elkaar. De bodemmonsters van de Vlakte van de Raan zijn relatief uniform. In de ebschaar, Spleet en Wielingen varieert de korrelgrootte meer in de bodemmonsters, met name daar waar de bodem dieper is. Die variatie is ook te zien op de foto's. Bodemmonster 10 in Figuur 4-3 is vooral een zandig mengsel met een hoge uniformiteit, terwijl bodemmonster 52 in Figuur 4-5 een mengsel is van zand, slib en mogelijk schelpengruis met een lage uniformiteit.



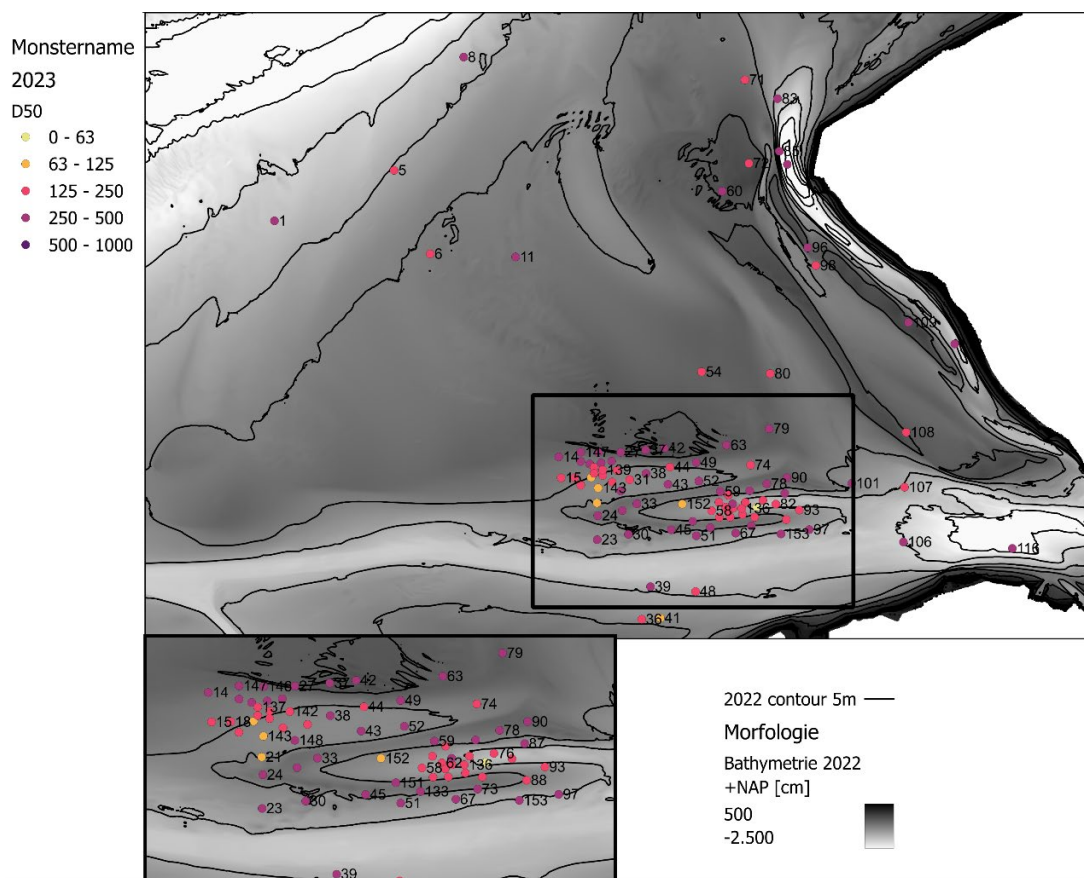
Figuur 4-6 Uniformiteit van de bodemonsters genomen in 2022.

## 4.2 Sedimenteigenschappen 2023

In de meetcampagne van 2023 zijn veel dezelfde locaties bemonsterd als in 2022. De focus lag meer op het interessegebied van de ebschaar en de Spleet, daarom zijn hier meer metingen uitgevoerd en minder voor het overige deel van de Schelde-monding. Voor de 2023 meetcampagne is ook het slibpercentage en D50 bepaald, deze zijn te vinden in Figuur 4-7 en Figuur 4-8. De ruimtelijk variatie van D50 en het slibpercentage is in 2023 kleiner dan tijdens de 2022 meetcampagne. In vrijwel de gehele Schelde-monding is het slibpercentage kleiner dan 40% en de D50 groter dan 63  $\mu\text{m}$ . De bodemonsters zijn over het algemeen zandig. Ook in het interessegebied zijn de slibpercentages kleiner dan 40 % op 3 locaties na. In 2022 zijn er meer locaties met slibrijke metingen in dit gebied dan deze meetcampagne.



Figuur 4-7 Slibpercentages van de bodemonsters genomen in 2023.



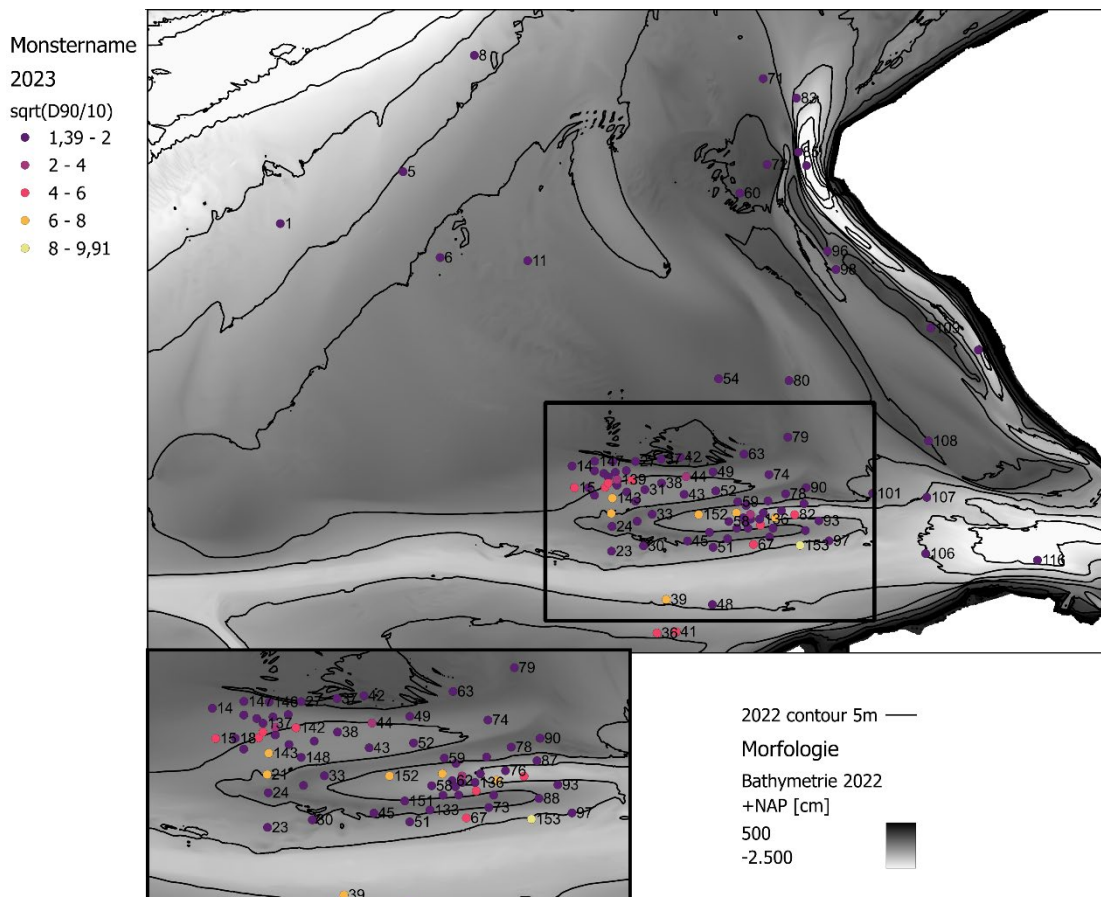
Figuur 4-8 D50 van de bodemonsters genomen in 2023.

Locaties 21 en 143 in de Spleet hebben een relatief hoog slibpercentage in vergelijking met de andere locaties. Daarom wordt er specifiek gekeken naar deze twee bodemkernen, zie Figuur 4-9. Op de foto's is te zien dat het bodemmonster van locatie 21 een dik kleipakket bevat met een zeer dunne zandlaag daar bovenop. Van locatie 143 is geen foto beschikbaar van de doorsnede van het bodemmonster.



*Figuur 4-9 Bodemkern van locaties 21; rand van de Spleet (links) en locatie 143; bodem van de Spleet (rechts).*

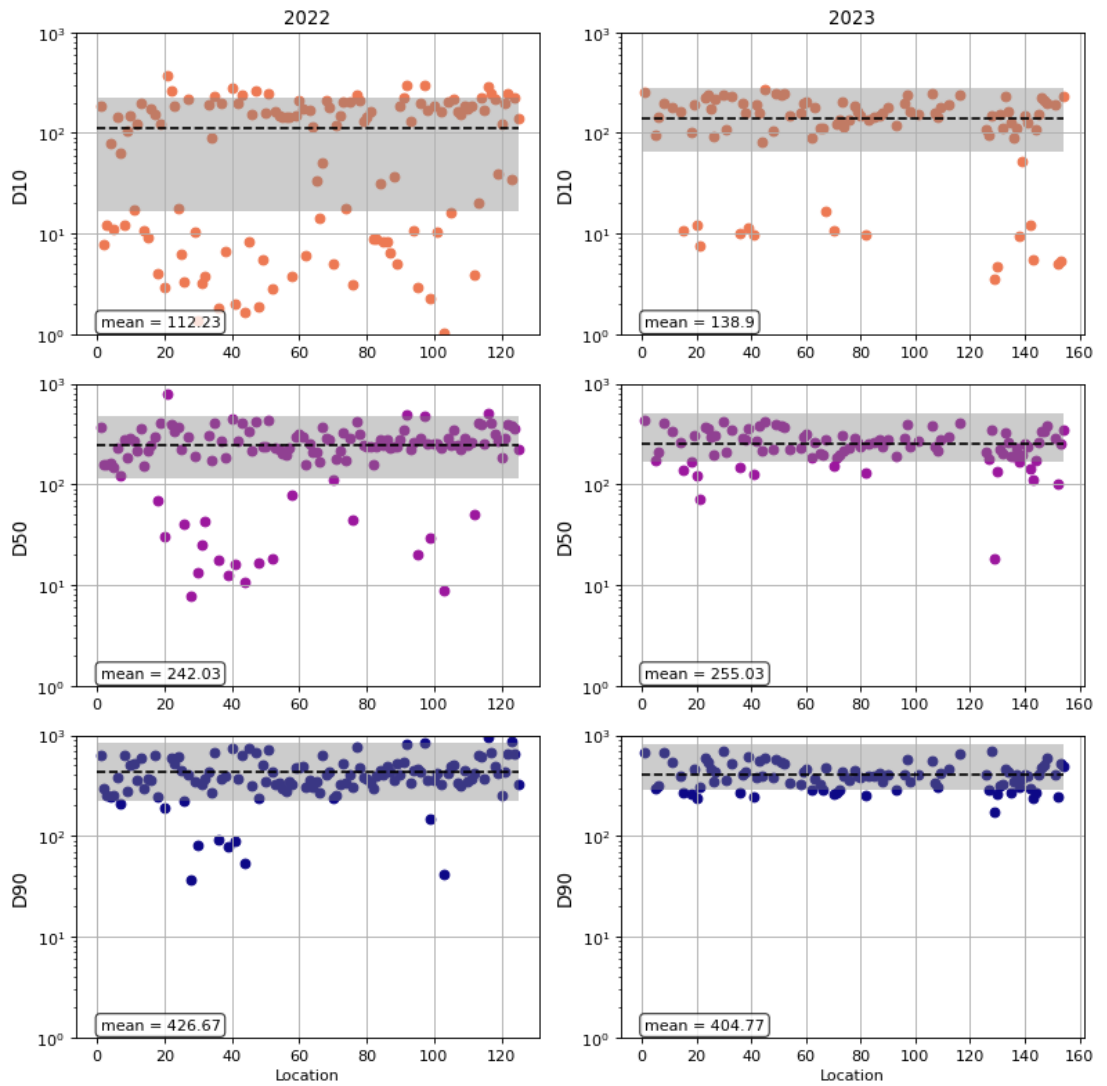
De uniformiteit van de monsters is te zien in Figuur 4-10. Deze varieert tussen de 1,4 en 2 in het interessegebied en de gehele Schelde-monding (op enkele locaties na). Voor de meetcampagne van 2022 lag de uniformiteit over het algemeen hoger, wat betekent dat er meer spreiding is in het materiaal van de bodemkern.



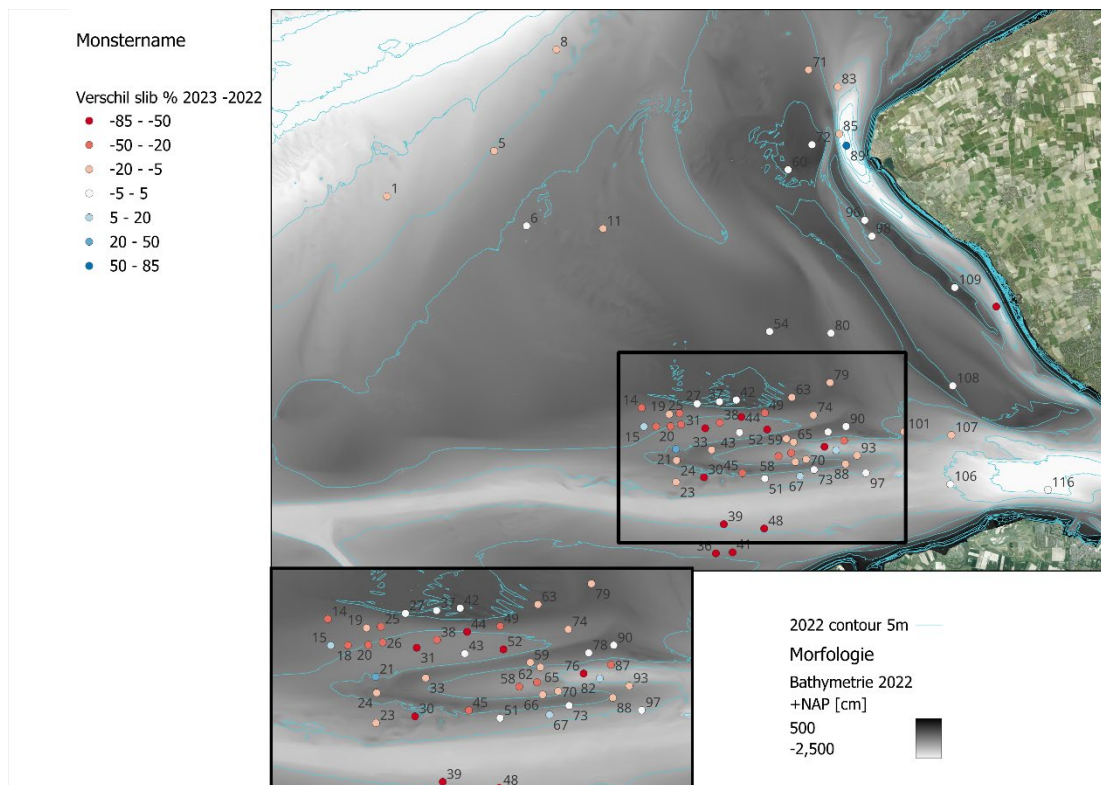
Figuur 4-10: Uniformiteit van de bodemonsters genomen in 2023.

### 4.3 Temporele veranderingen

Op basis van een vergelijking van de D10, D50 en D90 kunnen we vaststellen dat de bemonsterde locaties minder fijn materiaal hebben in 2023 in vergelijking met 2022, zie de vergelijking van de 2022 en 2023 meetcampagne in Figuur 4-11. Alhoewel de gemiddelde waarden voor D10 en D50 slechts 10 – 20 % hoger zijn in 2023, zijn met name de zeer slibrijke bodemonsters met kleine D10 en D50 in 2022 grover geworden. Dit is eveneens te zien in Figuur 4-12, waar het verschil in slibpercentage tussen 2022 en 2023 is weergegeven. Met name de bodemonsters in het interessegebied minder slibrijk en dus zandiger geworden.



Figur 4-11: D10, D50 en D90 van de bodemmonsters in 2022 (links) en 2023 (rechts).



*Figuur 4-12: Verschil slib in percentages tussen 2022 en 2023. Rode kleurschaal is een afname van het slibpercentage, blauwe kleurschaal een toename van het slibpercentage.*

Van vier locaties met een sterke afname in slibpercentage zijn de foto's van de bodemmonsters in 2022 en 2023 vergeleken. Het gaat hierbij om locaties 31 en 52 in de Spleet en locaties 58 en 76 in de ebschaar.

De bodemkern van locatie 31 is voor beide jaren te vinden in Figuur 4-13. In de spleet was de bodemkern in 2022 te waterig (slap) om zonder box corer een foto te maken. Dit duidt op een slibrijk monster met een hoog watergehalte. In 2023 is het monster wel stevig genoeg om de box corer te verwijderen en doorsnede te maken. De toplaag (~2 cm) lijkt zandiger (bruin sediment) dan de rest van het bodemmonster (zwart materiaal). Deze laag zand heeft mogelijk geleid tot een lager slibpercentage en hogere D50 in 2023 t.o.v. 2022.



*Figuur 4-13: Bodemkern van locatie 31 in de Spleet: 2022 met D50: 25  $\mu\text{m}$  en slib: 65% (links), 2023 met D50: 211  $\mu\text{m}$  en slib: 4% (rechts)*

De bodemkern van locatie 52 in de Spleet is voor 2022 en 2023 terug te vinden in Figuur 4-14. In 2022 was het een relatief instabiel monster en de zwarte kleur van het sediment laat zien dat het een slibrijk monster was. Dit samen duidt op een slibrijk monster met een hoog watergehalte. In 2023 is het monster wel steviger en is er een laag zand van 10 cm (bruine kleur) op een sliblaag (zwarte kleur). Deze laag zand heeft geleid tot een lager slibpercentage in 2023 t.o.v. 2022. Het slibpercentage van dit monster was in 2023 vastgesteld op 0%, dat komt omdat alleen de bovenste 10-15 cm van de kern is geanalyseerd (zie Paragraaf 2.2.4). Dit vertelt dus een deel van het verhaal, want er is duidelijk slib aanwezig aan de onderkant van de kern.



Figuur 4-14: Bodemkern van locatie 52 in de Spleet: 2022 met  $D_{50}$ : 18  $\mu\text{m}$  en slib: 63% (links), 2023 met  $D_{50}$ : 372  $\mu\text{m}$  en slib: 0% (rechts)

Voor monsters in de ebschaar is eenzelfde vergelijking te maken tussen 2022 en 2023. Figuur 4-15 laat de bodemkern zien van locatie 58 in de ebschaar. In 2022 was de bodemkern instabiel en slibrijk. In de bodemkern van 2023 heeft de bodemkern een zandlaag 5-10 cm (bruine kleur). Omdat alleen het bovenste gedeelte van de bodemkern wordt geanalyseerd, is het slibpercentage van 48% in 2022 afgenomen tot 1% in 2023.



Figuur 4-15: Bodemkern van locatie 58 in de ebschaar: 2022 met  $D_{50}$ : 78  $\mu\text{m}$  en slib: 48% (links), 2023 met  $D_{50}$ : 229  $\mu\text{m}$  en slib: 1% (rechts)

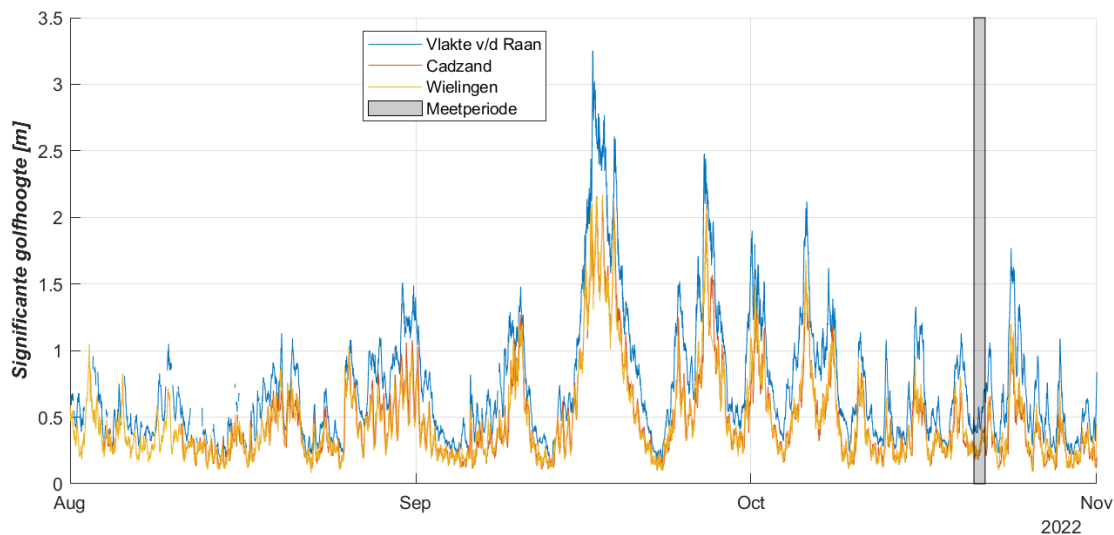
Voor locatie 76 in de ebschaar zijn de resultaten van de bodemkern weergegeven in Figuur 4-16. In 2022 was de bodemkern te instabiel om zonder bodemkern te fotograferen. In 2023 was het monster wel stabiel en bestaat het monster uit een sliblaag (zwarte kleur) met daarboven een zandlaag van 10 cm met schelpen. Het verschil in D50 en slibpercentage is terug te zien in beide bodemkernen, de bodemkern van 2023 is in de bovenlaag zandig en dit leidt tot een hogere D50 en lager slibpercentage.



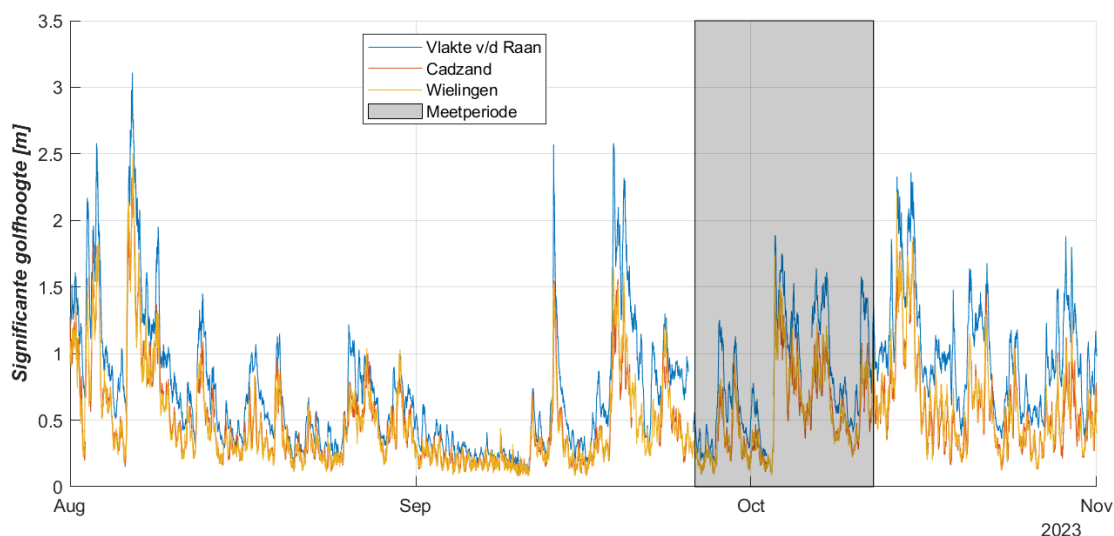
*Figuur 4-16: Bodemkern van locatie 76 in de ebschaar: 2022 met D50: 44  $\mu\text{m}$  en slib: 55% (links), 2023 met D50: 232  $\mu\text{m}$  en slib: 5% (rechts)*

Voor alle vier de locaties geldt dat de monsters in 2023 zichtbaar zandiger en stabiel zijn dan de monsters in 2022. Tussen de metingen in 2022 en 2023 is zowel in de Spleet als in de ebschaar een laag zand van 5 – 10 cm afgezet die ten tijde van de monsternamen van 2023 nog steeds aanwezig was. Het is op basis van deze data niet te bepalen wanneer de laag zand gesedimenteerd is en wat de verblijftijd van de laag zand is of was.

Om wat meer inzicht te krijgen in het verschil tussen de meetcampagne van 2022 en 2023 is de golfhoogte weergegeven in de periode voorafgaand aan de campagne. In Figuur 4-17 en Figuur 4-18 is de golfhoogte van station Vlake van de Raan, Wielingen en Cadzand weergegeven voor respectievelijk augustus tot november in 2022 en 2023. Over het algemeen is de golfhoogte hoger in station Vlake van de Raan in vergelijking met de andere stations, dit is logisch omdat dit station zich meer richting open water bevindt. Boei Wielingen ligt het dichtst bij het interessegebied. Uit Figuur 4-17 en Figuur 4-18 is niet direct een conclusie af te leiden, de periode voorafgaand aan de meetcampagne van 2022 bevat enkele intensere stormen met significante golfhoogtes tot 3,3 m, terwijl dit in 2023 beperkt bleef tot 2,5 m. Het zou dus kunnen dat zand meer verplaatst is door deze intensievere stormen, maar dit is geen sluitende verklaring voor het verschil.

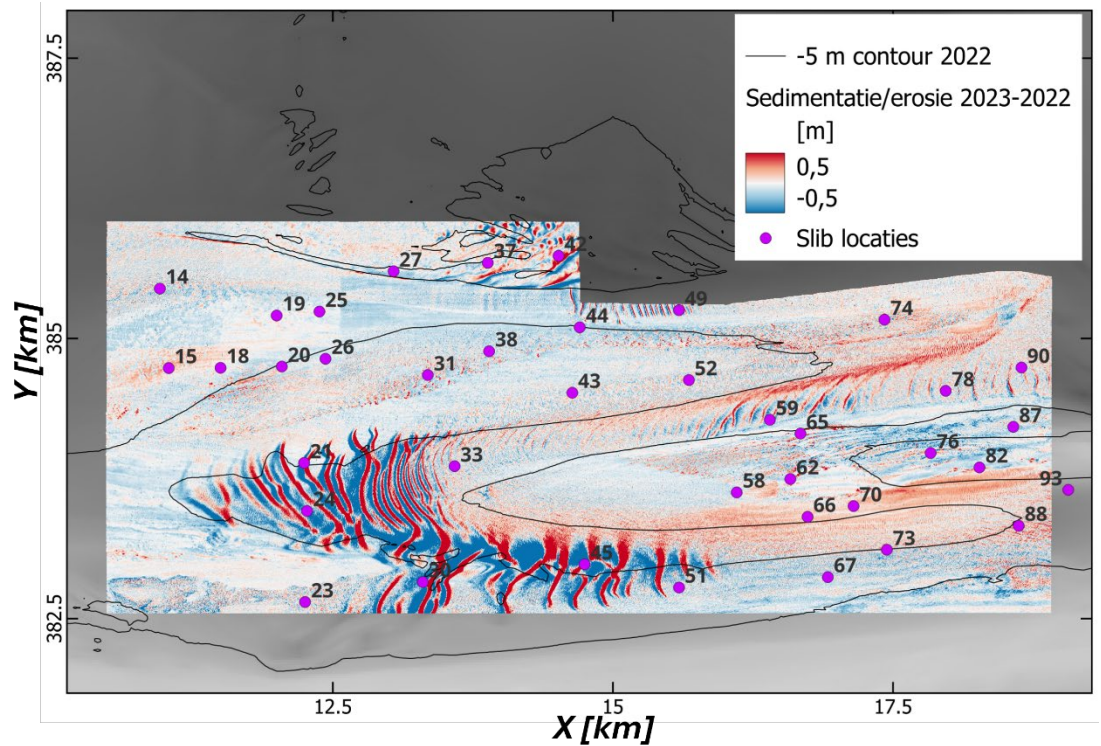


Figuur 4-17: Significante golfhoogte van station Vlakte v/d Raan, Cadzand en Wielingen voor, tijdens en na de bodemkernen bemonstering in 2022. De meetperiode is weergegeven als het zwart omrande gedeelte.



Figuur 4-18: Significante golfhoogte van station Vlakte v/d Raan, Cadzand en Wielingen voor, tijdens en na de bodemkernen bemonstering in 2023. De meetperiode is weergegeven als het zwart omrande gedeelte.

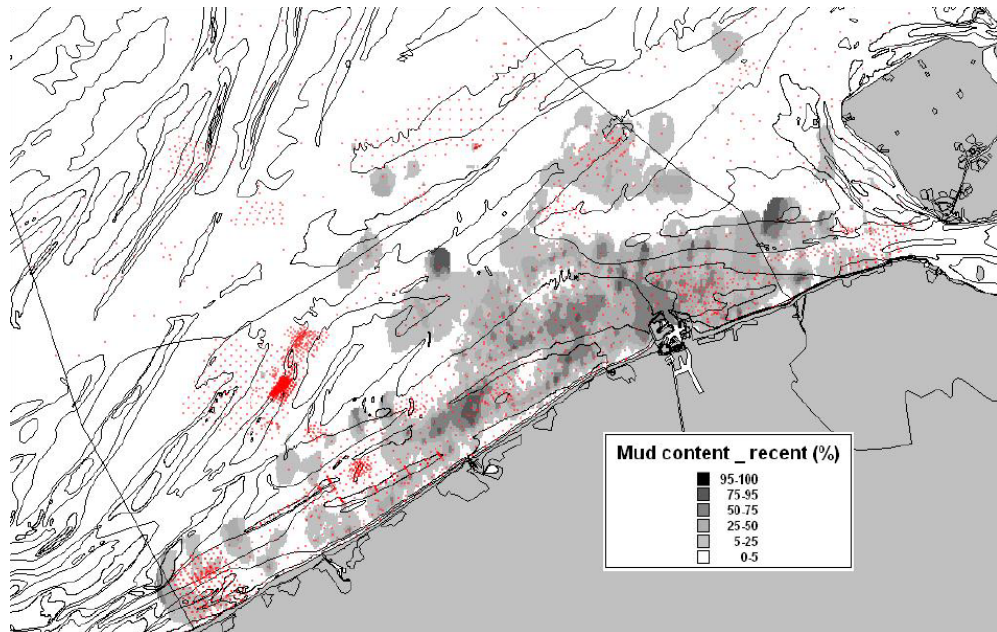
In 2022 en 2023 is de bodemhoogte gemeten van de gehele Schelde-monding in hoge resolutie met behulp van twee multibeam datasets. Figuur 4-19 toont het verschil in bodemhoogte tussen 2022 en 2023. De ondieptes tussen de Spleet en ebschaar en de ebschaar en de Wielingen laten hetzelfde gedrag zien: erosie (blauw) aan de zuidkant en sedimentatie (rood) aan de noordkant van de ondieptes. De locaties waar we de vergelijking tussen 2022 en 2023 hebben gemaakt (locaties: 31, 52, 58 en 76) liggen in het algemeen in het diepe deel van de Spleet en de ebschaar. Deze locaties hebben geen duidelijk erosie- of sedimentatiepatroon, wel zijn er kleine ritmische veranderingen te zien rond de locaties van  $\pm 20$  cm. Het kan zijn dat de migratie van kleine ribbels over de bodem de aanwezigheid van deze zandlaag in de monsters kan verklaren.



Figuur 4-19: Verschil in bodemhoogte tussen 2022 en 2023 o.b.v. de vaklodingen bathymetrie. Rood is erosie, blauw is sedimentatie. Voor visualisatie zijn erosie en sedimentatie patronen begrensd tot 100 cm. Lokaal zijn deze groter.

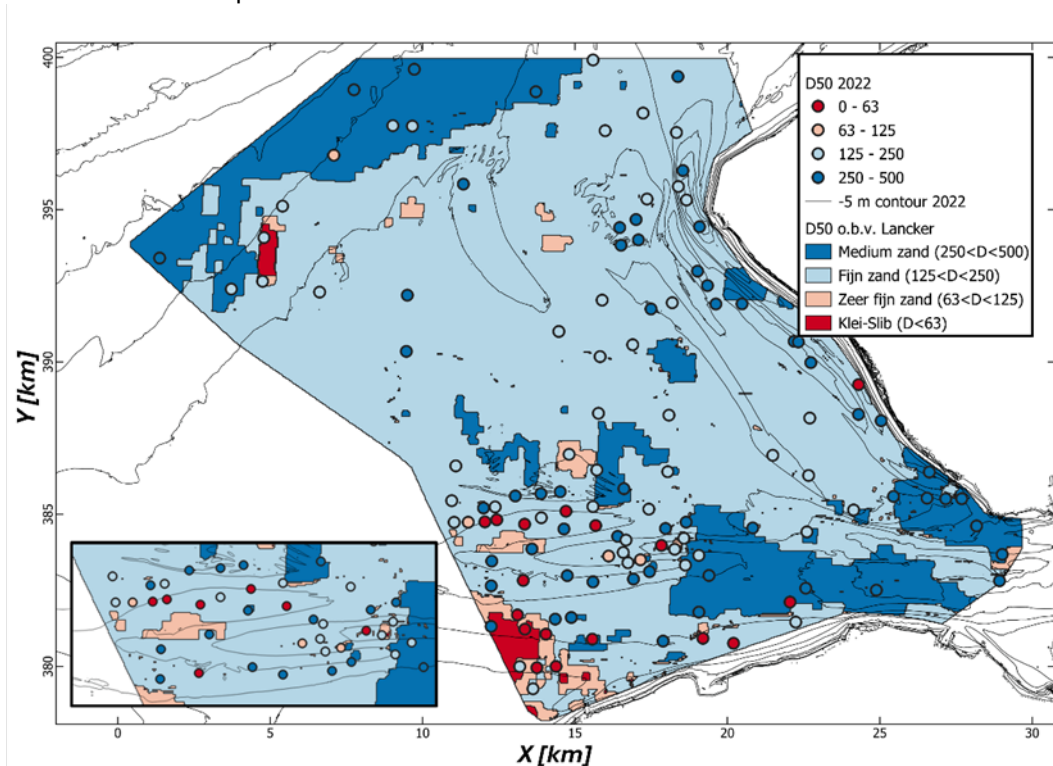
#### 4.4 Vergelijking met andere data sets

Om meer inzicht te krijgen in de verschillen tussen 2022 en 2023 worden de data van de bodemmonsters vergeleken met de data van Van Lancker et al. (2007). Voor dit onderzoek zijn eveneens slibpercentages en mediane korrelgroottes (D50) gemeten voor de Nederlandse en Belgische kust (Figuur 4-20). De punt dichtheid was groter voor de Belgische kust, maar er zijn ook bodemkernen in de Schelde-monding genomen. De puntmetingen zijn in de rapportage van Van Lancker et al. (2007) omgezet naar geïnterpoleerde dekkende kaarten, deze kaarten zijn gedigitaliseerd met georeferencing. Vervolgens zijn de gemeten D50 en slibpercentage van 2022 vergeleken met data van Van Lancker et al. (2007). Deze vergelijking is gedaan om een gevoel te krijgen hoe deze data zich verhoudt tot andere metingen. Voor een fysische interpretatie zijn bijvoorbeeld ook de bodemveranderingen tussen 2007 en 2022 van belang.

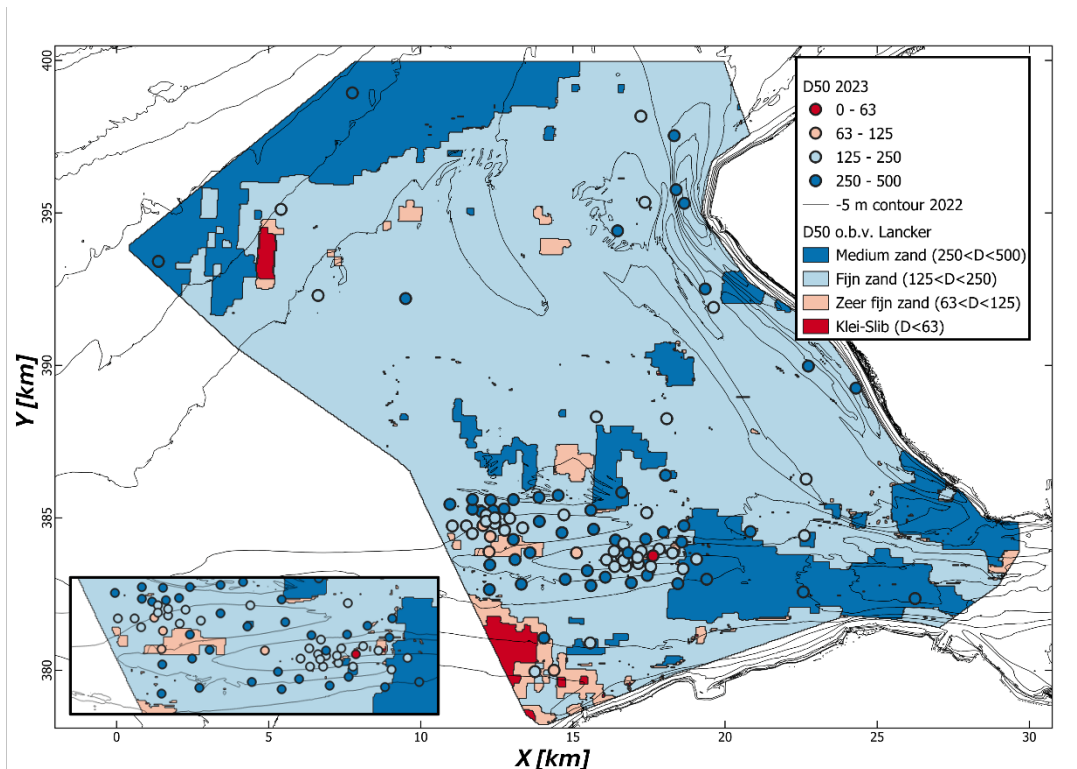


Figuur 4-20: Recente verdeling van slibpercentage van het oppervlakesediment, de rode bollen representeren bodemkernen. Deels overgenomen uit: Van Lancker et al. (2007).

Figuur 4-21 en Figuur 4-22 laten een vergelijking zien tussen de Van Lancker dataset en de bodemmonsters van respectievelijk 2022 en 2023. Voor een groot gedeelte van de Scheldemonding zijn de bodemmonsters in overeenstemming met de Van Lancker dataset. Voor het overgrote deel van de Schelde-monding geldt dat in alle datasets de D50 groter is dan 125  $\mu\text{m}$ . In de ebschaar en Spleet is de D50 substantieel groter in de dataset van Van Lancker (125 – 250  $\mu\text{m}$ ) t.o.v. de 2022 metingen (5 – 125  $\mu\text{m}$ ). De dataset van Van Lancker is meer in overeenstemming met de data van de 2023 metingen waar ook veel van de bodemkernen een D50 van 125 – 250  $\mu\text{m}$  hebben.



Figuur 4-21 Vergelijking D50 bodemmonsters 2022 en 2007 (Van Lancker et al., 2007).



Figuur 4-22 Vergelijking D50 bodemonsters 2023 en 2007 (Van Lancker et al., 2007).

## 5 Morfologie

Dit hoofdstuk beschrijft de uitkomsten van een gedetailleerde analyse van de multibeam metingen. Deze metingen hebben een hoge ruimtelijke resolutie (1 bij 1 m) waarmee het mogelijk is om zandgolven te onderscheiden. De eerste paragraaf zal ingaan op de recente morfologische ontwikkeling en neemt de belangrijkste conclusies van de multibeam meting van 2022 mee zoals beschreven in Van Onselen (2023). De tweede paragraaf beschrijft de analyse van zandgolven met behulp van de bodemvormentoolbox ontwikkeld bij Deltares (Roetert et al., 2017). Aan de hand van de zandgolven wordt het residueel bodemtransport bepaald in Paragraaf 5.3.

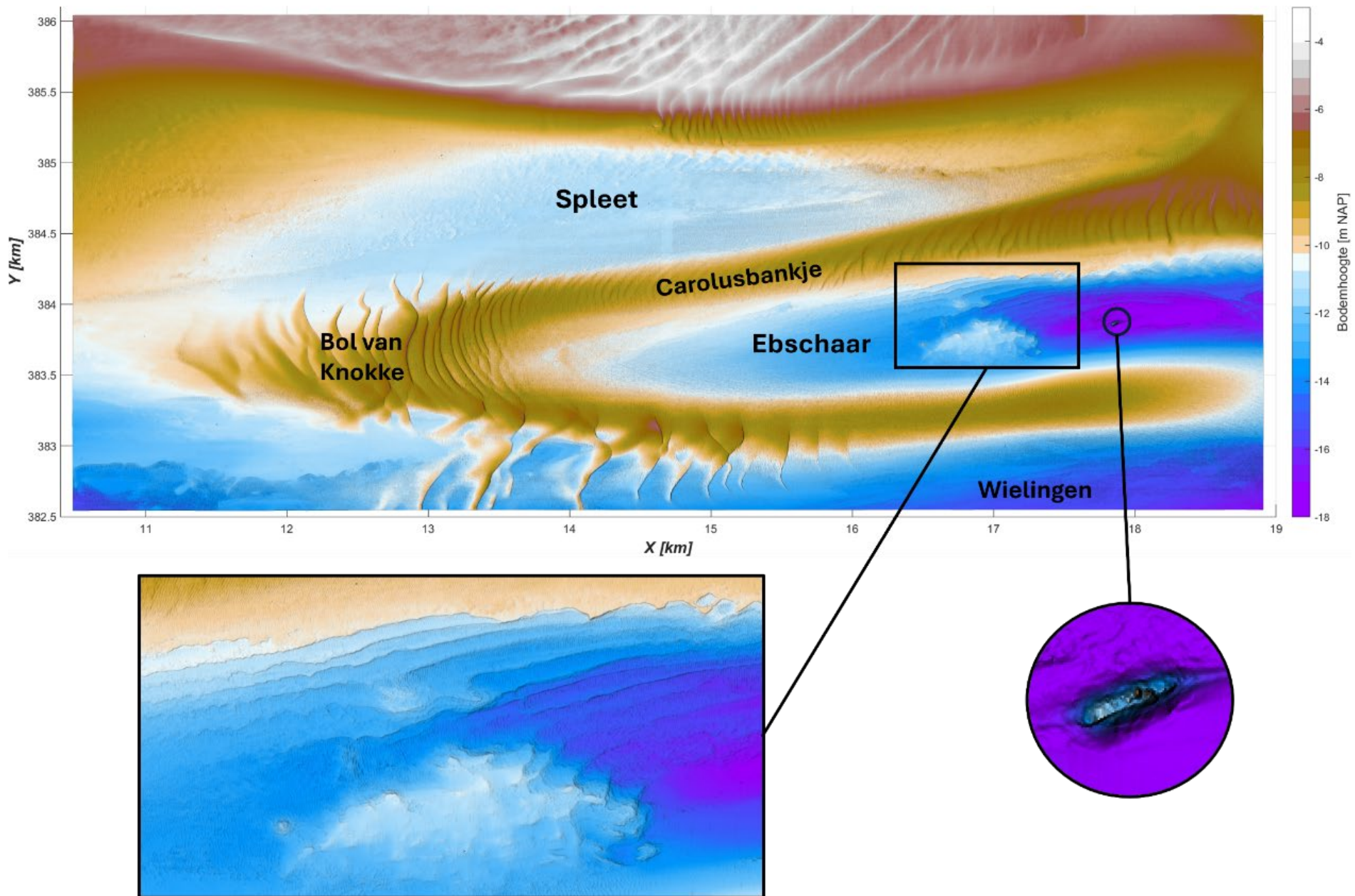
### 5.1 Recente morfologische ontwikkelingen (2022 – 2024)

Deze paragraaf presenteert de belangrijkste morfologische ontwikkeling tussen de eerste en laatste multibeam meting. Daarnaast worden de conclusies gekoppeld aan de resultaten van Van Onselen (2023) die een uitgebreide analyse heeft gedaan voor de multibeam metingen van 2022 en boringen in de ebschaar en spleet.

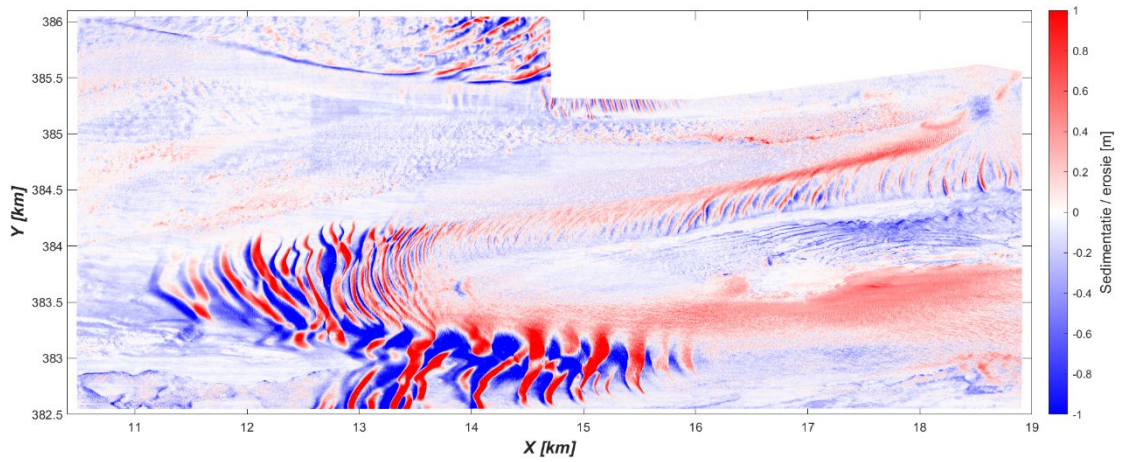
Figuur 5-1 geeft een overzicht van het interessegebied op basis van de 2024 multibeam meting. Op basis van deze bodem, zien we verschillende morfologische elementen die de lokale morfologie beïnvloeden en/of sturen. Het interessegebied bevat in het zuidoosten de aansluiting van de ebschaar met de Wielingen, dit is ook het diepste gedeelte van de ebschaar met een bodemhoogte van ongeveer -18 m NAP. In dit diepste deel ligt een scheepswrak (Garonne - ligt er al sinds 1960) dat een duidelijk hoogteverschil geeft in de bathymetrie. Dit wrak steekt tot 8 m boven de lokale bodem uit.

Van Onselen (2023) beschrijft op basis van boringen en reflectormetingen dat er harde lagen in vrijwel het gehele interessegebied aanwezig zijn. Deze meters dikke kleilagen bepalen voor een belangrijk deel de huidige morfodynamiek in de ebschaar en de Spleet. In Figuur 5-1 zijn op meerdere locaties erosieresistente lagen zichtbaar in de bathymetrie. De erosieresistente lagen in de ebschaar manifesteren zich als 'treden' in de geulwand en als plateaus die in de geulen staan (zie zoom 1 in Figuur 5-1). Aan de rand van de Wielingen (ten zuiden van de Bol van Knokke) zien we de harde lagen soms als onregelmatige erosiepatronen terug.

Figuur 5-2 laat de sedimentatie en erosie zien tussen 2022 en 2024. De grootste verschillen zijn in de gebieden met zandgolven, deze verplaatsen zich over tijd wat op sommige plekken leidt tot sedimentatie en/of erosie tot 3 m. Naast het duidelijke effect van de zandgolven zijn er meer ontwikkelingen te zien. De ondiepte tussen de Wielingen en de ebschaar migreert naar het noorden. Aan de zijde van de Wielingen zien we voornamelijk erosie, terwijl er aan de zijde van de ebschaar voornamelijk sedimentatie plaatsvindt. Dit effect is ook te zien bij het Carolusbankje. Deze erodeert aan de zijde van de ebschaar en sedimenteert aan de zijde van de Spleet, wat leidt tot een noordelijke migratie van de ondiepte.



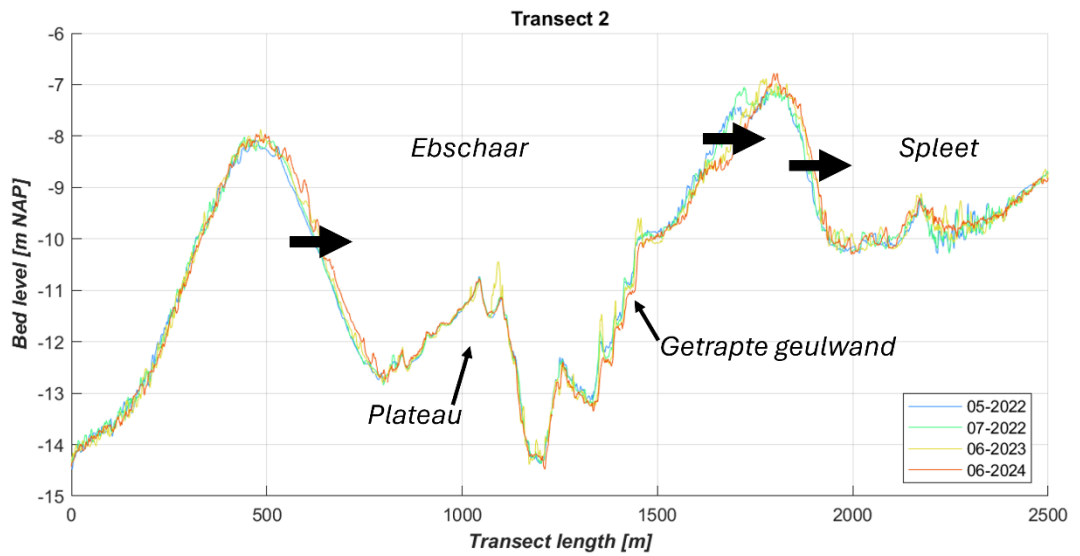
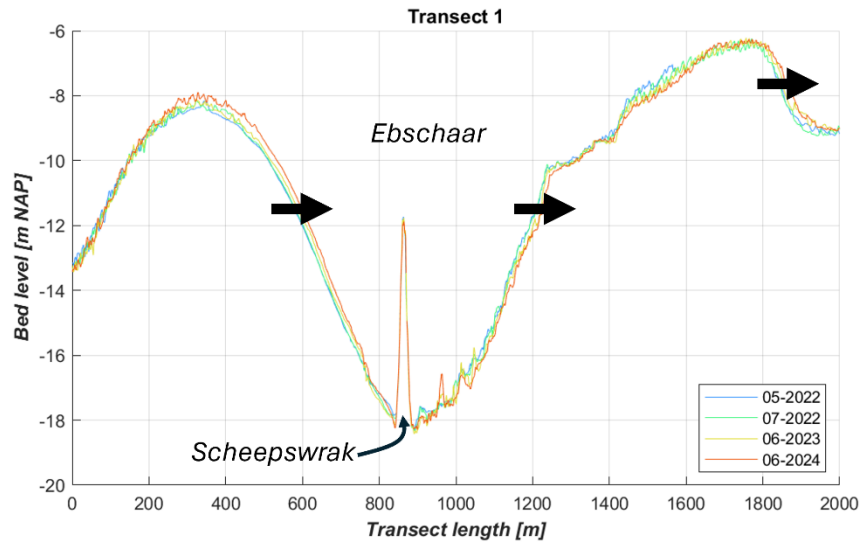
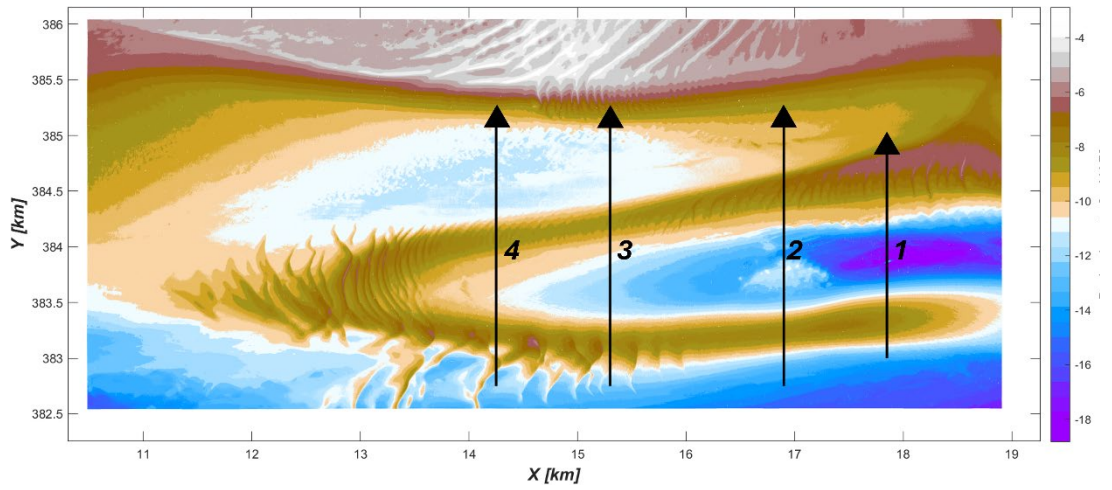
Figuur 5-1: Multibeam 2024 meting van het interessegebied met benaming van de belangrijkste morfologische elementen. Linksonder is een zoom te vinden van zichtbare niet-erodeerbare lagen en rechtsonder is ingezoomd op een scheepswrak.

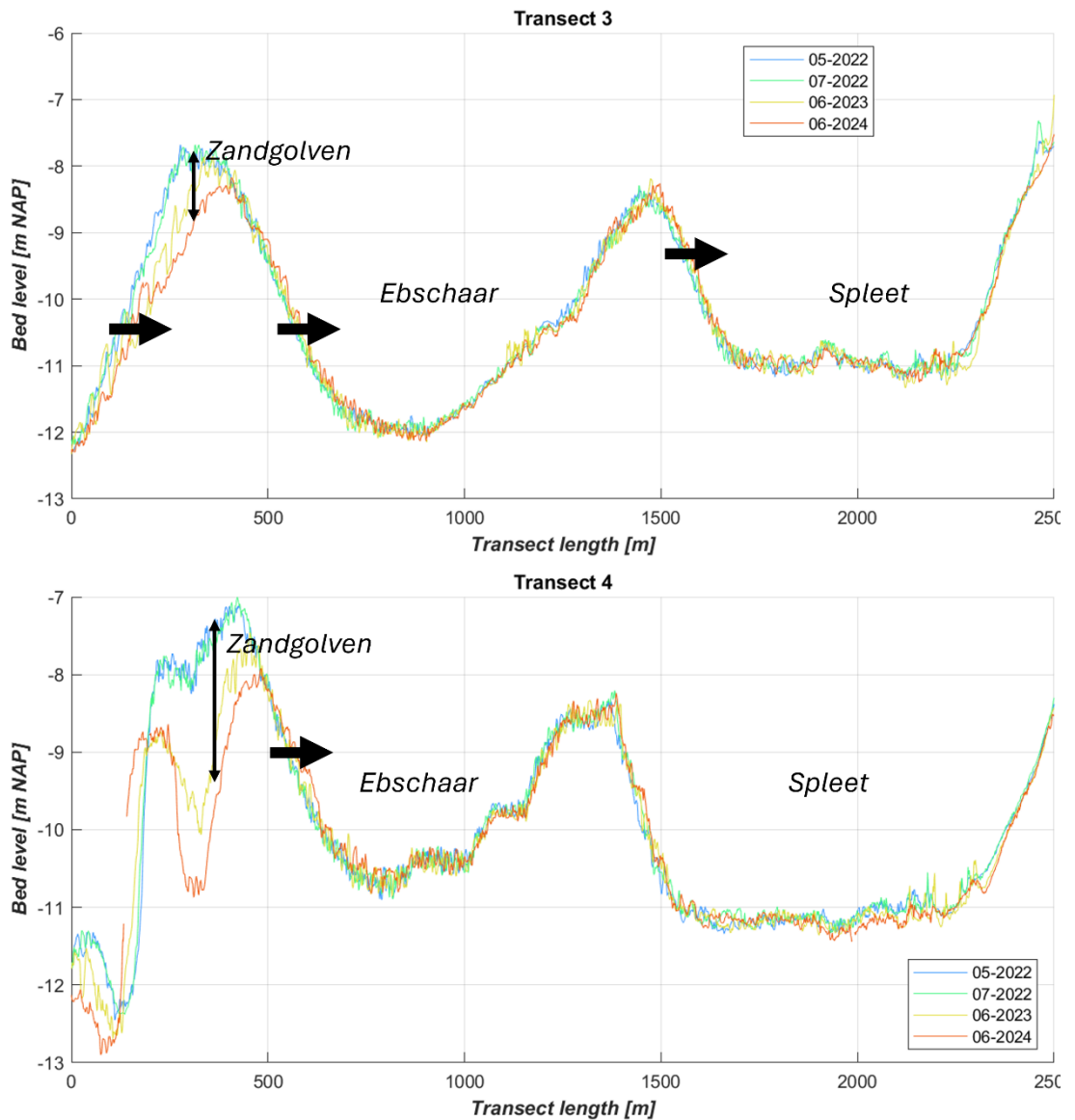


Figuur 5-2: Sedimentatie/erosie tussen 07-2022 en 07-2024.

Deze migratie is ook terug te zien als we raaien door het interessegebied trekken. Figuur 5-3 geeft voor vier raaien de bodemligging weer. De dikke zwarte pijlen geven de netto morfologische veranderingen weer. We zien in raaien 1 en 2 de noordelijke migratie van de ondiepte tussen de Wielingen en de ebschaar en het Carolusbankje. Bovendien is de onnatuurlijke ligging van het scheepswrak ook zichtbaar in raai 1. Raai 2 laat de harde lagen wederom zien, de getrapte geulwand en plateaus steken duidelijk uit in het profiel. De bodem rond het plateau ligt duidelijk vast en er vindt weinig morfologische ontwikkeling plaats. De getrapte geulwand lijkt lichtelijk te eroderen tussen 2022 en 2024.

Raai 3 en 4 liggen westelijk van raaien 1 en 2. Op de ondiepte tussen de Wielingen en de ebschaar is duidelijk de invloed van grote (orde meters) bodemvormen te zien. In raai 3 vindt er nog sedimentatie plaats aan de noordkant van het Carolusbankje, maar raai 4 laat dit niet zien.





Figuur 5-3: Raaien door de ebschaar en Spleet. Panel (1) geeft de locatie van de Raaien o.b.v. de multibeam bathymetrie van 2024. De 4 panels daaronder zijn elk van de raaien. De dikke pijlen geven netto morfologische veranderingen weer. De dunne pijlen geven morfologische kenmerken weer (zandgolven, harde lagen).

## 5.2 Zandgolven

Figuur 5-1 laat zien dat er op verschillende plekken in het interessegebied zandgolven voorkomen. Deze worden geanalyseerd met als doel een beter beeld te krijgen van de bodemdynamiek, ruwheid en netto zandtransporten. Hiervoor wordt eerst uitleg gegeven over het type bodemvormen en vervolgens wordt de methodologie van de toolbox 'bodemvormen' uitgelegd. Paragraaf 5.2.3 geeft vervolgens een analyse van enkele raaien over tijd, deze worden gebruikt als vergelijking en validatie van de bodemvormentoolbox, waarvan de resultaten zijn gepresenteerd in Paragraaf 5.2.4.

### 5.2.1 Bodemvormen classificatie

In ondiepe zeegebieden zoals de zuidelijke Noordzee wordt een groot deel van de zandige zeebodem gekenmerkt door ritmische bodemvormen. Deze morfologische structuren zijn voortdurend in ontwikkeling door de complexe wisselwerking tussen getijstromingen,

sedimenttransport en bodemvormingsprocessen. Bodemvormen worden doorgaans geclassificeerd op basis van hun geometrie (bijv. golflengte en -hoogte) en dynamiek, zoals mobiliteit en oriëntatie (Deltares, 2023). De belangrijkste classificatie is te vinden in Tabel 5-1.

Tabel 5-1: Classificatie van bodemvormen (Deltares, 2023)

| Bodemvorm          | Golflengte  | Golfhoogte | Tijdschaal |
|--------------------|-------------|------------|------------|
| <b>Ribbels</b>     | 0,01-0,1 m  | 0,01-0,1 m | cm/dag     |
| <b>Megaribbels</b> | 0,1-100 m   | 0,1-1,0 m  | cm/dag     |
| <b>Zandgolven</b>  | 100-1.000 m | 1-10 m     | m/jaar     |
| <b>Zandbanken</b>  | 5-10 km     | 10+ m      | stabiel    |

**Ribbels:** ribbels zijn de kleinste bodemvormen, met afmetingen van enkele centimeters in golflengte en hoogte. Hun toppen liggen doorgaans loodrecht (ongeveer 90°) op de dominante getijstrooming. Door hun geringe omvang zijn ribbels niet zichtbaar met standaard multibeam echoloodmetingen. Toch spelen ze een belangrijke rol in de bodemruwheid en het sedimenttransport.

**Megaribbels:** megaribbels zijn groter dan ribbels, met golflengtes van tientallen centimeters tot tientallen meters en hoogtes tot ongeveer 1 meter. De oriëntatie van de toppen is meestal loodrecht op de getijstrooming. Megaribbels zijn dynamisch en kunnen zich snel over de zeebodem verplaatsen.

**Zandgolven:** zandgolven zijn middelgrote bodemvormen met golflengtes tussen 100 en 1.000 meter (Ashley, 1990; van Dijk & Kleinhans, 2005) en hoogtes van meerdere meters (van Dijk & Kleinhans, 2005; Van Santen et al., 2011). Hun toppen liggen doorgaans bijna loodrecht op de stromingsrichting, met een afwijking van ongeveer  $\pm 20^\circ$  (Le Bot, 2001). Zandgolven kunnen worden overlapt door kleinere vormen zoals megaribbels.

**Zandbanken:** zandbanken zijn de grootste bodemvormen, met afstanden tussen de toppen van meerdere kilometers en hoogtes tot enkele tientallen meters. In tegenstelling tot de andere typen liggen zandbanken meestal onder een schuine hoek (~30 graden) ten opzichte van de dominante getijstrooming (Hulscher et al., 1993).

### 5.2.2 Bodemvormentoolbox

Analyse van bodemvormen wordt uitgevoerd voor het Nederlandse continentaal plat om een inschatting te maken voor de stabiliteit van de zeebodem voor windparken op zee. Hiervoor is een toolbox opgezet in Matlab en Python die via een geautomatiseerde routine de bodemvormen kan analyseren en volgen voor verschillende bodemkaarten (Roetert et al., 2017, Deltares, 2023). Deze toolbox is in eerdere studies gebruikt om bijvoorbeeld een indicatie voor netto sedimenttransport te verkrijgen voor San Francisco Bay (Elias et al., 2023). De hoge resolutie multibeam metingen laten ook zien dat er zandtransport plaatsvindt via zandgolven in het gebied van de Spleet en de ebschaar. Om dit zandtransport in kaart te brengen, wordt deze bodemvormentoolbox ingezet.

De analyse van de bodemvormen bestaat grofweg uit drie deelstappen:

1. Bepaling van analyselocaties voor zandgolven;
2. Bepaling van de dynamiek van zandgolven;
3. Bepaling van de afmetingen van zandgolven.

De eerste stap is het bepalen van de analyselocaties voor zandgolven. Allereerst worden de toppen van zandgolven geïdentificeerd, waarna analysepunten worden gedefinieerd langs deze toppen met tussenafstanden van circa 50 tot 100 m.

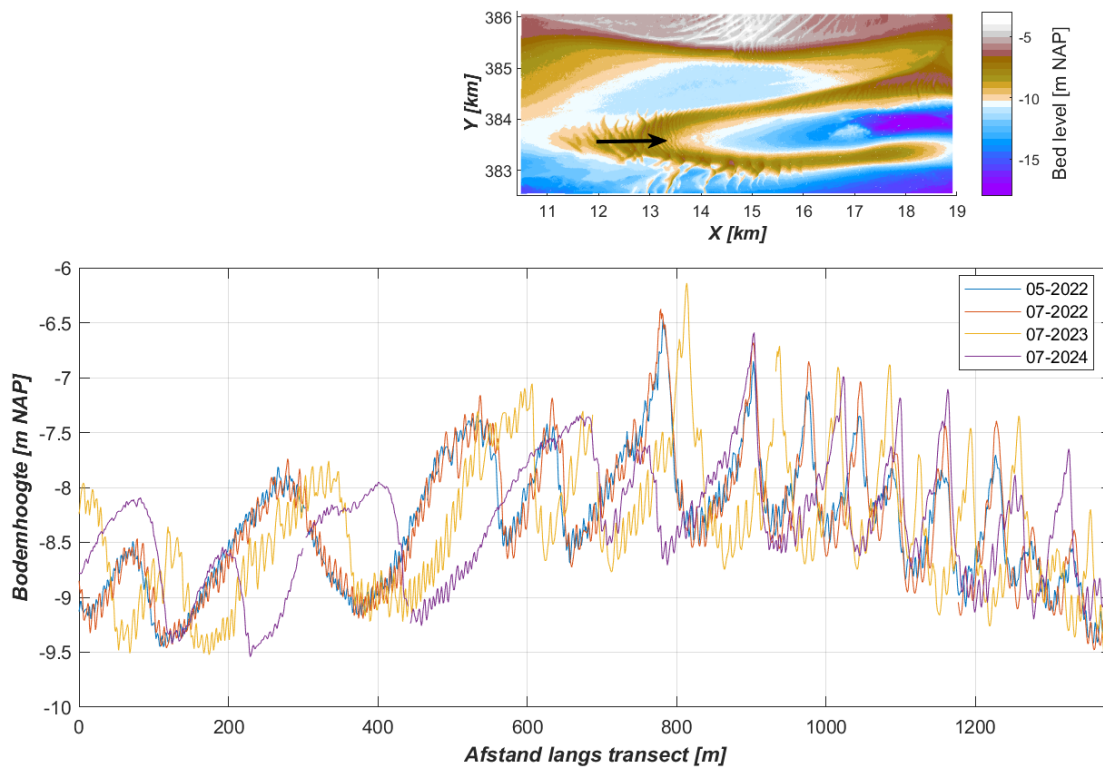
Voor het analyseren van de dynamiek worden alle beschikbare samengestelde bodemkaarten met elkaar vergeleken. Op elk analysepunt worden alle mogelijke combinaties van metingen geanalyseerd om ruimtelijke en – indien twee of meer metingen beschikbaar zijn – temporele variatie vast te stellen. De zandgolfdynamiek wordt geëvalueerd met behulp van een 2D cross-correlatie. Deze techniek berekent de lokale morfodynamiek door horizontale verplaatsingen van bodemvormen tussen verschillende metingen te vergelijken. Op basis van deze methode worden de migratierichting en migratieafstand bepaald voor elk analysepunt. De migratiesnelheid wordt berekend door de afstand te delen door het tijdsverschil tussen de metingen. Voor elk analysepunt en elke vergelijking resulteert dit in een waarde voor richting en snelheid. Indien een of meerdere metingen onvoldoende data bevatten, wordt er geen waarde berekend.

Voor het bepalen van de lengte van zandgolven wordt gebruikgemaakt van een Fourieranalyse, zoals beschreven in Van Dijk (2008). Tijdens de analyse worden raaien getrokken op de eerder gedefinieerde analyselocaties, in de richting waarin de zandgolven migreren. De lengte van elke raai wordt zodanig gekozen dat deze ten minste één volledige zandgolf omvat. Voor elke raai wordt de golflengte bepaald door middel van een Fourier analyse. Hiermee kunnen de verschillende typen bodemvormen uit elkaar worden gehaald, megaribbels kunnen bijvoorbeeld boven op zandgolven staan. De top en het dal van de bodemvorm worden bepaald door de minimale en maximale kromming te bepalen van de raai. De hoogte van een bodemvorm wordt vervolgens bepaald als het verticale verschil tussen de gemiddelde amplitude van twee opeenvolgende dalen en de tussenliggende top. De lengte van een bodemvorm wordt berekend als de horizontale afstand tussen twee dalen. Op basis van de top en dalen wordt ook de horizontale asymmetrie bepaald. De analyse wordt uitgevoerd voor alle beschikbare samengestelde bodemkaarten.

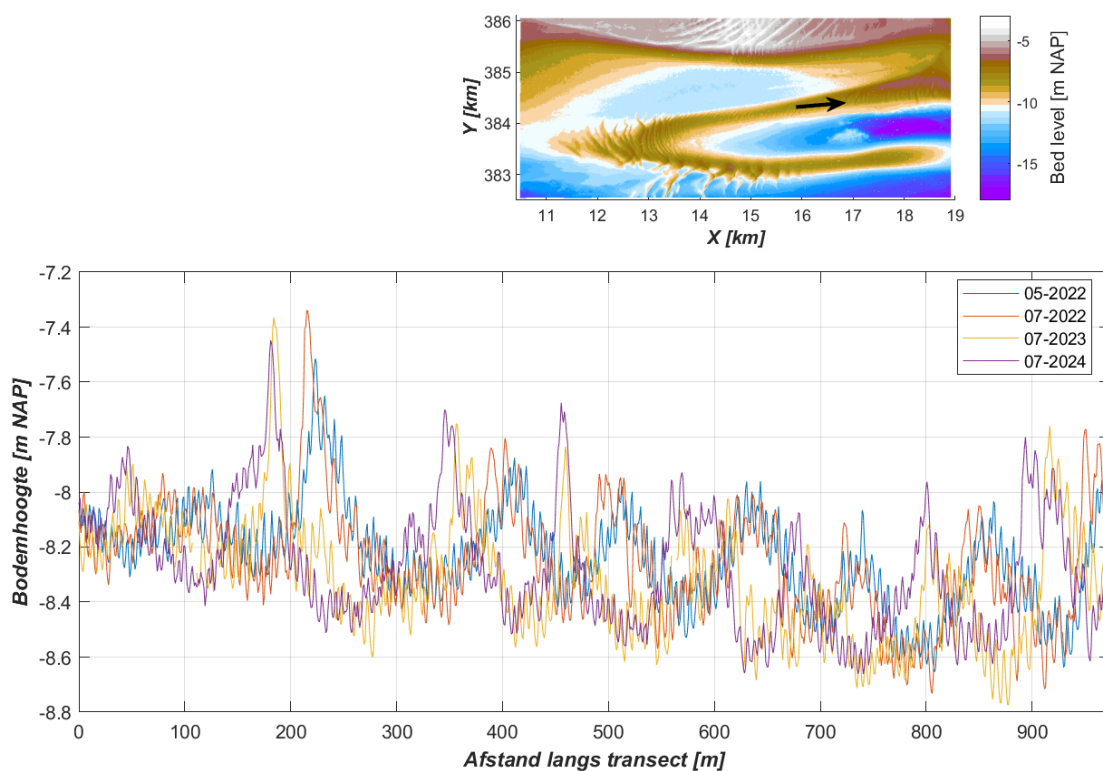
### 5.2.3 Resultaten raaien

Op basis van enkele raaien kunnen we het gedrag van de bodemvormen in het interessegebied in kaart brengen. Figuur 5-4 geeft een raai over de bol van Knokke weer. Hier zijn in de bathymetrie duidelijk bodemvormen weergegeven die een hoogte hebben van ongeveer 2 m. Deze zandgolven zijn in het eerste deel van de raai (0 – 700 m) wat lager en langer en vanaf 700 – 1400 m zijn de zandgolven korter en hoger. De steilheid neemt dus toe richting het oosten. De migratierichting van deze zandgolven is oostwaarts, de blauwe en rode metingen in 2022 liggen ten westen van de meer recente 2023 en 2024 metingen. De migratiesnelheden kunnen oplopen voor de lagere en bredere zandgolven tot 80 m per jaar en voor de hoge en korte zandgolven is dit wat lager, ongeveer 40 m per jaar. Dit is een stuk sneller dan typische migratiewaarden voor zandgolven op het continentaal plat. De individuele bodemvormen zijn duidelijk verschillend en goed te volgen, wat vertrouwen geeft voor een meer geautomatiseerde aanpak voor dit gebied.

Een ander voorbeeld met bodemvormen in het interessegebied is de raai die wordt getrokken over het Carolusbankje (Figuur 5-5). Deze raai laat bodemvormen met een maximale hoogte van 1 m zien, waarbij ook opvalt dat er veel kleinere bodemvormen aanwezig zijn die over de zandgolven bewegen. De focus ligt in dit geval op de grotere zandgolven in dit gebied. Wanneer we kijken naar de migratie zien we een meer oostwaartse migratie van de grotere bodemvormen (b.v. rond 250, 400 en 500 m).



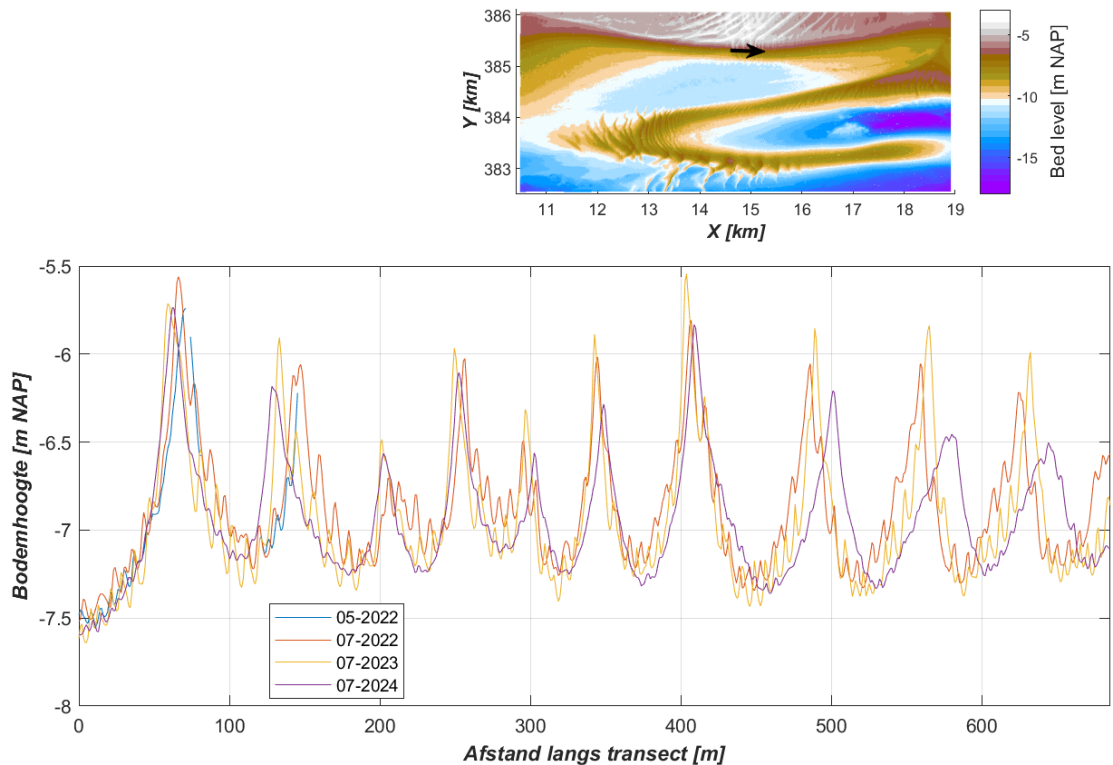
Figuur 5-4: Raai over de bol van Knokke met multibeam bathymetrie van 2022 tot 2024.



Figuur 5-5: Raai over de het Carolusbankje met multibeam bathymetrie van 2022 tot 2024.

De laatste raai die wordt behandeld in deze paragraaf ligt ten noorden van de Spleet, zie Figuur 5-6. Dit deel is niet bemeten in de eerste multibeam meting van mei 2022, maar de drie overige metingen geven voldoende temporele resolutie voor een analyse van de verplaatsingen. In dit gebied hebben de bodemvormen een hoogte van 1,5 tot 2 m, wat ook weer als zandgolven wordt geclassificeerd. Vergeleken met b.v. Figuur 5-4 liggen de

migratiesnelheden een stuk lager. Dit is in de orde van 10-20 m per jaar. Daarnaast is de migratierichting ook niet eenduidig te bepalen voor deze raai. De zandgolven lijken tussen 0 en 200 m meer westwaarts te migreren, terwijl de zandgolven vanaf 300 tot 700 m meer naar het oosten migreren, al zijn deze migratierichtingen subtiel en verschilt de migratierichting soms ook tussen 2022-2023 en 2023-2024.

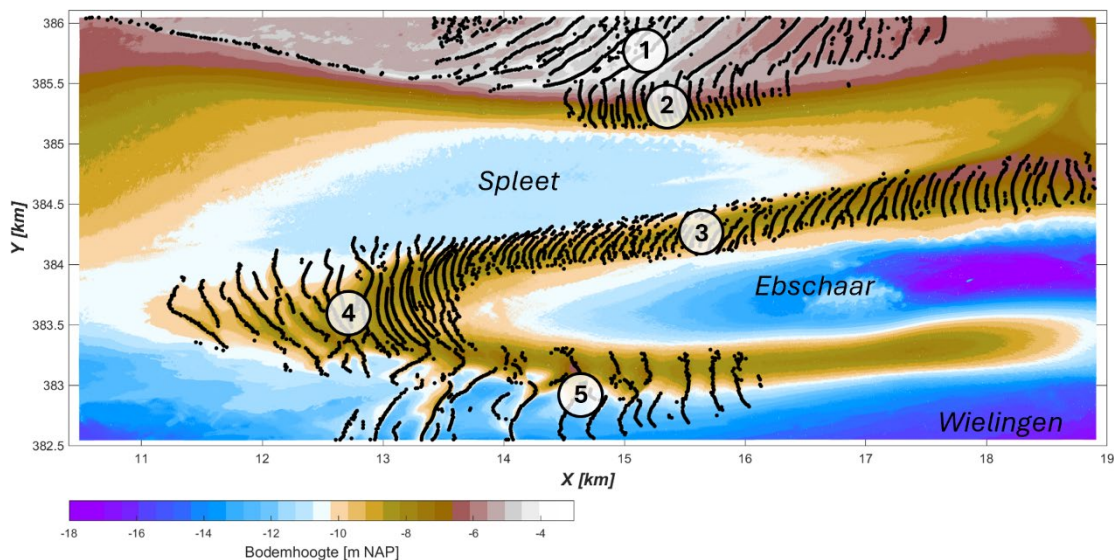


Figuur 5-6: Raai ten noorden van de spleet met multibeam bathymetrie van 2022 tot 2024.

#### 5.2.4 Resultaten bodemvormentoolbox

In deze paragraaf worden de resultaten van de bodemvormenanalyse gepresenteerd. Deze paragraaf focust op de resultaten van zandgolfhoogte, lengte en asymmetrie van de 2024 multibeam bodem, maar is representatief voor de resultaten van 2022 tot 2024. De resultaten voor de andere jaren zijn te vinden in Appendix F. De migratiesnelheid en richting is gebaseerd op alle multibeam metingen.

Figuur 5-7 laat de locaties zien waar het algoritme zandgolven heeft geïdentificeerd op basis van een interval van 50 m. De zandgolven zijn niet in het volledige gebied aanwezig. De zandgolven zijn terug te vinden in 5 deelgebieden, die zijn genummerd in Figuur 5-7. De bepaling van de vijf groepen is op basis van de locatie en hoofdrichting van de zandgolven. De eerste groep ligt aan de noordzijde van de Spleet. De toppen van de zandgolven staan in de richting NW-ZO. De tweede groep is ook te vinden aan de noordzijde van Spleet. Deze zandgolven zijn W-O gericht. De derde groep ligt op de ondiepte tussen de eb- en vloed-schaar (het Carolusbankje), deze zijn ongeveer W-O gericht. De vierde groep ligt tussen de inlaat van de spleet en het einde van de ebschaar en lopen over de Bol van Knokke. De vijfde groep ligt op de ondiepte tussen de ebschaar en de Wielingen. Deze vijf gebieden laten verschillend gedrag zien.

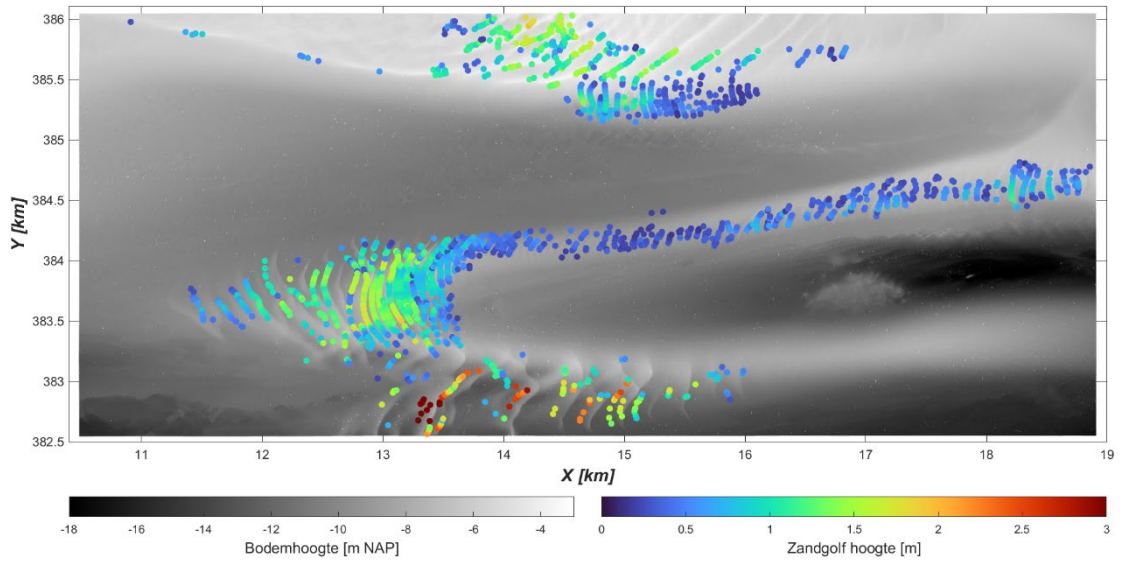


Figuur 5-7: Locaties van zandgolftoppen voor de bathymetrie van 2024.

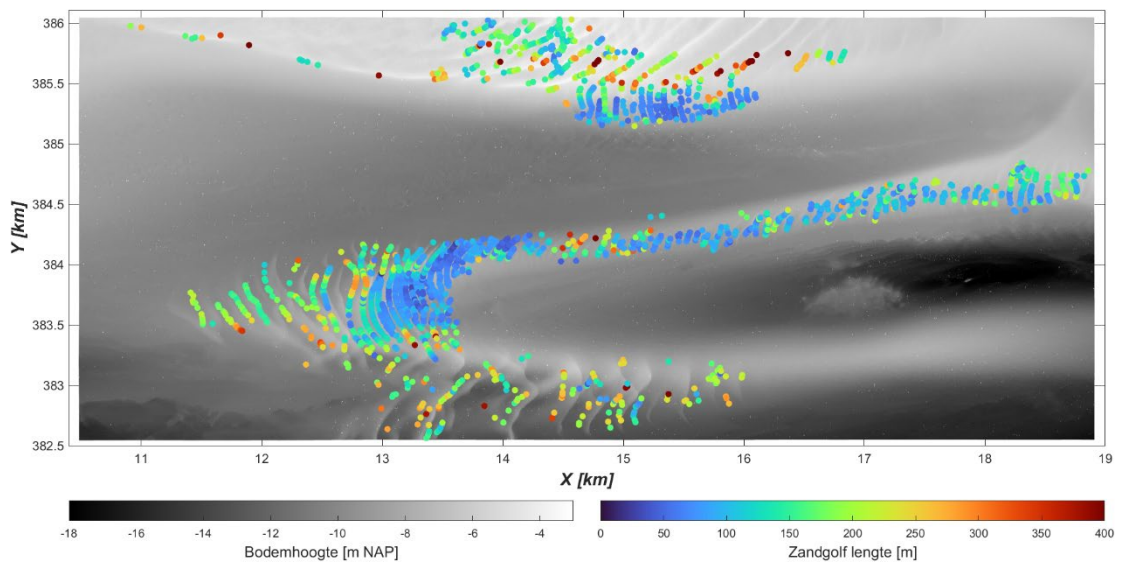
Figuur 5-8 geeft de golfhoogte weer voor de locaties waar zandgolven aanwezig zijn in 2024. Voor het gehele domein varieert de golfhoogte tussen de 0,2 en 3 m. De zandgolven zijn het hoogst in gebied (5), tussen de ebschaar en de Wielingen met golfhoogtes tot 3 m. De bol van Knokke (gebied 4) heeft golfhoogtes in het westen van 0,5 tot 1 m die toenemen naar het oosten waar de golfhoogtes tot 2 m groeien. De kleinste golfhoogtes zijn te vinden op het Carolusbankje (gebied 3) waar golfhoogtes alleen op enkele plekken tot 1 m groeien. In het noorden zijn de golfhoogtes van gebied (1) met een hoogte tussen de 1,5 tot 2 m significant hoger dan het naastgelegen gebied (2) waar golfhoogtes van 0,5 tot 1 m te vinden zijn.

Naast de golfhoogte wordt ook de golflengte berekend van de bodemvormen. Deze zijn te vinden in Figuur 5-9. De golflengte varieert tussen de 50 en 400 m. Hiermee valt een deel van de kleinere golflengtes in de megaribbel klasse (tot 100 m) en het overgrote deel in de zandgolf klasse (100-1000m), zie Tabel 5-1. Een vergelijking tussen Figuur 5-8 en Figuur 5-9 laat zien dat over het algemeen locaties met een hoge golfhoogte vaak ook een grotere golflengte hebben. Al gaat dit niet overal op, in gebied (4), de Bol van Knokke, neemt de golfhoogte richting het oosten toe terwijl de golflengte kleiner wordt, dit betekent dat de golven steiler worden richting het oosten. Dit is ook te zien in Figuur 5-4 waar een raai is getrokken door gebied (4).

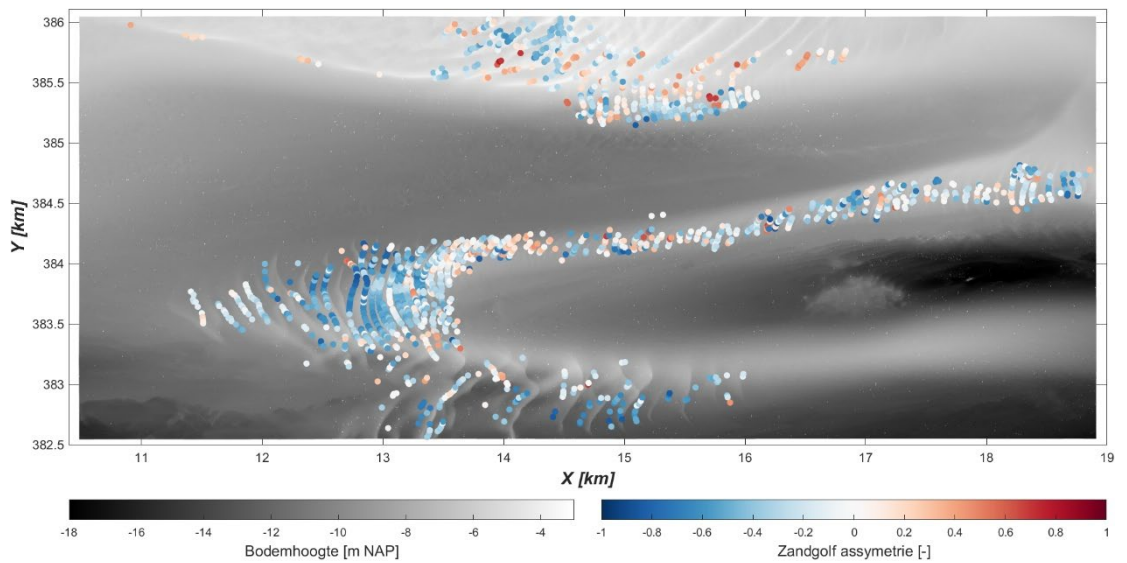
De asymmetrie van de zandgolf wordt berekend door de afstand van dal tot top te delen door de afstand tussen de top en het eerstvolgende dal. Deze ratio wordt vervolgens genormaliseerd tussen de -1 en 1, waarbij 0 betekent dat er geen asymmetrie in de zandgolf aanwezig is. De asymmetrie kan een indicator zijn voor het netto sedimenttransport. Een positieve asymmetrie betekent dat de afstand van dal tot top groter is dan de afstand van de top naar het eerstvolgende dal. Dit betekent voor een raai in de richting west-oost, dat het transport westelijk gericht is. Voor een negatieve asymmetrie is het transport oostelijk. Al kan de asymmetrie ook beïnvloed worden door de fase in het getij (bij kleinere bodemvormen) en de helling van de bodem. Daarom gaan we niet al te diep in op de resultaten van de asymmetrie, maar gebruiken we de migratiesnelheid van de 2D cross correlatie. We zien dat over het algemeen de asymmetrie bij de bol van Knokke (gebied 4) en de ondiepte naast de Wielingen (gebied 5) negatief is terwijl de asymmetrie op het Carolusbankje en in het noorden gedeeltelijk positief is, wat een omgekeerde richting betekent.



Figuur 5-8: Zandgolffhoogte berekend door de bodemvormentoolbox voor de bathymetrie van 2024.



Figuur 5-9: Zandgolff lengte berekend door de bodemvormentoolbox voor de bathymetrie van 2024.

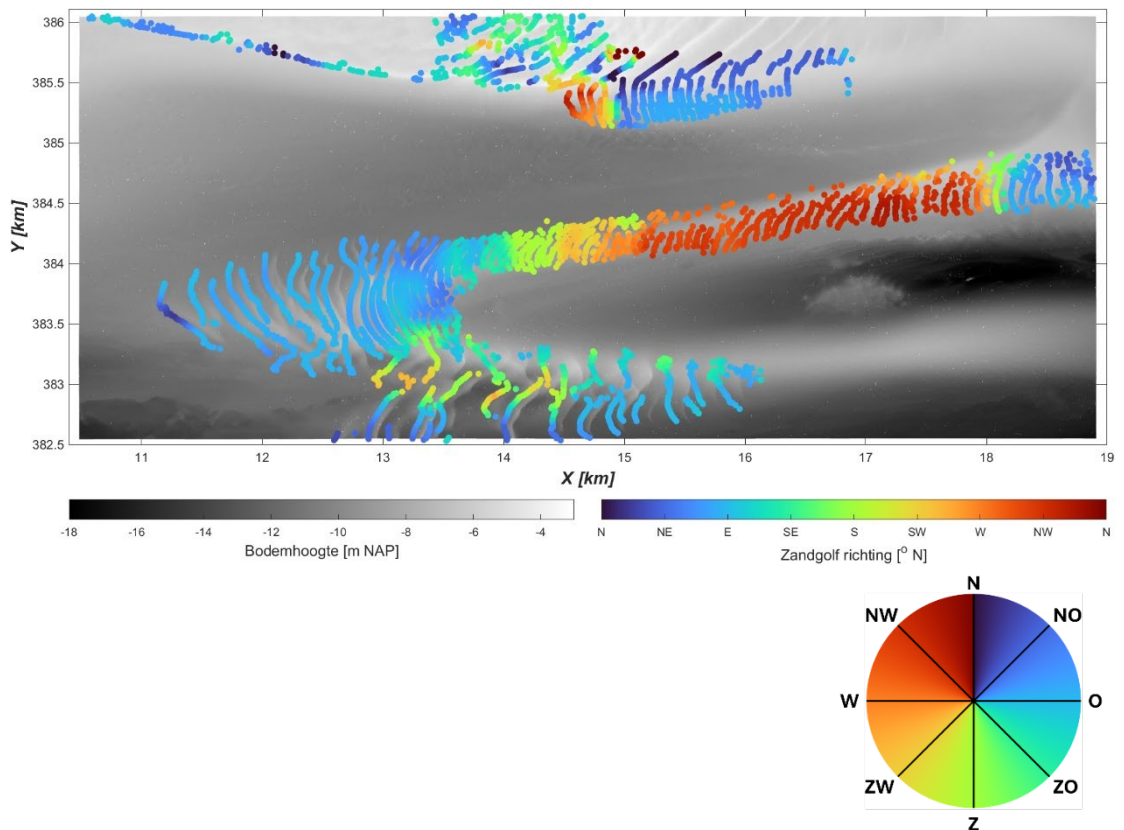


Figuur 5-10: Zandgolff assymetrie berekend door de bodemvormentoolbox.

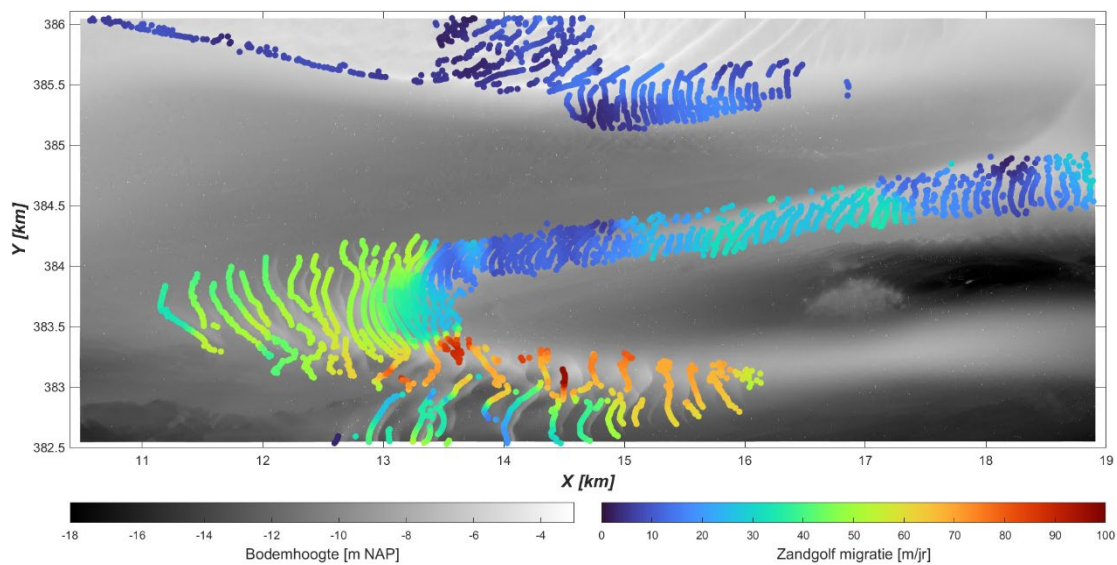
Voor het bepalen van de netto migratierichting gebruiken we niet de asymmetrie van de bodemvormen, maar de migratierichting en -snelheid bepaald met de cross correlatie van de verschillende bodems. Figuur 5-11 en Figuur 5-12 laten respectievelijk de gemiddelde zandgolf migratierichting en migratiesnelheid zien op basis van de cross correlatie. De verschillende gebieden laten verschillend gedrag zien voor de analyse. Wanneer de migratiesnelheden erg klein worden (<10 m/jaar) wordt de richting in de analyse ook meer variabel en is deze niet betrouwbaar.

In gebied (1) in het noorden is de netto migratierichting oostelijk tot zuidoostelijk met kleine migratiesnelheden van 10 tot 20 m per jaar. Gebied (2) in het noorden laat een divergentie zien van zandgolfmigratie. In het westen (Xrd 14,5 tot 15 km) bewegen de zandgolven in westelijke richting, terwijl de zandgolven oostelijk daarvoor (Xrd 14 tot 16,5 km) in oostelijke richting migreren. De migratiesnelheden liggen in dit gebied tussen de 10 en 20 m per jaar. Deze migratiesnelheden zijn relatief klein wanneer we ze vergelijken met andere gebieden. Op het Carolusbankje (gebied 3) zijn de migratiesnelheden over het algemeen westelijk tot noordwestelijk gericht met een migratiesnelheid van 30 tot 40 m. De zandgolven hebben een richting waarbij ze gedeeltelijk van het Carolusbankje af migreren, dan verdwijnen de bodemvormen.

Bij de Bol van Knokke (gebied 2) is de migratierichting oostelijk gericht en migreren de zandgolven met een snelheid tussen de 40 en 80 m per jaar. Op de bol van de Knokke neemt de migratiesnelheid af richting het oosten. Waar de bol van de Knokke en het Carolusbankje samenkomen is een convergentiepunt van zandgolven te vinden. De migratiesnelheid in dit gebied is heel laag bij dit convergentiepunt. Tussen de ebschaar en Wielingen vinden de grootste migratiesnelheden plaats tot 100 m per jaar. De migratierichting is over het algemeen oostelijk gericht.



Figuur 5-11: Zandgolf migratierichting berekend door de bodemvormentoolbox, de migratierichting is weergegeven in de roos.



Figuur 5-12: Zandgolf migratiesnelheid berekend door de bodemvormingtoolbox.

## 5.3 Residueel bodemtransport

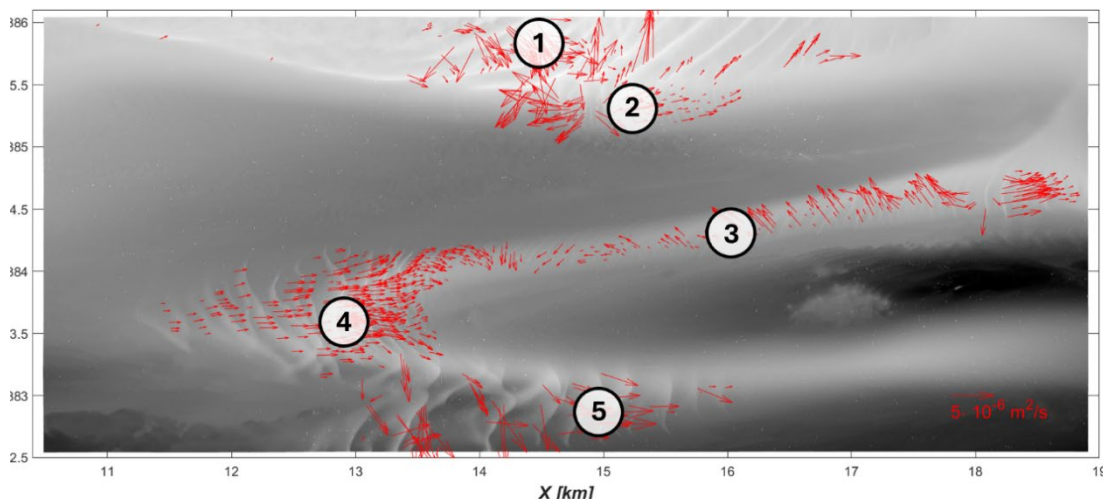
Op basis van de golfhoogte, de migratiesnelheid en de migratierichting kunnen we een benadering van het netto bodemtransport berekenen. We gebruiken hiervoor de Vergelijking 5-1, zoals bepaald in Hoekstra et al. (2004). De vormfactor is een kalibratieparameter en is in verschillende studies bepaald tussen de 0,36 en 0,71. Voor deze studie gebruiken we 0,6 wat in veel studies terugkomt (Hoekstra et al., 2004).

$$q_b = f \cdot c \cdot H \quad (5-1)$$

- $q_b$ : Netto bodemtransport (per eenheid van breedte) [m<sup>3</sup>/m/s]  
 $f$ : Vormfactor ( $\approx 0,6$  voor zandgolven)  
 $c$ : Migratiesnelheid [m/s]  
 $H$ : Golfhoogte [m]

Het netto bodemtransport is in de richting van de netto migratiesnelheid zoals bepaald in Figuur 5-11. Figuur 5-13 laat de netto bodemtransporten zien op basis van Vergelijking 5-1 met de zandgolfhoogte van 2024 en de gemiddelde migratierichting. In dit geval is de golfhoogte van 2024 ook representatief voor de andere jaren, er zijn geen grote verschillen wanneer golfhoogtes van 2022 of 2023 wordt gebruikt. Voor de interpretatie van de netto sedimenttransporten wordt er grootschalig naar de richting en magnitude gekeken in plaats van het verklaren van individuele punten, daarvoor is de analyse te gevoelig.

Op de Bol van Knokke is het netto sedimenttransport oostelijk gericht. Dit buigt om de ebschaar en richting het Carolusbankje (gebied 3) en de ondiepte tussen de ebschaar en de Wielingen (gebied 5). Over het algemeen is het netto bodemtransport op de ondiepte (gebied 5) ook oostelijk gericht. Sediment wordt vanaf het westen aangevoerd en verplaatst via de zandgolven richting het oosten. Het Carolusbankje zelf vertoont een totaal ander sedimenttransport: de bodemtransporten over het bankje zijn over het algemeen westelijk tot noordwestelijk gericht. Ten oosten van het Carolusbankje zijn de netto transporten weer oostelijk gericht, dit leidt tot een divergentiepunt. In het noorden (gebied 1) is er geen duidelijke netto transportrichting te bepalen. In gebied (2) dat er een divergentiepunt te zien, waarbij de netto transportrichting voor het westelijke deel westelijk gericht is en voor het oostelijke deel ook oostelijk gericht is.



Figuur 5-13: Netto bodemtransportvectoren op basis van berekende bodemtransporten en migratierichting van zandgolven.

# 6 Synthese

## 6.1 Data beschikbaarheid

Dit datarapport bevat een overzicht van alle metingen die uitgevoerd zijn in de Schelde-monding ter voorbereiding van de kustfundamentsuppletie die in de zomer van 2025 is aangelegd. Het gaat hierbij om metingen die gebruikt kunnen worden voor het systeembegrip en de T0 analyse voor het zuidelijke deel van de Vlakte van de Raan. Dit rapport geeft een overzicht en analyse van de belangrijkste hydro-morfologische metingen die zijn uitgevoerd tussen 2022 en 2025:

- Varende ADCP raaien: 3D stroomsnelheid, debiet en sedimentconcentraties, sedimentflux
- ADCP frames: 3D stroomsnelheid
- Bodemkernen: bodemsamenstelling
- Multibeam: morfologische veranderingen en bodemvormen
- Profielmetingen: saliniteit, temperatuur, turbiditeit, chlorofyl

Alle beschreven data in Hoofdstuk 2.1 samen met de bijbehorende rapportages en opwerking van de data die beschrijven is in Hoofdstuk 2.2 zijn op te vragen bij Rijkswaterstaat.

## 6.2 Uitkomsten van de analyses

### 6.2.1 Varende ADCP raaien

In 2022 en 2023 zijn 2 raaien bemeten in het zuidelijke deel van de Vlakte van de Raan, door de ebschaar en Spleet. Aan de hand van de stroommetingen konden de piek eb- en vloedstromingen en het totale debiet door de raai worden bepaald. Omdat de metingen in het geval van raai 2 geen volledige getijcyclus bevatten en de intervallen tussen de metingen op kunnen lopen tot 1,5 uur is er geen harde conclusie te maken over eb- en vloeddominantie. Voor de totale debieten door de ebschaar en de Spleet geldt dat het piek vloeddebet hoger is dan het piek ebdebet. Aan de hand van de backscatter van de stroommetingen, kon een inschatting gemaakt worden van de concentraties. De concentraties namen toe met hogere snelheden, maar waren zelfs tijdens piek eb- en vloedcondities laag (tot 0,09 g/l). Doordat de concentraties zo laag zijn, kunnen achtergrondeffecten een significante rol spelen in de concentratiemetingen. De concentraties zijn over het algemeen hoger tijdens eb dan vloed. Daardoor is de sedimentflux hoger tijdens eb dan vloed, wat leidt tot een netto eb transport.

### 6.2.2 ADCP frames

Twee sets van vijf frames zijn uitgezet in de ebschaar en Spleet in respectievelijk 2023 en 2024. Op basis van het gemiddelde van de natte cellen kon de dieptegemiddelde stroomsnelheid bepaald worden. Het effect van het missen van de 1,5 m bij de bodem blijkt klein te zijn (3-5% overschatting van de dieptegemiddelde snelheden). Voor de vijf frames in de Spleet waren de piek vloodsnelheden gedurende de meetperiode bijna altijd hoger dan de piek ebsnelheden. Dit komt overeen met de debietmetingen, hierbij waren de piekvloodsnelheden tijdens de meting ook hoger dan de piek ebsnelheden. Alleen tijdens doottij was er soms sprake van een hogere ebsnelheid dan vloodsnelheid. Bovendien versterkte de vloeddominantie met een hogere getijslag (correlatiecoëfficiënt:  $\rho \approx 0,5$ ). Met een hogere getijslag waren de vloodsnelheden flink hoger dan de ebsnelheden, wat leidt tot een hogere vloeddominantie. Dit is gedrag wat over het algemeen wordt gezien in een vloodschaar zoals de Spleet.

Voor een standaard ebschaar wordt verwacht dat de piek ebsnelheden over het algemeen hoger liggen dan de piek vloednelheden. Maar in deze ebschaar laten de metingen gemiddeld een hogere vloednelheid dan ebsnelheid zien. De snelheden uit de debietmetingen laten wel hogere piek ebsnelheden zien dan piek vloednelheden, dit komt dus niet met elkaar overeen. Wel hebben de debietmetingen gemiddeld één meting per 40 min met uitschieters tot 1,5 uur. Hier mist dus ook snelheidsdata voor een volledig beeld. De correlatie tussen vloeddominantie en getijslag is in de ADCP frames minder sterk tot niet aanwezig. Er zijn in de ebschaar meer getijden waarbij de piek ebsnelheid hoger ligt dan de piek vloednelheid, ook met een hoge getijslag. Voor de ebschaar lijkt de asymmetrie een relatie te hebben met de waterstandsopzet en wind. Bij een hogere waterstandsopzet is er vaker sprake van een getij met hogere piek ebsnelheden dan piek vloednelheden ( $\rho \approx 0,25$ ). Deze hogere waterstandsopzet gaat vaak samen met (harde) wind uit het noordwesten tot noorden. De reststroming laat een verschil zien voor de Spleet en ebschaar. In De ebschaar heeft een reststroming in de ebrichting terwijl de Spleet een reststroming heeft in de vloedrichting.

### 6.2.3 Profielmetingen

In 2022 tot 2025 zijn er op negen plekken in de Schelde-monding profielmetingen genomen om een indicatie te krijgen van de ruimtelijke variabiliteit van saliniteit en temperatuur. Over het algemeen is er weinig saliniteits- en temperatuurstratificatie; de variëteit over de waterkolom is klein. Op de meetpunten in de Wielingen is een maximaal verschil in saliniteit tussen de boven- en onderkant van 2 ppt en geen verschil in temperatuur. De saliniteit van de meetlocaties in de Wielingen is over het algemeen ook wat lager dan de locaties op de Vlakte van de Raan (1-4 ppt). De oorzaak zou kunnen komen door de lagere waterdiepte op de Vlakte van de Raan of mindere uitwisseling met een iets zoetere Westerschelde. Saliniteit en temperatuur wijken in beide gevallen af van het vaste meetstation Vlakte van de Raan. Voor saliniteit gaat het om een afwijking van 0,5 tot 3 ppt en voor temperatuur om 0,1 tot 0,7 °C. De reden voor dit verschil is niet duidelijk. Over het algemeen lijken de profielmetingen wel in overeenstemming met elkaar te zijn.

### 6.2.4 Bodemkernen: sedimentsamenstelling

In 2022 en 2023 zijn er elk jaar ongeveer 100 bodemkernen bemonsterd in de Schelde-monding en specifiek bij het interessegebied rond de ebschaar en de Spleet. Over het algemeen is de Vlakte van de Raan zandig. Verder laten de bodemkernen verschillende resultaten zien voor de twee jaren in het gebied van de Spleet en ebschaar. De metingen van 2022 in het interessegebied zijn over het algemeen slibrijker en hebben een lagere D50 dan de metingen in 2023. Dit is een significant verschil met slibpercentages die tientallen procenten zijn afgenomen en D50 waarden die tot 100  $\mu\text{m}$  zijn toegenomen. Vergelijking van foto's van de bodemkernen laten duidelijke verschillen zien voor dezelfde locatie tussen 2022 en 2023, de reden lijkt een zandpakket op de kleilaag te zijn die er in 2022 niet is en in 2023 wel. Er zijn verschillende mogelijkheden die deels een verklaring kunnen geven voor deze flinke veranderingen. Allereerst is dit een gebied met veel bodemvormen, ook kleine bodemvormen van orde 10 cm. Deze bodemvormen lijken op een harde kleilaag te liggen. Het zou kunnen dat deze bodemvormen soms aanwezig zijn op de bodem en soms niet. Een andere verklaring zou het verschil in golfintensiteit tussen 2022 en 2023 zijn. 2022 had voor de meetperiode een intensievere periode met hogere golfhoogtes. Maar beide verklaringen zijn niet sluitend om het verschil te duiden.

### 6.2.5 Multibeam

Er zijn vier hoge resolutie (1 bij 1 m) multibeam metingen gedaan van het interessegebied tussen 2022 en 2024. De multibeam resultaten laten een trend zien in de erosie en sedimentatie in het interessegebied. Over het algemeen migreert de ondiepte tussen de Wielingen en de ebschaar en het Carolusbankje (ondiepte tussen de ebschaar en Spleet) richting het noorden met erosie aan de zuidzijde en sedimentatie aan de noordzijde. Harde

lagen beperken de morfologische ontwikkeling van de ebschaar en Spleet. Dit is terug te zien aan plateaus, getrapte geulwanden en onregelmatige erosiepatronen. Tegelijkertijd zijn er zandgolven aanwezig in dit gebied. Over het algemeen vindt er oostelijk transport (in de vloedrichting) plaats over de Bol van Knokke naar de ondiepte tussen de ebschaar en Wielingen. De zandgolven op het Carolusbankje migreren in noordwestelijke richting, wat overeenkomt met sedimentatie- en erosiepatronen van het Carolusbankje.

De debietmetingen van raai 2 en 3 geven ook een indicatie van suspensief transport in de Spleet en ebschaar, in beide gevallen is dit eb gericht door de hogere concentraties tijdens eb dan vloed. Dit komt niet overeen met de netto bodemtransporten van de multibeam metingen. Wel zijn er vraagetekens bij de kwaliteit van de sedimentconcentratie metingen, omdat de concentraties die zijn bepaald o.b.v. de backscatter zo laag zijn (tot maximaal 0,09 g/L).

### 6.2.6 Integratie en interpretatie

Er is ter voorbereiding op de suppletie onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van het zuidelijk gedeelte van de Vlakte van de Raan in Van der Werf et al. (2021). In dit onderzoek werd ook gekeken naar het ontstaan van de ebschaar tussen 1964 en 2020. Van der Werf et al. (2021) vat de ontwikkeling als volgt samen:

*Deze ebschaar is, anders dan gebruikelijk is voor een ebschaar, relatief recht van vorm en stabiel qua ligging. Dit is zeer waarschijnlijk voor een deel gekoppeld aan de moeilijk-erodeerbare lagen aan het bodemoppervlak die ook de noordelijke uitbreiding de laatste jaren tot een halt lijken te brengen. Als hypothese stellen we dat de ebschaar niet zozeer ontstaan is door het insnijden door de ebstroming, maar door het opbouwen van een zuidelijk gelegen bank in de vloedrichting.*

De metingen in de ebschaar in dit onderzoek laten twee tegengestelde mechanismen zien die beide effect hebben op de (netto) sedimenttransporten in de ebschaar. Volgens de analyse van de ADCP frames in de ebschaar zijn gemiddeld de piekvloedsnelheden groter dan de piekebsnelheden. Aan de andere kant is de reststroming in de ebschaar ebgericht.

Verder laat het onderzoek van Van Onselen (2023) en de multibeam metingen van 2022 tot 2024 duidelijke kenmerken zien van harde lagen die de morfologie sturen. Plateaus, getrapte geulwanden en onregelmatige erosiepatronen hebben een direct effect op de morfologie. Boven deze harde lagen bevindt zich op sommige plekken een zandpakket waarop bodemvormen aanwezig zijn. Dit zandpakket boven een kleilaag is soms ook terug te zien in de bodemkernen die genomen zijn in het interessegebied. De bodemvormen laten een netto transport zien vanuit de Bol van Knokke richting het oosten, naar de ondiepte tussen de Wielingen en de ebschaar. Dit versterkt de hypothese dat deze ondiepte is ontstaan door het uitbouwen van een bank vanuit de bol van Knokke richting het oosten (vloedrichting).

## 6.3 Vervolgonderzoek

In van der Heijden et al. (2021) zijn de hoofdvragen bepaald over het functioneren van de Schelde-monding en het effect van de suppletie. Vervolgonderzoek in het Scheldemondingsproject is gericht op de beantwoording van deze vragen. We voorzien de volgende stappen binnen dit onderzoeksproject:

- De suppletie is aangelegd in september en de eerste multibeam metingen (maandelijks) zijn gemaakt. De ontwikkeling van de suppletie zal gemonitord worden om meer inzicht te krijgen in de levensduur van de suppletie en spreiding van het sediment.
- De T0 meetcampagnes bevatten belangrijke en relevante validatiedata voor modellen in de Schelde-monding. Met deze modellen kunnen vragen over de belangrijkste processen voor de ontwikkeling van de suppletie en de ontwikkeling van het gehele

interessegebied beter beantwoord worden. In de toekomst kan de volumeontwikkeling van de suppletie ook gebruikt worden als validatiedata.

- Dit rapport geeft inzicht in enkele belangrijke processen in het zuidelijk gedeelte van de Vlake van de Raan. De (ongebruikte) data zal gebruikt worden voor een beter systeembegrip. Er zijn bijvoorbeeld nog vragen over de grote verschillen tussen de bodemsamenstelling in 2022 en 2023 of het netto sedimenttransport in de ebschaar. Hierbij kan de combinatie van data-analyse met een numeriek model helpen.

## 7 Bibliografie

- Ashley, G. M. (1990). Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Research*, 60(1), 160-172.
- Berg, J., Asselman, Nathalie & Ruessink, Gerben. (2009). Hydraulic Roughness of Tidal Channel Bedforms, Westerschelde Estuary, the Netherlands. 10.1002/9781444304138.ch2.
- Bijlsma, A. & Eelkema, M. (2021). *13-uursmeting Raai 14: Raaisegment 14-1*. Aqua Vision BV.
- Bijlsma, A. & Eelkema, M. (2021). *13-uursmeting Raai 14: Raaisegment 14-2*. Aqua Vision BV.
- Bijlsma, A. & Eelkema, M. (2021). *13-uursmeting Raai 14: Raaisegment 14-3*. Aqua Vision BV.
- Le Bot, S. (2001). *Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement. Exemple du Pas-de-Calais* (Doctoral dissertation, Université des Sciences et Technologies de Lille).
- Van Cauwenberghe, C., Dekker, L. & Schuurman, A. (1993). *M2 tidal reduction method for coastal zones*. Hydrografische Dienst der Kust
- Collart, R. (2024). *Fysische metingen - Dienstverleningsovereenkomst Zeeland (Perceel 4): Deelrapport 22: Stroom- en debietsmetingen op meetraai 12 t.p.v. Zoutelande (Westerschelde) in oktober 2024*. International Marine & Dredging Consultants.
- Deltares. (2021). *Eerstelijnsrapportage Westerschelde 1996-2019*.
- Deltares. (2023). Morphodynamics for IJmuiden Ver Wind Farm Zone. WOZ2220017. Ref: 11208404-002-HYE-0001. Retrieved from [https://offshorewind.rvo.nl/files/view/f9b2d778-a723-4c23-8548-7b16b9489074/ijv\\_20230207\\_mor\\_deltar...](https://offshorewind.rvo.nl/files/view/f9b2d778-a723-4c23-8548-7b16b9489074/ijv_20230207_mor_deltar...)
- Van Dijk, T. A., & Kleinhans, M. G. (2005). Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F4).
- van Dijk, T. A., Lindenbergh, R. C., & Egberts, P. J. (2008). Separating bathymetric data representing multiscale rhythmic bed forms: A geostatistical and spectral method compared. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F4).
- Elias, E.P.L. & Roelvink, F. (2022). *Understanding Impacts of Bay Sand Mining on Sand Supply and Transport in San Francisco Bay and Outer Coast*. Deltares.
- Escaravage, V. (2024). *Bodemdieren in de buitendelta van de Westerschelde: ruimtelijke spreiding en relatie met omgevingsfactoren* (Nr. C010/24). Wageningen Marine Research (WMR).

- Escaravage, V. (2025). *Bodemdieren in de Schelde-monding: ruimtelijke spreiding en de relatie met omgevingsfactoren* (Nr. C014/25). Wageningen Marine Research (WMR).
- De Haan, E., De Vos, L., Kruijt, D.B. (2023). *T0 Aanvullend Onderzoek Vlakte van de Raan: Resultaten macrozoöbenthos- en sedimentanalyses 2023*. Waardenburg Ecology.
- Van der Heijden, L.H., Van Weerdenburg, R., Van der Werf, J.J. & Sonnemans, K., (2021). *Informatie- en meetbehoefte ten behoeve van de pilotsuppletie in de Schelde-monding* (Nr. 11206823-000-ZKS-0018). Deltares.
- Van Helvert, M. (2022). *ADCP sedimentmetingen raai Vlakte van de Raan: 28 april 2022*. Rijkswaterstaat
- Van Helvert, M. (2023). *Stroom- en debietmeting Vlakte van de Raan: 28 april 2022*. Rijkswaterstaat.
- Van Helvert, M. (2023). *Stroom- en debietmeting Vlakte van de Raan: 15 juni 2022*. Rijkswaterstaat.
- Hoekstra, P., Bell, P., van Santen, P., Roode, N., Levoy, F., & Whitehouse, R. (2004). Bedform migration and bedload transport on an intertidal shoal. *Continental Shelf Research*, 24(11), 1249-1269.
- Hulscher, S. J., de Swart, H. E., & de Vriend, H. J. (1993). The generation of offshore tidal sand banks and sand waves. *Continental shelf research*, 13(11), 1183-1204.
- Kruijt, D.B., Kardinaal, E. & Van der Jagt, H. (2022). *T0 Onderzoek Vlakte van de Raan: Resultaten macrozoöbenthos- en sedimentanalyses 2022*. Waardenburg Ecology.
- Van Lancker, V., Du Four, I., Verfaillie, E., Deleu, S., Schelfaut, K., Fettweis, M. & Degraer, S. (2007). Management, research and budgetting of aggregates in shelf seas related to end-users (Marebasse). Final Scientific Report. Belgian Science Policy, 139 pp.
- Mallants, P. & Malschaert, J. (2024). *Monitoringsprogramma MONEOS 2021-2026: Deelrapport 3: Stroom- en debietsmetingen op meetraai 11 t.p.v. Wielingen (WesterSchelde) in oktober 2024*. International Marine & Dredging Consultants.
- Mallants, P. (2021). *Fysische metingen - Dienstverleningsovereenkomst Zeeland (Perceel 4): Deelrapport 12: Stroom- en debietmetingen op meetraai 11 t.p.v. Wielingen (WesterSchelde) in juni 2021*. International Marine & Dredging Consultants.
- Mol, J.W. (z.d.). *Uncertainties in ADCP measurements*.
- Van Onselen, E. (2023). *Analyse multibeam data voor pilotsuppletie WesterSchelde-monding* (Nr. 11208065-000-ZKS-0009). Deltares.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computers & geosciences*, 28(8), 929-937.
- Prins, T., Van der Meer, J. & Herman, P. (2020). *Eindrapportage monitoring- en onderzoeksprogramma Natuurcompensatie Voordelta (PMR-NCV)*. Wageningen Marine Research.

- van Prooijen, B. C., Tissier, M. F. S., de Wit, F. P., Pearson, S. G., Brakenhoff, L. B., van Maarseveen, M. C. G., van der Vegt, M., Mol, J. W., Kok, F., Holzhauser, H., van der Werf, J. J., Vermaas, T., Gawehn, M., Grasmeijer, B., Elias, E. P. L., Tonnon, P. K., Santinelli, G., Antolínez, J. A. A., de Vet, P. L. M., Reniers, A. J. H. M., Wang, Z. B., den Heijer, C., van Gelder-Maas, C., Wilmink, R. J. A., Schipper, C. A., and de Looff, H.: Measurements of hydrodynamics, sediment, morphology and benthos on Ameland ebb-tidal delta and lower shoreface, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2775–2786, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2775-2020>, 2020.
- Rashid, M., Sarkar, J., & Phuyal, S. (2022). Visualizing bivariate statistics using ellipses over a scatter plot.
- Van Santen, R. B., De Swart, H. E., & Van Dijk, T. A. G. P. (2011). Sensitivity of tidal sand wavelength to environmental parameters: A combined data analysis and modelling approach. *Continental Shelf Research*, 31(9), 966-978.
- Schrijver, M.C. (2025). Monitoring kustfundament suppletie Vlakte van de Raan.
- Stobbelaar, S. (2023). *Sediment transport processes at the mouth of the Western Scheldt estuary* [Masterscriptie, Universiteit Utrecht].
- Roetert, T. J., Raaijmakers, T. C., & Borsje, B. W. (2017). *Cable route optimization for offshore wind farms in morphodynamic areas*. Paper presented at the The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, USA.
- Van der Werf, J.J., Van Weerdenburg R. & Van der Heijden, L.H., (2021). *Pilotsuppletie Schelde-monding: suppletievarianten* (Nr. 11206823-000-ZKS-0017). Deltares.
- Van der Werf, J.J., Van Weerdenburg R. & Van der Spek A.J.F. (2021). *Morfologische ontwikkeling van het zuidelijke deel van de Vlakte van de Raan, Schelde-monding*. Deltares.

# A Bepaling diepte-gemiddelde stromingsvectoren en fluxen door de raaien

Deze Appendix geeft de methode weer voor de bepaling van dieptegemiddelde snelheden voor de raaimetingen en het bepalen van de sediment- en debietflux door de raai.

De ADCP snelheden zijn ten opzichte van de lokale waterstand. Om te bepalen op welke absolute hoogte de metingen zijn gedaan hebben we de lokale waterstand nodig. De exacte waterstand ten tijde van de meting is niet beschikbaar, daarom wordt de waterstand van het dichtstbijzijnde meetstation gebruikt (Vlakte van de Raan). Dit meetpunt ligt ongeveer 10-12 km ten Noordwesten van de debietraaien. Verder wordt er met deze methode geen rekening gehouden met golven. Dit kan tot afwijkingen van  $\pm 1$  m leiden.

De eerste analysestap is om de dieptegemiddelde stroomsnelheid te berekenen. De dieptegemiddelde stroomsnelheid wordt bepaald aan de hand van drie methodes die ook gebruikt zijn tijdens het Kustgenese 2 project (Van Prooijen et al., 2020). Deze worden vervolgens vergeleken. Met methode 1 wordt de dieptegemiddelde snelheid bepaald door het gemiddelde van alle natte cellen te berekenen. Bij methode 2 wordt een logaritmisch profiel gefit op de meting, en wordt het gemiddelde van het logaritmisch profiel over de gehele waterkolom berekend. Hierbij wordt het profiel geëxtrapoleerd tot dicht bij de bodem en het wateroppervlakte. Vergelijking A-1 hieronder laat zien hoe de coëfficiënten  $a$  en  $b$  zijn gerelateerd aan de factoren in het logaritmische snelheidsprofiel. De bepaling van de factoren  $a$  en  $b$  is gedaan door een lineaire fit te maken tussen de gemeten snelheidsdata ( $u$ ) en de natuurlijke logaritme van de gemeten dieptewaardes ( $\ln(z)$ ). Bij methode 3 wordt de waarde op 37% van de waterdiepte bepaald, gemeten vanaf de bodem. De stroomsnelheid op deze hoogte is gelijk aan de dieptegemiddelde waarde in het geval van een logaritmisch profiel.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \rightarrow u = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z) - \frac{u_*}{\kappa} \ln(z_0) \rightarrow u = a \cdot \ln(z) + b \quad (A-1)$$

Met:

$u$  : snelheid (m/s)

$u_*$  : wrijvingsnelheid (m/s)

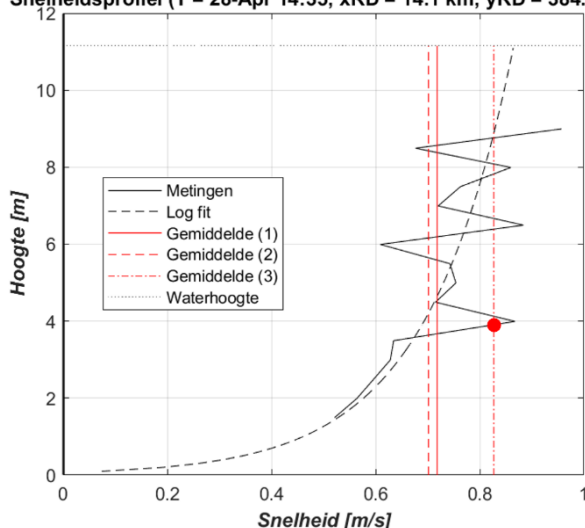
$\kappa$  : Von Kármán constante = 0.41 (-)

$z$  : hoogte in verticaal (m)

$z_0$  : theoretische hoogte waar de snelheid 0 m/s is (m) =  $\frac{k_s}{30}$

$k_s$  : ruwheidshoogte (m)

Snelheidsprofiel (T = 28-Apr 14:35; xRD = 14.1 km; yRD = 384.9 km)



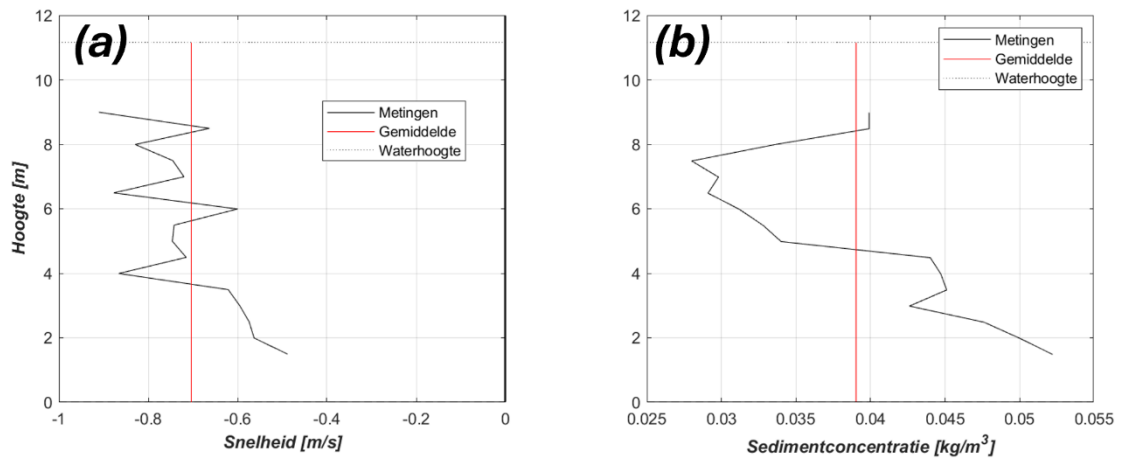
Figuur A-1: Bepaling van dieptegemiddelde snelheid op basis van 3 methodes. De zwarte waarden zijn de gemeten snelheden (magnitude) en de zwarte doorgebroken lijn is de fit van het logaritmische profiel. De 3 methodes om het gemiddelde te bepalen zijn: (1) Gemiddelde van de metingen; (2) Gemiddelde van het gefitte en geëxtrapoleerde logaritmische profiel; (3) Waarde op 37% van de waterdiepte.

Figuur A-1 laat het snelheidsprofiel zien over de waterdiepte en geeft in rood de resultaten van de drie middelingsmethodes weer voor een enkele meting. De belangrijkste conclusie is dat de waarde op 37% geen robuuste benadering is van de gemiddelde snelheid omdat de metingen nogal fluctueren. Het gemiddelde op basis van de metingen en het gemiddelde op basis van het logaritmische profiel geven ongeveer dezelfde resultaten. In het algemeen is de dieptegemiddelde snelheid op basis van de fit met het logaritmische profiel iets lager. Dit komt omdat de metingen geen data hebben bij de bodem, waar de snelheden over het algemeen lager zijn. Het grote nadeel van methode (2) is dat de beste fit soms wordt gevonden met  $a < 1$  (zie Vergelijking A-1). Dat betekent dat de maximale waarde van het profiel bij de bodem is, wat niet realistisch is. Daarom kunnen we concluderen dat methode (1) (het gemiddelde van de metingen) een goede benadering geeft van de dieptegemiddelde snelheid en tegelijkertijd een robuuste methode is om het gemiddelde te benaderen. Deze methode wordt dan ook verder toegepast.

Om de ADCP metingen naar debieten om te zetten worden de dieptegemiddelde snelheden op de theoretische meetraai geprojecteerd. Hierna wordt de dieptegemiddelde snelheid (gemiddelde van alle natte cellen) loodrecht op de raai vermenigvuldigd met de hoogte van de waterkolom. Omdat de meetraai in de Noord-Zuid richting ligt (zie Figuur 2-6), wordt alleen rekening gehouden met de Oost-West component van de gemeten snelheid. De dieptegemiddelde waterflux wordt vermenigvuldigd met de breedte tussen twee meetpunten en daarna opgeteld om het totale raasidebiet te verkrijgen.

Het sedimenttransport wordt berekend op eenzelfde manier als het debiet, dit is te zien in Figuur A-2. De diepte gemiddelde snelheid (Figuur A-2a) wordt vermenigvuldigd met de diepte gemiddelde sedimentconcentratie (Figuur A-2b). Dit leidt tot een kleine overschatting van de sedimentflux. Alle sedimenttransporten worden opgeteld om het totale sedimenttransport door de raai te verkrijgen.

Oostwaartse component (T = 28-Apr 14:35; xRD = 14.1 km; yRD = 384.9 km)

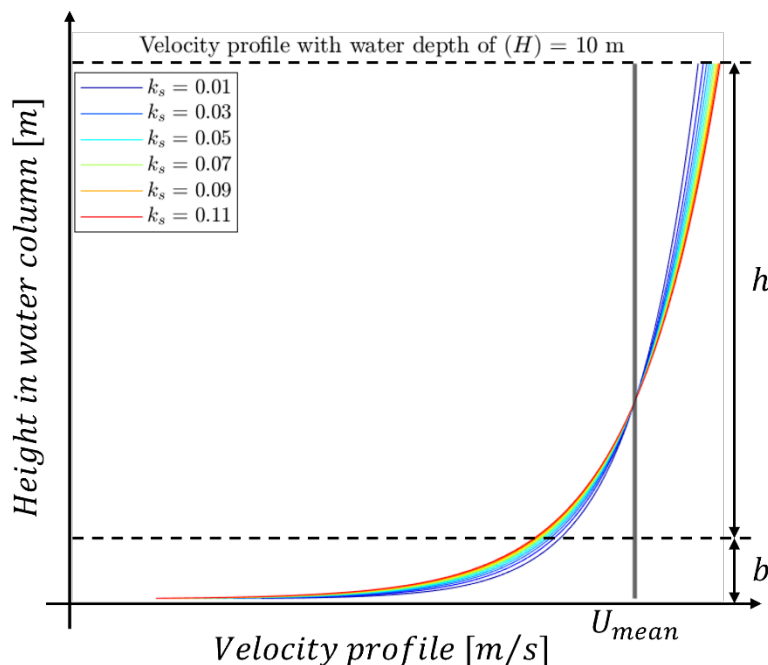


Figuur A-2: (a) snelheidsprofiel voor de oost-west component (negatief is richting het westen). De rode lijn is de diepte gemiddelde snelheid. b) gemeten sedimentconcentratie en diepte gemiddelde waarde (rode lijn).

## B Effect van blanking distance op diepte gemiddelde snelheden

Deze Appendix gaat in of het middelen van de natte cellen als proxy voor de dieptegemiddelde snelheden een goede aanname is voor de ADCP frames. Voor de analyse gaan we uit van het logaritmische snelheidsprofiel weergegeven in Vergelijking A-1.

De typische ordegrottes van de ruwheidslengte liggen tussen 0.01 en 0.1 m voor zandige estuariene omgevingen (Berg et al., 2009), de theoretische hoogte waar de snelheid 0 m/s is, is een factor 30 kleiner (zie Vergelijking A-1). Om te bepalen of het effect van het niet meten van de bodemsnelheden significante invloed heeft op de dieptegemiddelde snelheid, berekenen we het verschil voor het volledige snelheidsprofiel vanaf de bodem ( $z = z_0$ ) tot de volledige waterhoogte ( $z = H$ ) en het snelheidsprofiel vanaf een bepaalde hoogte (blanking distance + framehoogte) van de bodem ( $z = b = H - h$ ) tot de volledige waterhoogte ( $z = H$ ). Dus de volledige waterdiepte is  $H$  en de sensor meet hiervan de bovenste  $h$  m, zie ook Figuur B-1.



Figuur B-1: Logaritmisch snelheidsprofiel voor verschillende waarden van  $z_0$  en definitie van blanking distance ( $b$ ), volledige waterdiepte ( $H$ ) en het gemeten deel van de waterkolom ( $h$ ).

De dieptegemiddelde snelheid is voor het volledige profiel en het gemeten deel van het profiel:

$$\bar{u}_{full} = \frac{1}{H} \int_{z_0}^H u(z) dz \quad (B-1)$$

$$\bar{u}_{measured} = \frac{1}{h} \int_{H-h}^H u(z) dz \quad (B-2)$$

Eerst gaan we de integraal voor het volledige profiel uitwerken:

$$\bar{u}_{full} = \frac{1}{H} \int_{z_0}^H \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) dz \quad (B-3)$$

We gebruiken integration by parts om de integraal op te lossen:

$$\int_{z_0}^H \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) dz = \left[ z \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - z \right]_{z_0}^H = H \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - H - \left( z_0 \ln\left(\frac{z_0}{z_0}\right) - z_0 \right) = H \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - H + z_0 \quad (B-4)$$

Dus de volledige dieptegemiddelde snelheid is:

$$\bar{u}_{full} = \frac{u_*}{\kappa} \left( \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - 1 + \frac{z_0}{H} \right) \quad (B-5)$$

Dezelfde stappen kunnen we doen voor het gemeten snelheidsprofiel:

$$\bar{u}_{measured} = \frac{1}{h} \int_{H-h}^H \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) dz \quad (B-6)$$

Wederom wordt integration by parts gebruikt voor het oplossen van de integraal:

$$\begin{aligned} \int_{H-h}^H \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) dz &= \left[ z \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - z \right]_{H-h}^H = H \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - H - \left( (H-h) \ln\left(\frac{H-h}{z_0}\right) - (H-h) \right) \\ &= H \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - H - (H-h) \ln\left(\frac{H-h}{z_0}\right) + (H-h) \end{aligned} \quad (B-7)$$

Dus het volledige gemeten snelheidsprofiel is:

$$\bar{u}_{measured} = \frac{u_*}{\kappa} \left( \frac{H \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - H - (H-h) \ln\left(\frac{H-h}{z_0}\right) + (H-h)}{h} \right) \quad (B-8)$$

Het verschil tussen het volledige en gemeten snelheidsprofiel is dan:

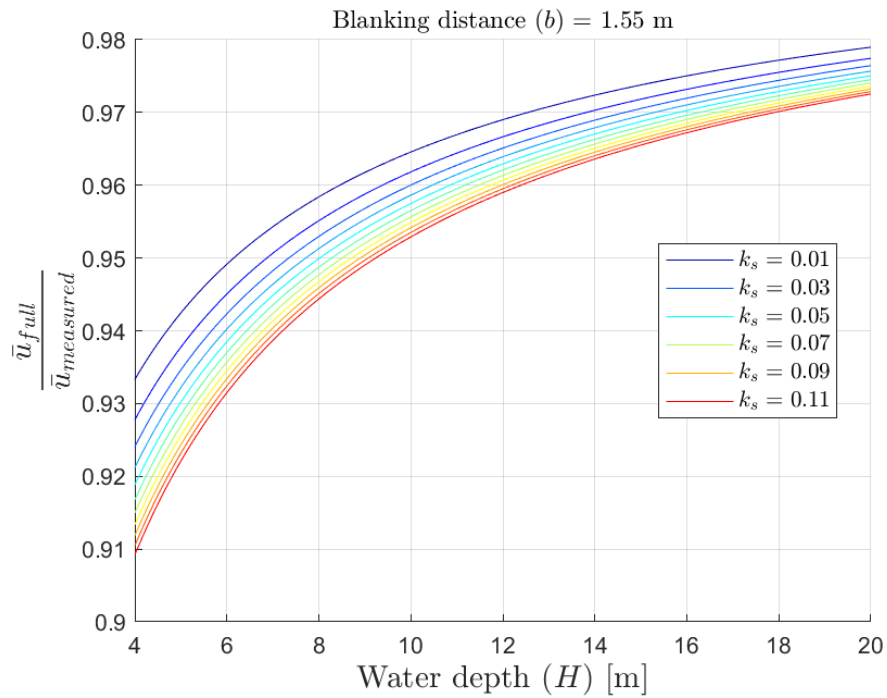
$$F = \frac{\bar{u}_{full}}{\bar{u}_{measured}} = \frac{h \left( \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - 1 + \frac{z_0}{H} \right)}{H \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - (H-h) \ln\left(\frac{H-h}{z_0}\right) - h} \quad (B-9)$$

$$F = \frac{\bar{u}_{full}}{\bar{u}_{measured}} = \frac{h \left( \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - 1 + \frac{z_0}{H} \right)}{H \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - (H-h) \ln\left(\frac{H-h}{z_0}\right) - h} \quad (B-10)$$

Hierin is  $z_0 = \frac{k_s}{30}$

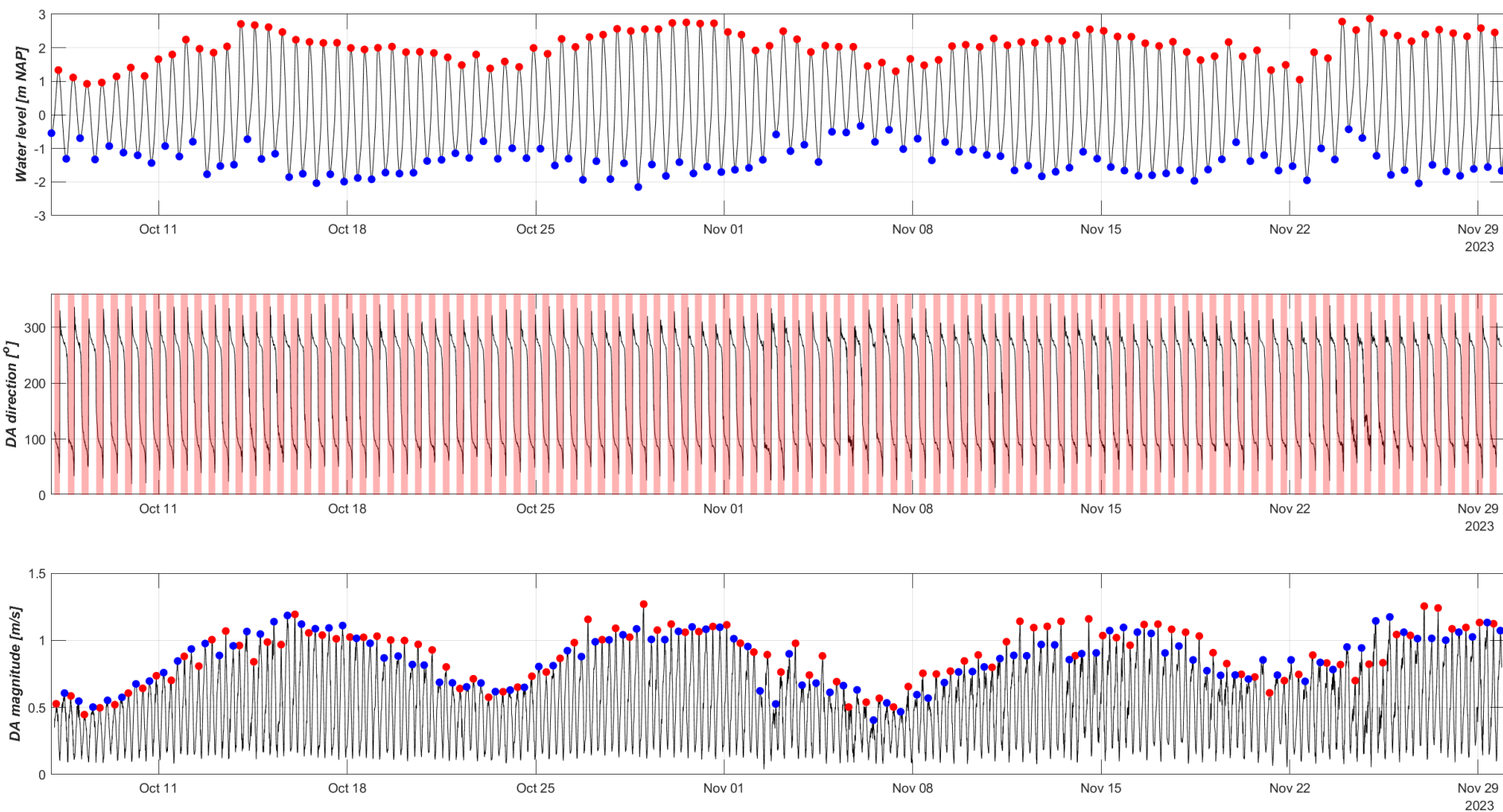
Figuur B-2 laat zien bij een constante blanking distance de overschatting van de dieptegemiddelde snelheid afneemt bij een grotere waterdiepte. Wanneer de frames in ondiepe delen (waterdieptes < 5 m) staan kan de overschatting van snelheden theoretisch tot 7-10% oplopen. De frames in de Schelde-monding staan op een waterdiepte van -10 m NAP tot -15 m NAP. Met een gemiddelde getijslag van 4 m betekent dit dat de minimale waterdiepte (tijdens laagwater) tussen de 8 en 13 m ligt. De maximale waterdiepte ligt dan tussen de 12 en 17 m. De overschatting van de snelheid door het missen van de bodemsnelheden ligt voor deze frames ergens tussen de 2,5 en 6,5%. Het is goed om bewust te zijn van deze

systematische fout, maar voor de vervolganalyses gaan fouten in deze orde niet de conclusies beïnvloeden.

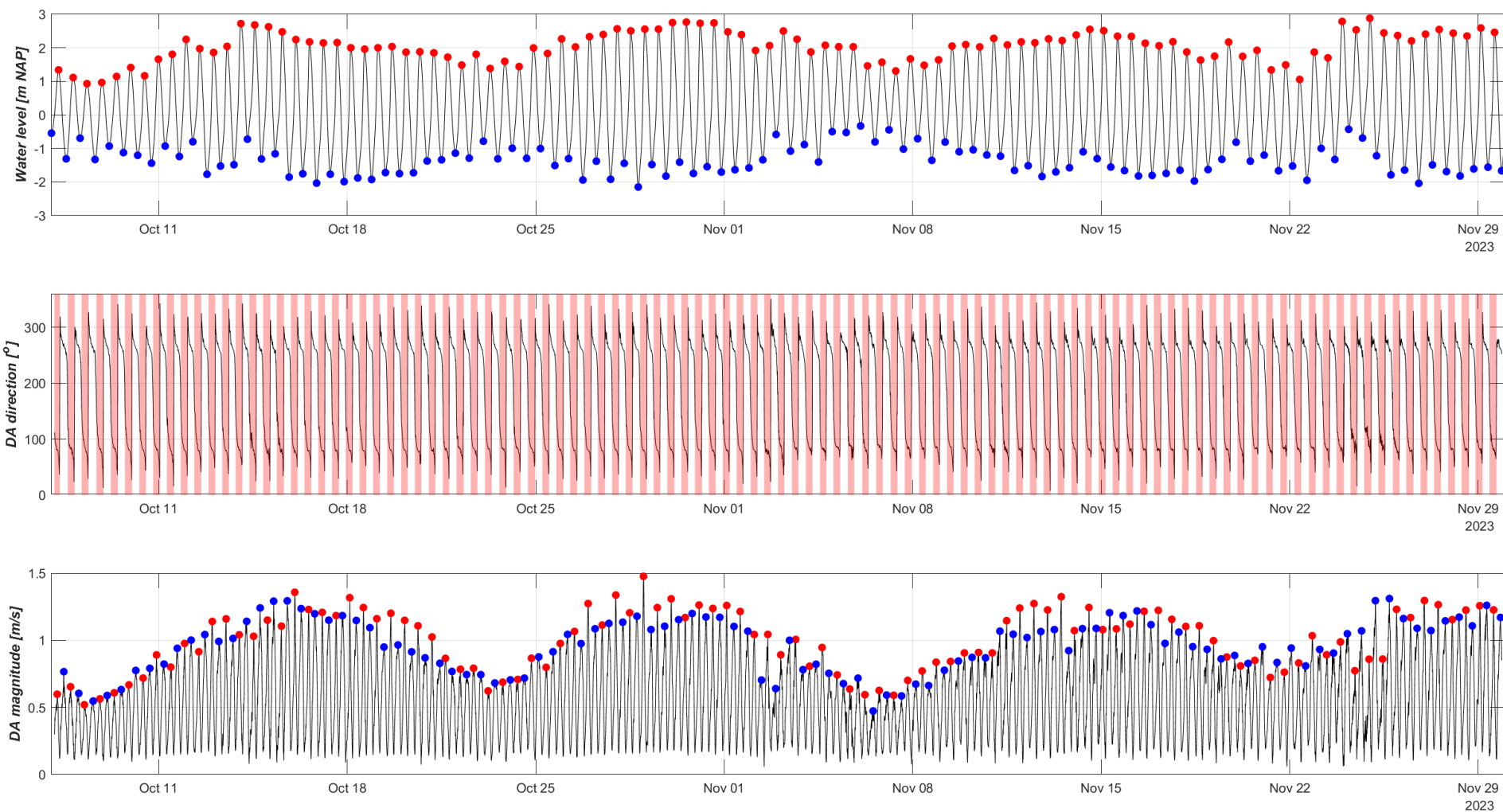


Figuur B-2: Verhouding tussen diepte-gemiddelde snelheid op basis van een logaritmisch snelheidsprofiel en van het gemeten deel van het snelheidsprofiel uitgezet tegen de waterdiepte met een constante blanking distance van 1,55 m.

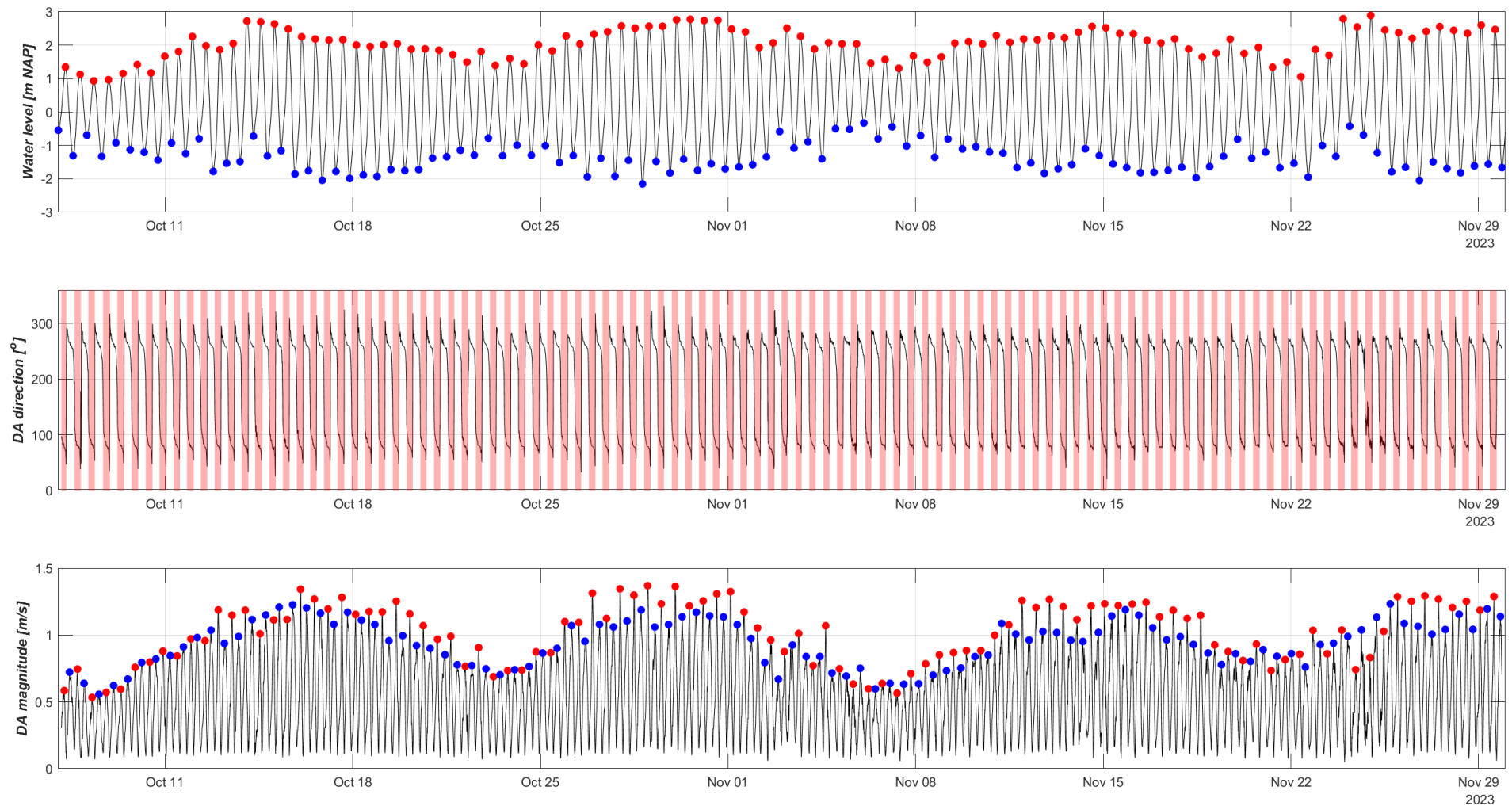
## C ADCP frames ebschaar: waterstanden, dieptegemiddelde stromingsrichting en stromingsmagnitude



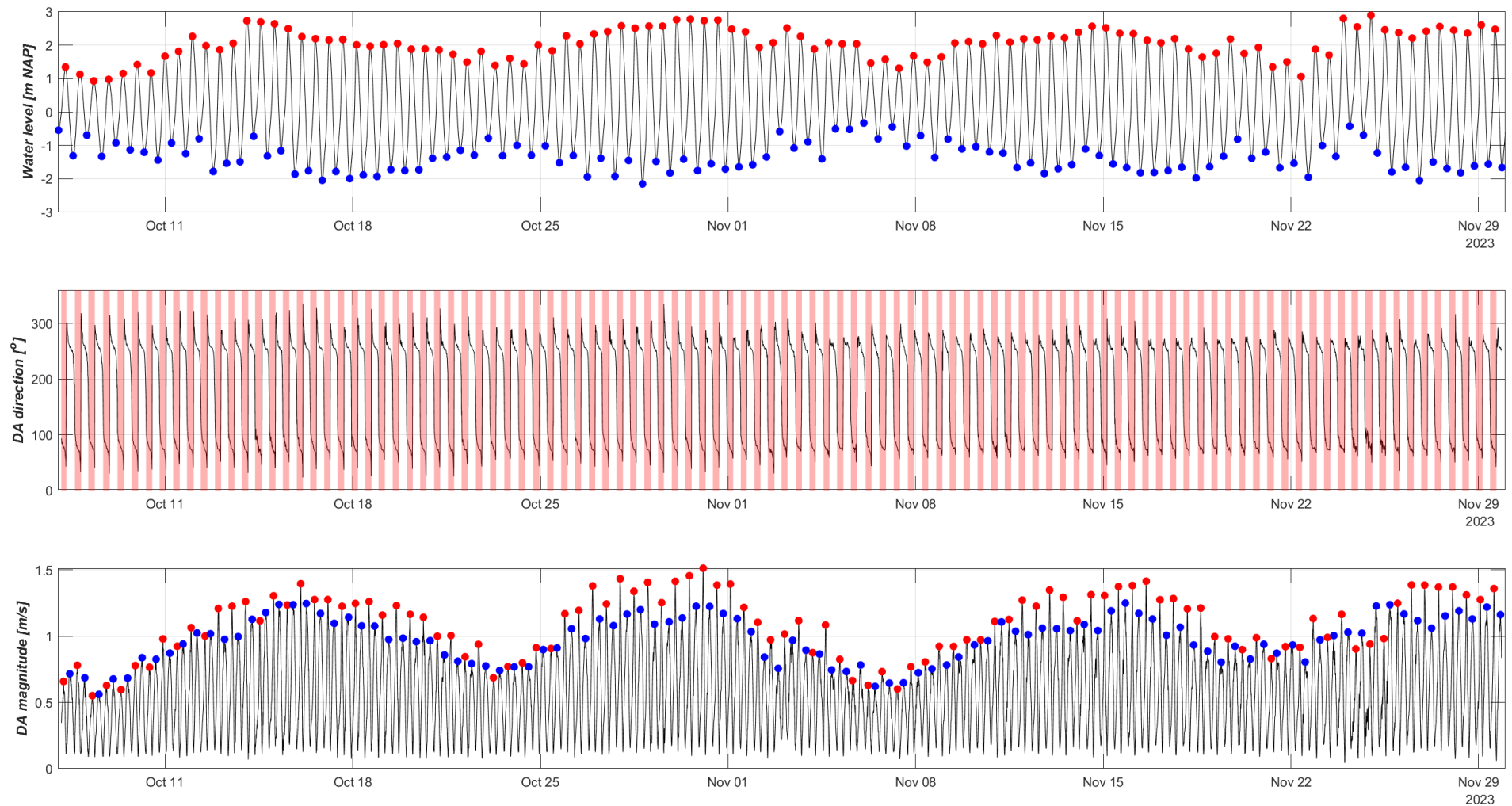
Figuur C-1: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0202 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0202. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.



Figuur C-2: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0203 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0203. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.

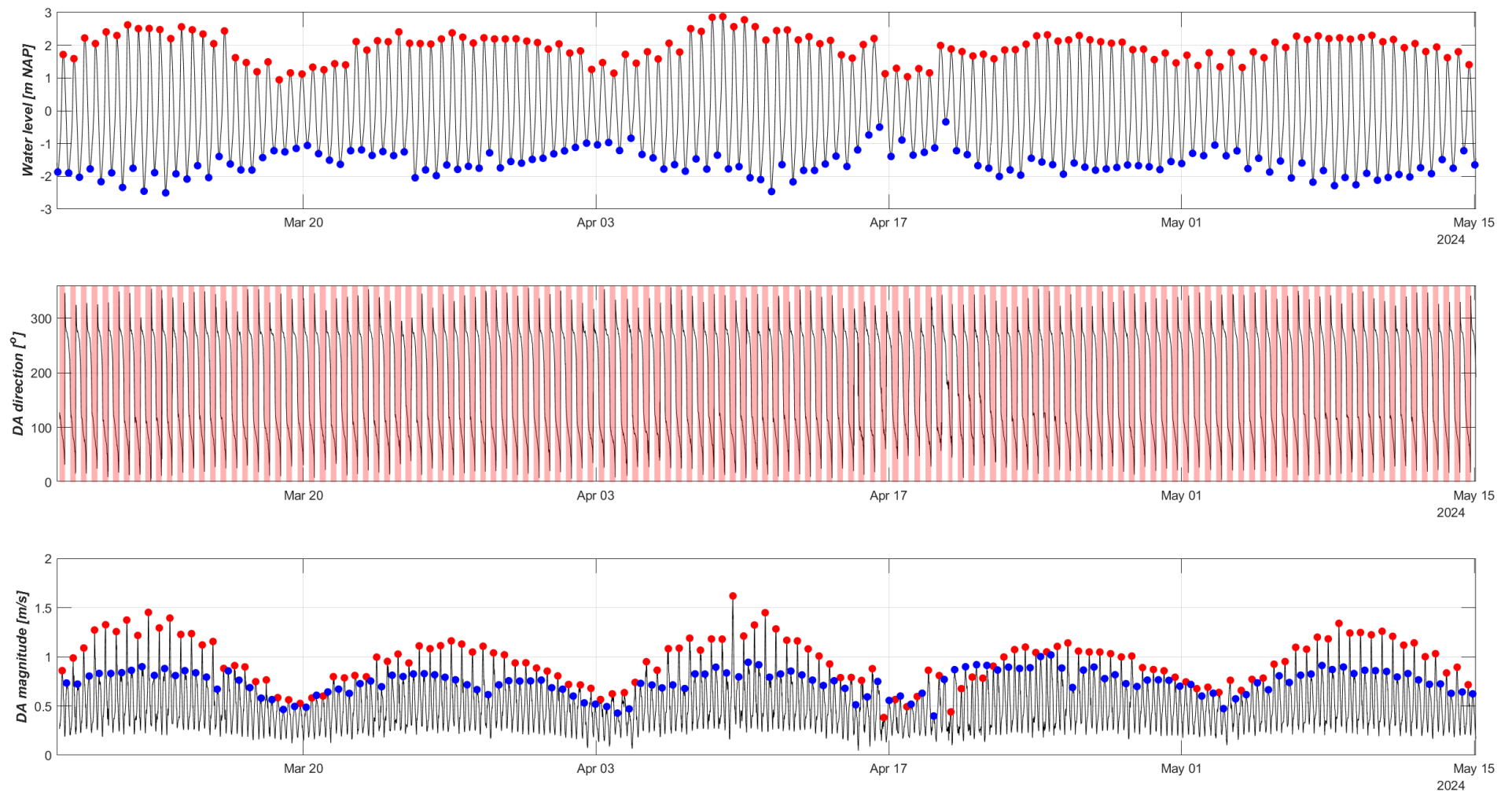


Figuur C-3: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0204 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0204. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.

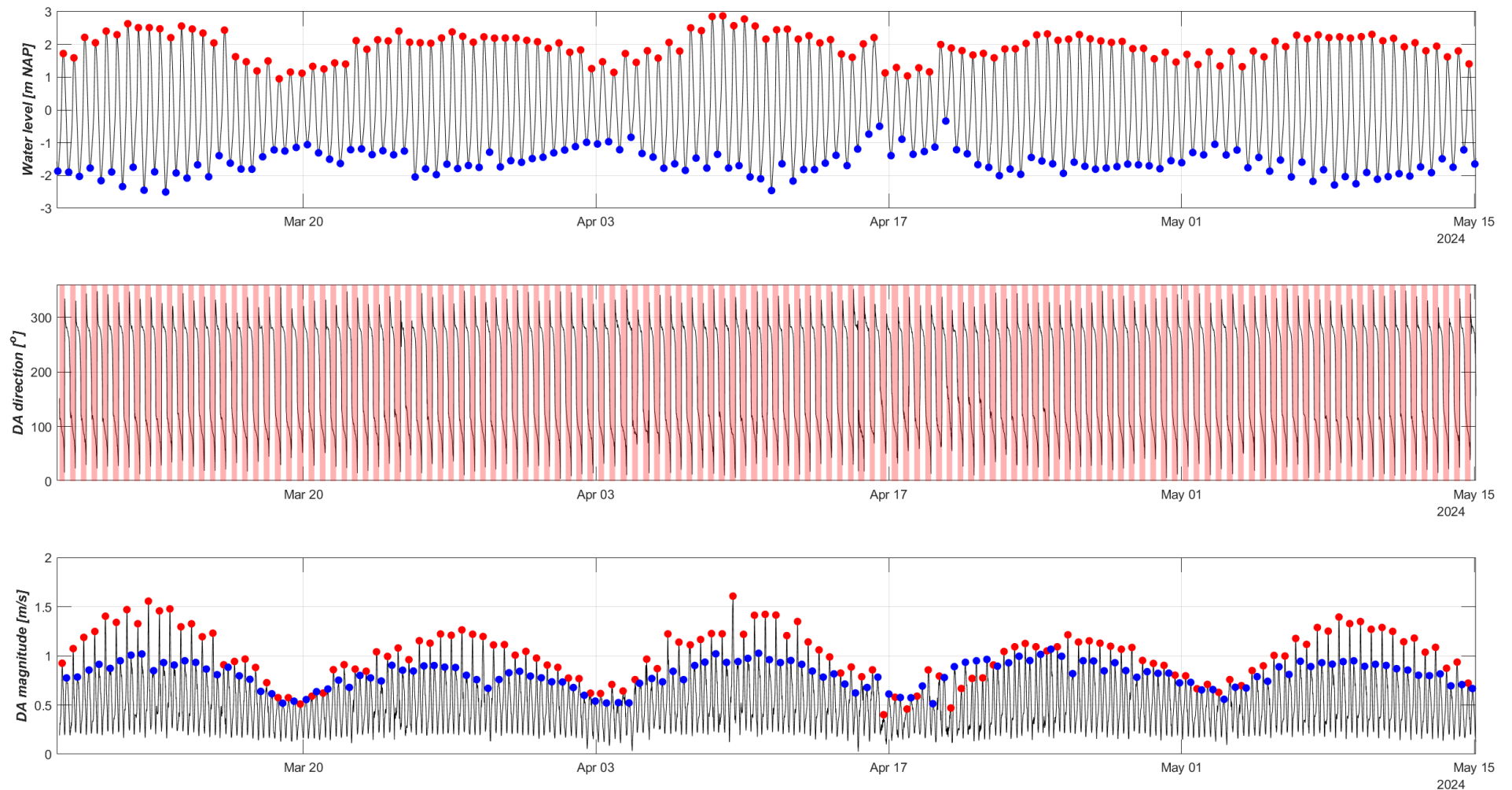


Figuur C-4: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0205 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0205. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.

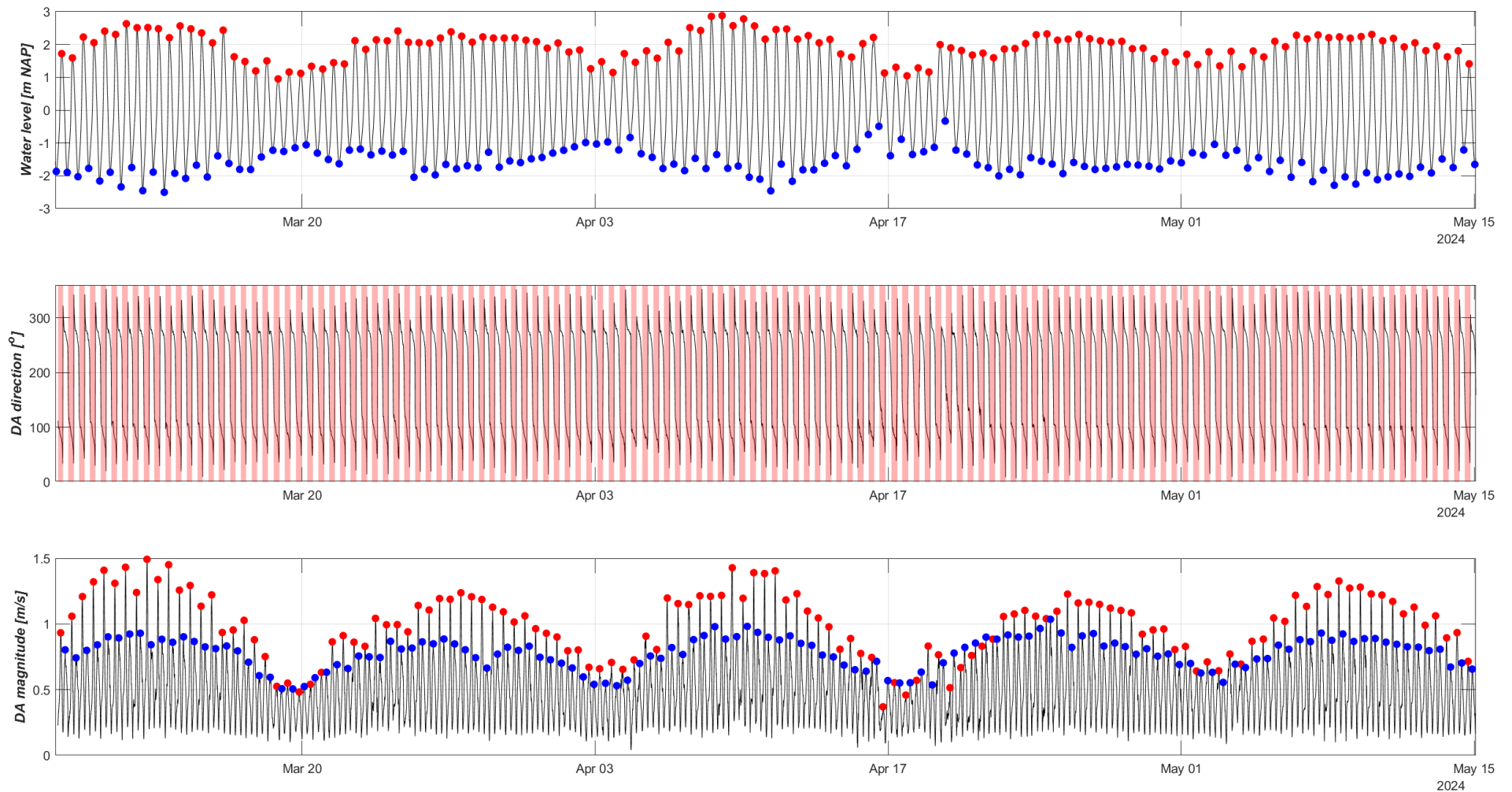
## D ADCP frames vloedschaar: waterstanden, dieptegemiddelde stromingsrichting en stromingsmagnitude



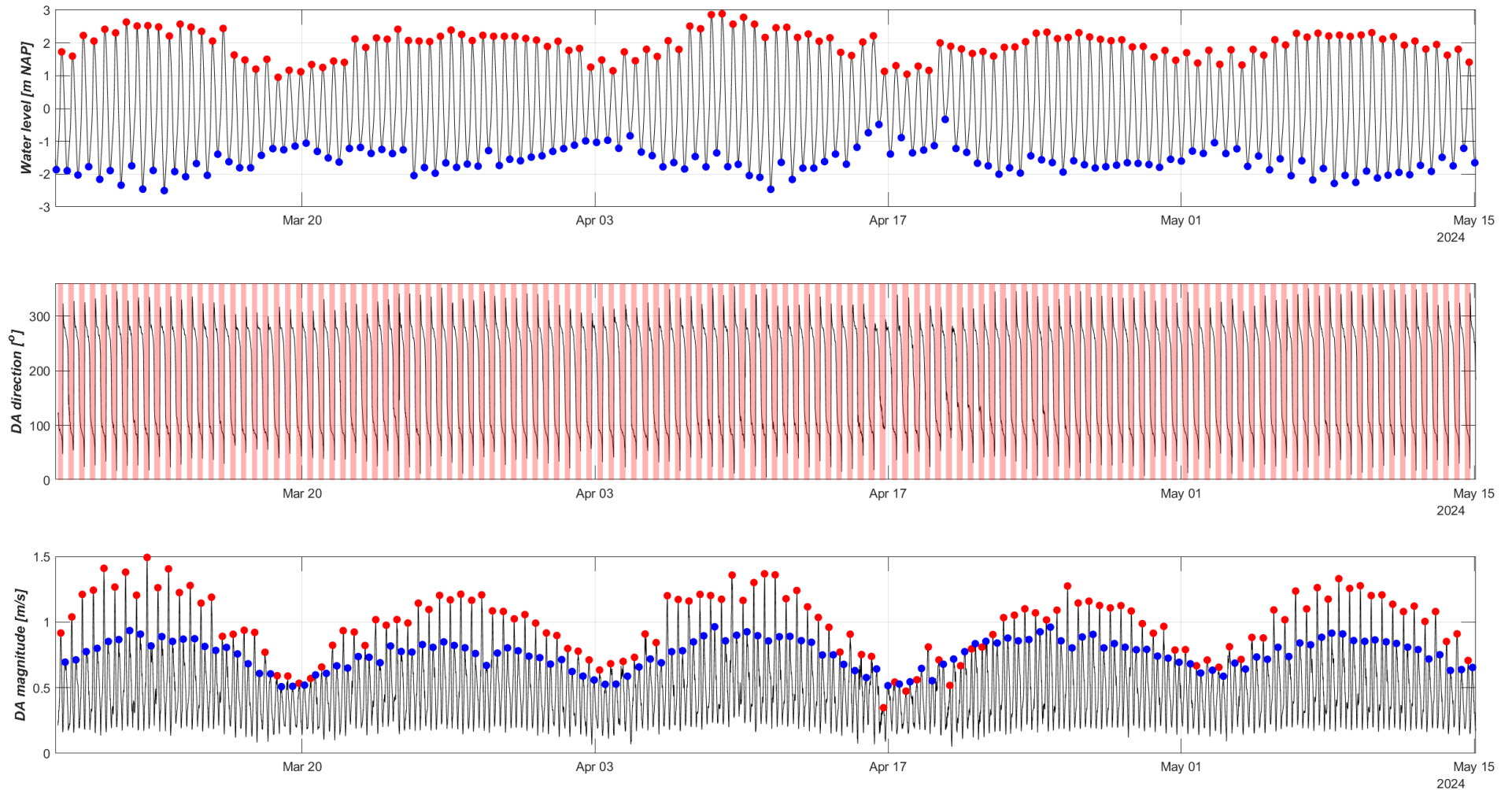
Figuur D-1: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0102 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0102. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.



Figuur D-2: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0103 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0103. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.



Figuur D-3: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0104 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0104. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.



Figuur D-4: Overzicht van waterstanden voor de locatie van MP0105 met M2-reductiemethode (boven), dieptegemiddelde richting (midden) en dieptegemiddelde snelheden (onder) voor de meetperiode van meetframe MP0105. De rode bollen in de waterstanden laten de hoogwaters zien, de blauwe bollen de laagwaters. De rode delen in het diagram midden staan voor de vloedperiodes gebaseerd op de richting van de getij-ellips. De rode bollen in het diagram onder zijn de piekvloedsnelheden, de blauwe bollen zijn de piek eb snelheden.

# E Slibpercentages en mediane diameter voor bodemkernen

Deze Appendix bevat alle mediane diameters en slibpercentages voor de bodemkernen in 2022 (Tabel E-1) en 2023 (Tabel E-2).

*Tabel E-1: Mediane diameter en slibpercentage voor bodemkernen 2022.*

| Sample Name | D50 (µm) | Slib (%) |
|-------------|----------|----------|
| 1           | 373,2    | 6,9      |
| 2           | 155,2    | 23,6     |
| 3           | 155,8    | 16,6     |
| 4           | 162,6    | 9,8      |
| 5           | 149,3    | 16,7     |
| 6           | 230,8    | 0,0      |
| 7           | 123,4    | 9,8      |
| 8           | 282,7    | 22,0     |
| 9           | 183,1    | 8,0      |
| 10          | 285,9    | 4,0      |
| 11          | 274,0    | 14,3     |
| 12          | 219,0    | 6,4      |
| 13          | 360,2    | 4,5      |
| 14          | 154,7    | 22,4     |
| 15          | 218,8    | 19,5     |
| 16          | 247,9    | 0,0      |
| 17          | 294,2    | 3,5      |
| 18          | 68,5     | 48,4     |
| 19          | 410,1    | 6,7      |
| 20          | 30,1     | 62,1     |
| 21          | 785,4    | 0,0      |
| 22          | 388,5    | 0,0      |
| 23          | 333,6    | 8,2      |
| 24          | 375,7    | 13,2     |

| Sample Name | D50 (µm) | Slib (%) |
|-------------|----------|----------|
| 25          | 220,0    | 30,7     |
| 26          | 40,8     | 56,3     |
| 27          | 300,2    | 0,0      |
| 28          | 7,7      | 95,6     |
| 29          | 189,8    | 21,3     |
| 30          | 13,2     | 85,0     |
| 31          | 25,1     | 65,4     |
| 32          | 42,4     | 54,8     |
| 33          | 305,2    | 7,3      |
| 34          | 175,0    | 9,4      |
| 35          | 402,7    | 0,8      |
| 36          | 17,9     | 81,7     |
| 37          | 272,4    | 0,0      |
| 38          | 182,6    | 28,2     |
| 39          | 12,7     | 86,9     |
| 40          | 448,0    | 0,0      |
| 41          | 16,2     | 81,8     |
| 42          | 269,3    | 0,0      |
| 43          | 406,6    | 4,9      |
| 44          | 10,7     | 92,8     |
| 45          | 336,6    | 21,1     |
| 46          | 219,4    | 0,0      |
| 47          | 426,4    | 3,7      |
| 48          | 16,4     | 74,8     |
| 49          | 234,0    | 36,8     |
| 50          | 237,1    | 0,0      |
| 51          | 428,2    | 4,6      |
| 52          | 18,4     | 63,3     |
| 53          | 232,8    | 0,0      |
| 54          | 224,8    | 0,0      |
| 55          | 205,9    | 0,0      |

| <b>Sample Name</b> | <b>D50 (µm)</b> | <b>Slib (%)</b> |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 56                 | 198,7           | 0,0             |
| 57                 | 233,8           | 4,5             |
| 58                 | 78,8            | 48,5            |
| 59                 | 292,0           | 9,1             |
| 60                 | 315,8           | 0,0             |
| 61                 | 300,4           | 0,6             |
| 62                 | 156,4           | 29,6            |
| 63                 | 256,8           | 5,6             |
| 64                 | 211,3           | 9,7             |
| 65                 | 211,1           | 10,9            |
| 66                 | 167,2           | 14,7            |
| 67                 | 365,8           | 10,6            |
| 68                 | 290,3           | 0,0             |
| 69                 | 281,7           | 0,0             |
| 70                 | 111,9           | 34,5            |
| 71                 | 181,4           | 6,7             |
| 72                 | 219,5           | 0,0             |
| 73                 | 322,1           | 1,6             |
| 74                 | 174,5           | 15,2            |
| 75                 | 287,4           | 0,0             |
| 76                 | 44,5            | 55,0            |
| 77                 | 416,9           | 3,1             |
| 78                 | 316,1           | 2,2             |
| 79                 | 242,7           | 8,8             |
| 80                 | 240,1           | 4,8             |
| 81                 | 234,0           | 0,0             |
| 82                 | 159,6           | 22,8            |
| 83                 | 238,7           | 21,3            |
| 84                 | 279,6           | 12,0            |
| 85                 | 242,3           | 24,0            |
| 86                 | 277,3           | 24,5            |

| <b>Sample Name</b> | <b>D50 (µm)</b> | <b>Slib (%)</b> |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 87                 | 230,5           | 28,5            |
| 88                 | 235,3           | 10,9            |
| 89                 | 235,4           | 29,2            |
| 90                 | 274,1           | 0,5             |
| 91                 | 345,5           | 0,0             |
| 92                 | 485,3           | 1,7             |
| 93                 | 226,4           | 8,5             |
| 94                 | 264,8           | 18,9            |
| 95                 | 19,9            | 62,3            |
| 96                 | 290,2           | 0,0             |
| 97                 | 484,1           | 0,7             |
| 98                 | 253,9           | 5,5             |
| 99                 | 29,9            | 72,9            |
| 100                | 256,2           | 0,0             |
| 101                | 255,9           | 18,8            |
| 102                | 229,0           | 0,0             |
| 103                | 8,8             | 94,7            |
| 104                | 289,9           | 0,0             |
| 104 Extra          | 301,4           | 6,2             |
| 105                | 243,1           | 16,5            |
| 106                | 343,2           | 4,4             |
| 107                | 241,9           | 5,7             |
| 108                | 225,0           | 4,2             |
| 109                | 285,8           | 0,0             |
| 110                | 244,9           | 0,0             |
| 111                | 261,5           | 0,0             |
| 112                | 51,0            | 52,0            |
| 113                | 412,9           | 13,6            |
| 114                | 393,2           | 7,1             |
| 115                | 252,2           | 0,0             |
| 116                | 505,4           | 1,3             |

| Sample Name | D50 (µm) | Slib (%) |
|-------------|----------|----------|
| 117         | 412,5    | 0,0      |
| 118         | 318,7    | 0,0      |
| 119         | 268,4    | 10,6     |
| 120         | 181,9    | 5,1      |
| 121         | 288,9    | 0,0      |
| 122         | 393,6    | 0,0      |
| 123         | 382,8    | 12,8     |
| 124         | 360,3    | 0,0      |
| 125         | 221,1    | 5,4      |

Tabel E-2: Mediane diameter en slibpercentage voor bodemkernen 2023.

| Sample Name | D50 (µm) | Slib (%) |
|-------------|----------|----------|
| 1           | 434,6    | 0,0      |
| 5           | 171,0    | 5,2      |
| 6           | 211,6    | 0,1      |
| 8           | 400,6    | 2,8      |
| 11          | 332,3    | 0,0      |
| 14          | 259,1    | 0,0      |
| 15          | 139,9    | 27,6     |
| 18          | 168,9    | 5,0      |
| 19          | 308,7    | 0,0      |
| 20          | 124,1    | 25,4     |
| 21          | 71,6     | 46,9     |
| 23          | 368,8    | 0,0      |
| 24          | 363,0    | 0,0      |
| 25          | 294,9    | 0,0      |
| 26          | 197,1    | 7,0      |
| 27          | 310,7    | 0,0      |
| 30          | 422,9    | 0,0      |
| 31          | 211,0    | 4,0      |
| 33          | 349,2    | 0,0      |
| 36          | 146,3    | 26,3     |

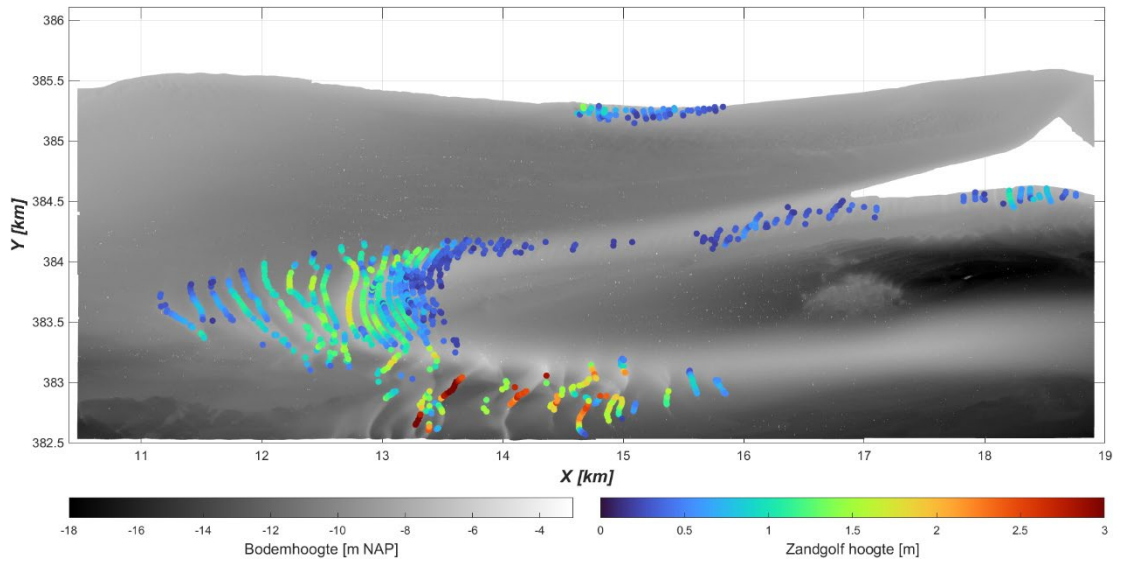
| <b>Sample Name</b> | <b>D50 (µm)</b> | <b>Slib (%)</b> |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 37                 | 283,6           | 0,0             |
| 38                 | 280,2           | 3,1             |
| 39                 | 359,7           | 17,2            |
| 41                 | 124,8           | 29,0            |
| 42                 | 267,3           | 0,0             |
| 43                 | 378,5           | 7,3             |
| 44                 | 214,1           | 8,3             |
| 45                 | 419,5           | 0,0             |
| 48                 | 223,3           | 4,3             |
| 49                 | 391,5           | 0,0             |
| 51                 | 377,7           | 0,0             |
| 52                 | 372,6           | 0,0             |
| 54                 | 220,4           | 0,1             |
| 58                 | 229,7           | 0,6             |
| 59                 | 301,1           | 0,0             |
| 60                 | 318,5           | 0,0             |
| 62                 | 183,3           | 6,9             |
| 63                 | 260,3           | 0,0             |
| 65                 | 204,5           | 4,8             |
| 66                 | 194,4           | 5,5             |
| 67                 | 276,1           | 15,7            |
| 70                 | 154,8           | 20,1            |
| 71                 | 181,8           | 1,0             |
| 72                 | 197,4           | 0,2             |
| 73                 | 302,9           | 0,0             |
| 74                 | 219,5           | 3,7             |
| 76                 | 232,8           | 4,6             |
| 78                 | 288,5           | 0,0             |
| 79                 | 259,1           | 0,0             |
| 80                 | 241,0           | 0,2             |
| 82                 | 129,1           | 31,0            |

| <b>Sample Name</b> | <b>D50 (µm)</b> | <b>Slib (%)</b> |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 83                 | 256,9           | 5,6             |
| 85                 | 262,3           | 5,1             |
| 87                 | 275,1           | 7,1             |
| 88                 | 235,1           | 0,2             |
| 89                 | 286,2           | 318,3           |
| 90                 | 276,7           | 0,0             |
| 93                 | 191,8           | 3,4             |
| 96                 | 289,7           | 0,0             |
| 97                 | 398,1           | 0,9             |
| 98                 | 240,8           | 0,6             |
| 101                | 271,5           | 4,1             |
| 106                | 382,9           | 0,0             |
| 107                | 234,0           | 0,2             |
| 108                | 213,9           | 0,1             |
| 109                | 280,9           | 0,0             |
| 112                | 299,6           | 0,0             |
| 116                | 411,1           | 0,0             |
| 126                | 206,3           | 3,3             |
| 127                | 179,2           | 5,9             |
| 128                | 343,7           | 0,7             |
| 129                | 18,6            | 72,6            |
| 130                | 133,3           | 34,1            |
| 131                | 222,2           | 0,5             |
| 132                | 201,0           | 5,1             |
| 133                | 330,1           | 0,0             |
| 134                | 263,8           | 0,0             |
| 135                | 187,8           | 0,6             |
| 136                | 191,8           | 7,0             |
| 137                | 228,8           | 4,4             |
| 138                | 169,5           | 17,8            |
| 139                | 197,4           | 10,8            |

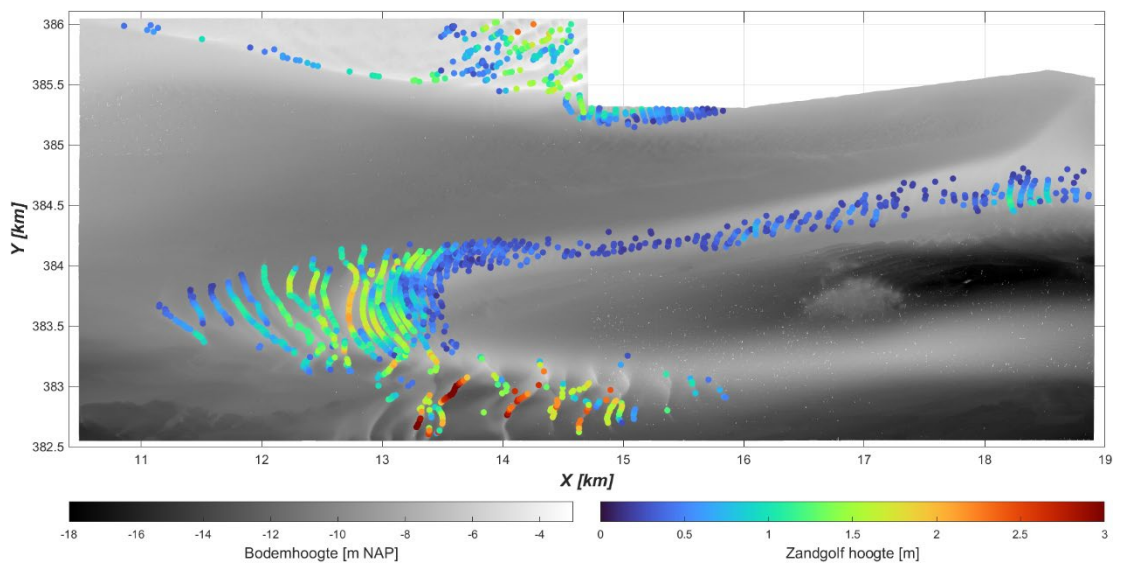
| <b>Sample Name</b> | <b>D50 (µm)</b> | <b>Slib (%)</b> |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 140                | 254,6           | 2,2             |
| 141                | 234,2           | 3,5             |
| 142                | 144,2           | 27,3            |
| 143                | 112,1           | 42,4            |
| 144                | 174,5           | 3,8             |
| 145                | 260,1           | 0,2             |
| 146                | 332,9           | 0,0             |
| 147                | 333,7           | 0,0             |
| 148                | 377,0           | 0,5             |
| 151                | 285,1           | 0,0             |
| 152                | 100,9           | 37,6            |
| 153                | 251,7           | 35,0            |
| 154                | 343,9           | 0,0             |

# F Zandgolfanalyse voor 2022 en 2023

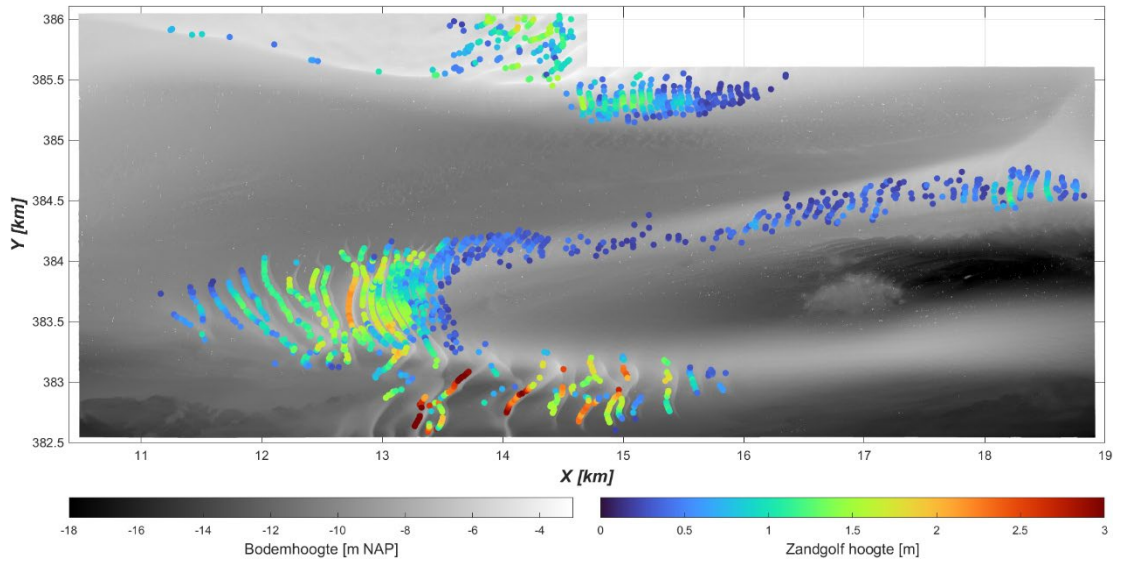
## F.1 Zandgolf hoogte



Figuur F-1: Zandgolfhoogte voor multibeam meting van 05-2022.

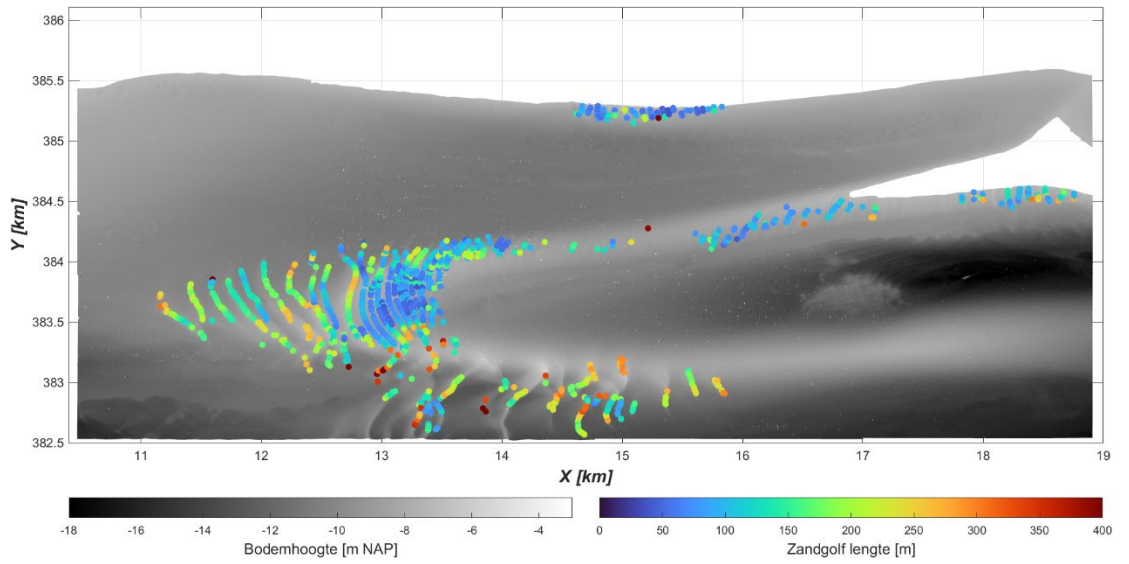


Figuur F-2: Zandgolfhoogte voor multibeam meting van 06-2022.

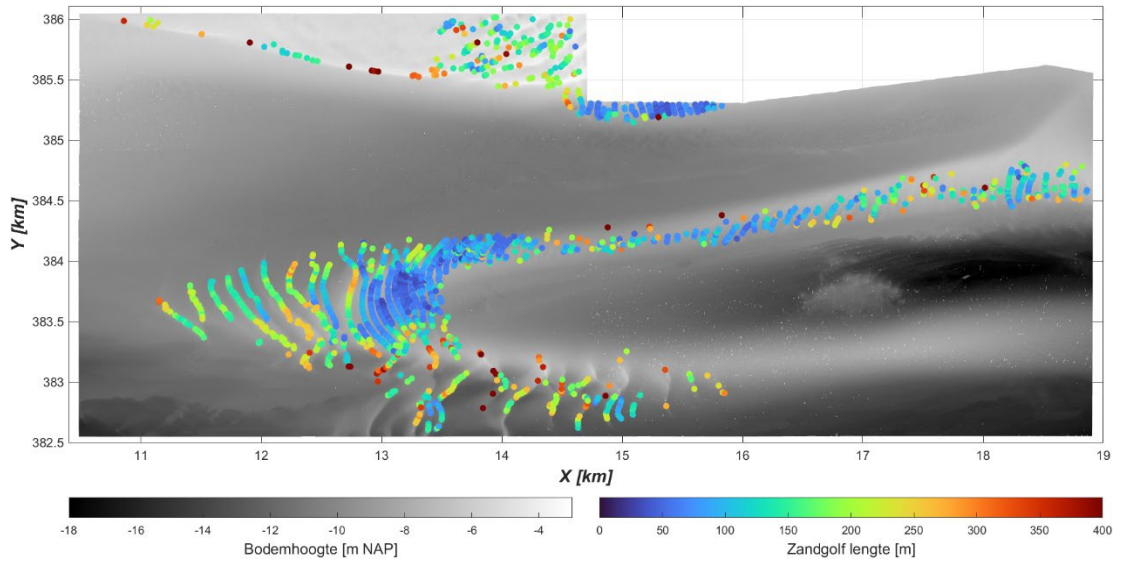


Figuur F-3: Zandgolfhoogte voor multibeam meting van 06-2023.

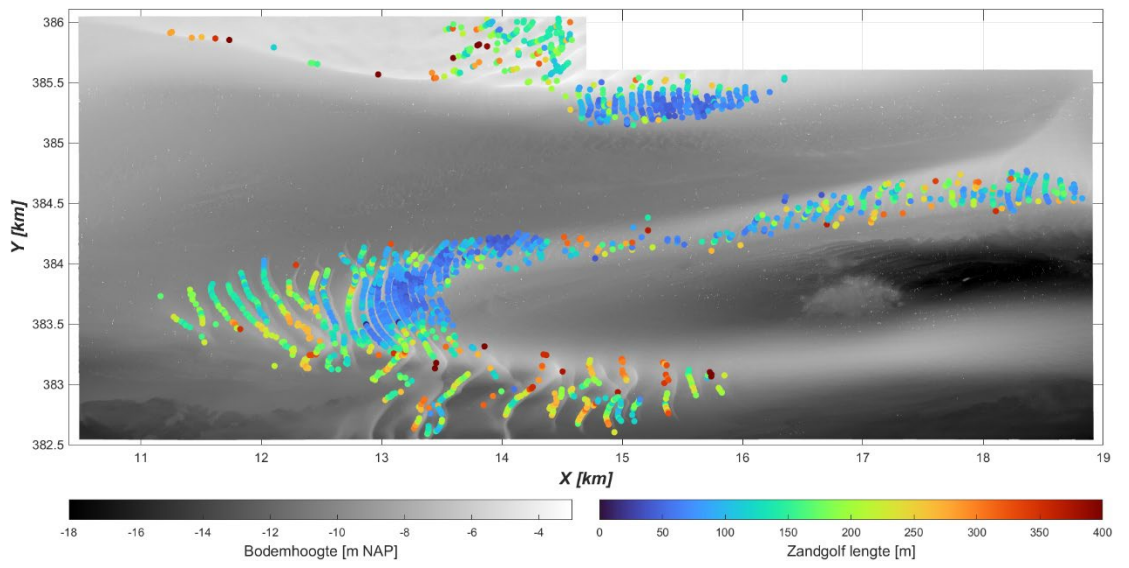
## F.2 Zandgolf lengte



Figuur F-4: Zandgolf lengte voor multibeam meting van 05-2022.

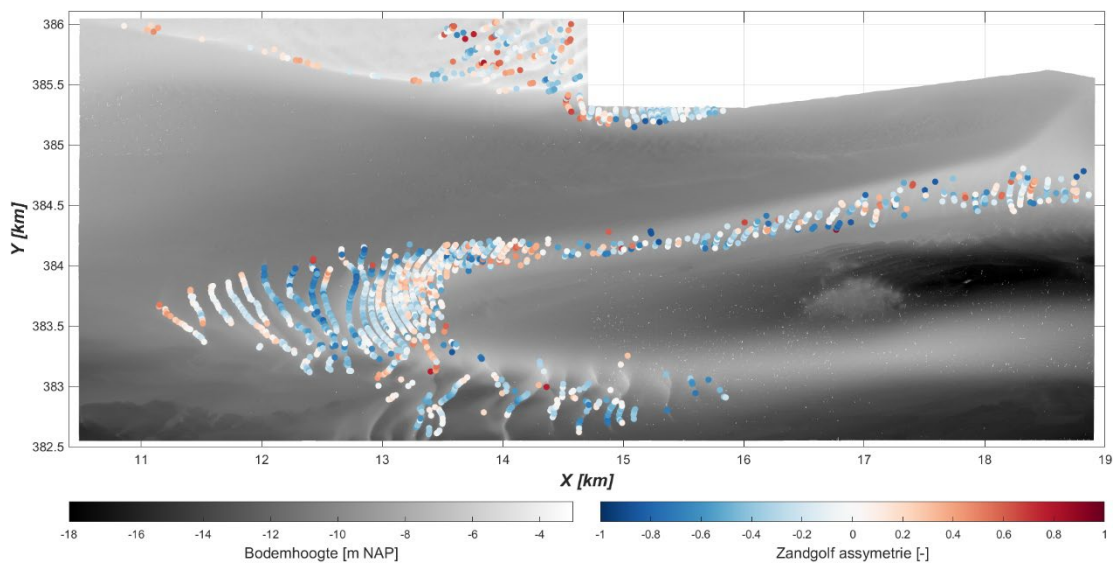


Figuur F-5: Zandgolf lengte voor multibeam meting van 06-2022.

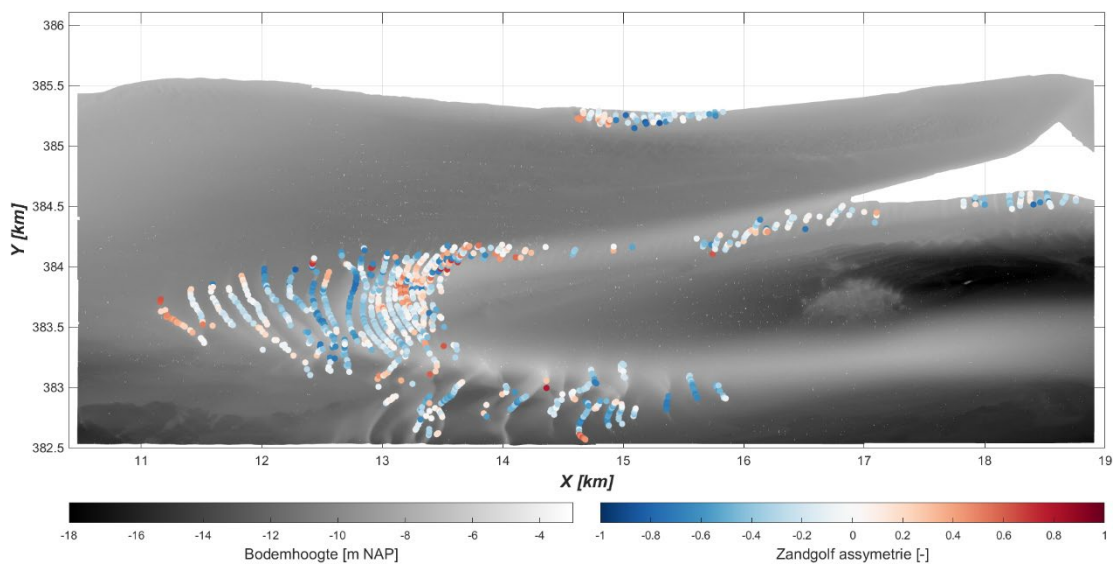


Figuur F-6: Zandgolf lengte voor multibeam meting van 06-2023.

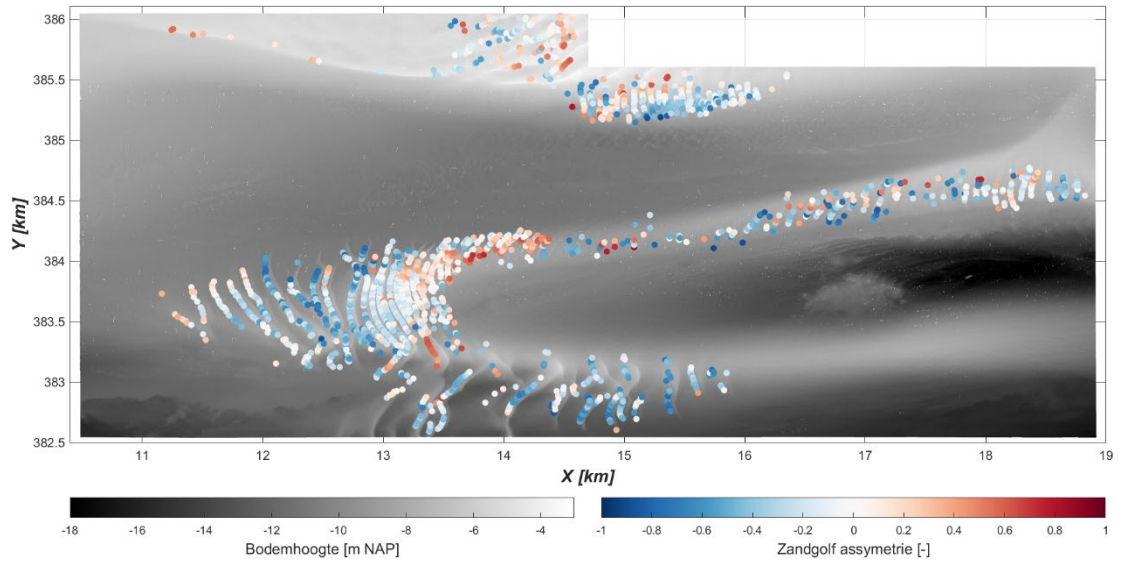
### F.3 Zandgolf asymmetrie



Figuur F-7: Zandgolfasymmetrie voor multibeam meting van 05-2022.



Figuur F-8: Zandgolfasymmetrie voor multibeam meting van 06-2022.



*Figuur F- 9: Zandgolfasymmetry voor multibeam meting van 06-2023.*

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)