Deltares

Evaluatie pilot verondieping vaargeul Boontjes



Evaluatie pilot verondieping vaargeul Boontjes

Auteur(s)
Anne Ton
Bob Smits
Roy van Weerdenburg

Evaluatie pilot verondieping vaargeul Boontjes

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Projectreferenties	SITO-PS 2026 WVH07 – Kennis voor BenO Waddenzee
Trefwoorden	Knelpuntanalyse, Waddenzee, Morfologie, Vaargeulbeheer, metingen

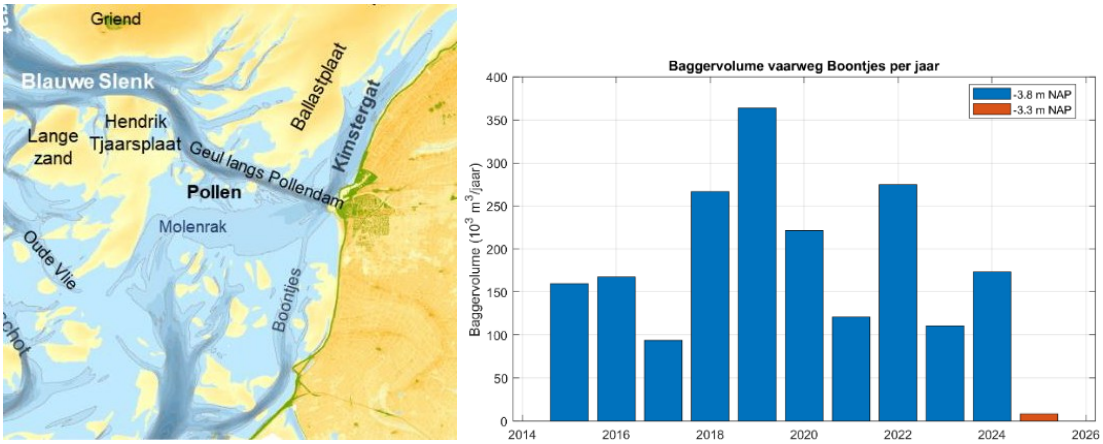
Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	28-09-2026
Projectnummer	11212818-005
Document ID	11212818-005-ZKS-0001
Pagina's	145
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)		
	Anne Ton Bob Smits Roy van Weerdenburg	

Samenvatting

Inleiding
In de vaarweg Boontjes wordt een pilot uitgevoerd om het baggervolume en daarmee de ecologische impact van baggeren en verspreiden te verminderen door de streefdiepte met 0,5 m te verkleinen van NAP-3,80 m naar NAP-3,30 m. Om de effecten van deze pilot te kunnen beoordelen en het systeembegrip te vergroten zijn tussen oktober 2024 en mei 2026 verschillende meetcampagnes uitgevoerd in en rondom de vaargeul Boontjes en het Kimstergat (zie kaartje van studiegebied in het linkerdeel van Figuur 1). Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het SITO-programmasubsidie project Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee, waarbij eerdere onder dit project ontwikkelde kennis voor dit studiegebied is meegenomen.

Het doel van deze studie is om de effectiviteit van de pilot te evalueren m.b.t. de afname van het huidige en toekomstige baggervolume, en de afname van de sedimentatie in de vaargeul. Daarnaast worden de inzichten uit de meetcampagnes gebruikt om het systeembegrip te vergroten, waaronder sturende processen voor sedimentatie in de vaargeul en het baggervolume, de verwachting op middellange termijn en de samenhang met morfologische veranderingen in de omliggende gebieden. Deze studie focust dus op morfologie, baggerbezwaar en sedimentatie; ecologische aspecten zijn in een parallelle studie onderzocht.



Figuur 1: Links: studiegebied rond de vaargeul Boontjes met namen van geulen en platen. Rechts: baggervolumes vaarweg Boontjes per jaar voorafgaand aan de pilot (blauw) en sinds de pilot (rood).

Bevindingen baggercijfers en morfologie (hoofdstuk 3 en 4)
Het baggervolume is in het eerste jaar van de pilot sterk afgenomen naar 8.000 m³ in 2025 t.o.v. gemiddeld 195.000 m³ in de jaren ervoor (zie rechterdeel Figuur 1). Ook voor de eerste helft van 2026 is het baggervolume vooralsnog vergelijkbaar sterk afgenomen t.o.v. de periode voorafgaand aan de pilot. Baggercijfers in de eerste jaren kunnen echter een onderschatting geven voor de toekomst, aangezien er ruimte is voor 0,5 m sedimentatie voordat gebaggerd hoeft te worden.

De morfologische veranderingen van de geul zijn op lokale schaal geanalyseerd aan de hand van de beheerlodingen. Hierbij is gekeken naar de totale sedimentatie in de geul, naar de veranderingen van de gemiddelde, maximale en minimale diepte in de lengte van de geul, en

naar profielen van verschillende geuldoorsnedes. Voor de toekomstverwachting is gebruik gemaakt van een lineaire extrapolatie van de gemiddelde diepte.

Uit deze analyses volgt het beeld dat sedimentatie zich sinds de pilot concentreert op een aantal plekken (dus niet langs de hele vaargeul). In de noordelijke Boontjes vindt structurele sedimentatie plaats, waardoor de 0,5 m gecreëerde ruimte geleidelijk opvult. In andere gebieden is de diepteligging van de vaargeul relatief stabiel. Op een aantal plekken moest nog wel gebaggerd worden om aan de streefdiepte en vereiste vaargeulbreedte van 100 m te voldoen, met name in de noordelijke Boontjes en langs de rand van de vaargeul. De totale netto sedimentatie in de geul is 30.000 m³ in 2025. Met de oude diepgang zou er naar schatting 75.000 m³ gebaggerd zijn (het volume boven de oude streefdiepte meegerekend). De geul is zich morfologisch nog steeds aan het aanpassen, dus het baggerbezwaar kan in de toekomst nog veranderen.

De belangrijkste conclusies uit de morfologische analyse zijn:

- Alleen in de noordelijke Boontjes treedt sedimentatie op richting NAP-3,3 m tijdens de looptijd van de pilot. Daarmee verkleint de pilot het gebied waar structureel gebaggerd moet worden. Een ondieper onderhoudsprofiel sluit dus beter aan op het natuurlijke geulprofiel waardoor aanzienlijk minder hoeft te worden gebaggerd.
- Uit de lineaire extrapolatie van de gemiddelde diepteligging komt de verwachting dat in medio 2027 – medio 2028 weer structureel baggerwerk in de noordelijke Boontjes nodig is. Voor de rest van de vaargeul geldt dat dit aanzienlijk later nodig zal zijn, of zelfs geheel achterwege kan blijven vanwege het uitblijven van sedimentatie.
- In het midden van de Boontjes bocht de geul uit. Door meebewegen met deze natuurlijke uitbochting kan de noodzaak tot baggeren worden beperkt.
- In de zuidelijke Boontjes is er een verlegging geweest ten tijde van de pilot. Deze verlegging lijkt effectief in het volgen van de natuurlijke geul. Het advies is om breder te peilen ten behoeve van een compleet overzicht van de geul en de continuïteit van de data.

Voorlopige bevindingen meetcampagnes (hoofdstuk 5)
De belangrijkste bevindingen op basis van de meetcampagne zijn:

- Het algemene beeld van stromingspatronen uit de T0-meting blijft overeind: de getijvoortplanting in Harlingen komt deels uit het Marsdiep en deels uit het Vlie. De ebstroming uit het Kimstergat gaat richting de Boontjes en (in toenemende mate) naar de Geul langs Pollendam
- De stroomsnelheden bij Boontjes Zuid zijn in de T2- en T3-meting minder vloeddominant dan in de T0- en T1-meting, mogelijk als gevolg van de geulverlegging. Ook de residuele stroming en netto sedimenttransport bij Boontjes Zuid tonen een afnemend transport in vloedrichting. Een afnemende vloeddominantie betekent dat een aandrijvende factor voor sedimentatie in de vaargeul is afgenomen.
- De gemeten troebelheid heeft op tijdschaal van dagen tot weken een duidelijke samenhang met windsnelheid, windrichting en golfhoogte. Gemiddeld over de gehele meetperiodes treedt echter géén duidelijk seizoeneffect op: gemiddelde SPM-waardes in het najaar zijn niet consistent hoger dan in het voorjaar. Dit verklaart mogelijk het gebrek aan seizoensfluctuaties in de baggervolumes over de afgelopen jaren.
- Hoewel de netto richting van stroming en sedimenttransport uit de varende 13-uursmetingen sterk fluctueert over de tijd, zijn deze over de meetraaien in de Boontjes (noord, midden en zuid) per meetmoment veelal in dezelfde richting. De fasering t.o.v. springtij en doodtij enerzijds, en het waterstandsverhang tussen Kornwerderzand en Harlingen anderzijds, lijken uit deze data sterk samen te hangen met de richting van de residuele stroming.

Synthese, Conclusie en Aanbevelingen (hoofdstuk 6 en 7)
De pilot wordt op korte termijn zeer effectief geacht in het reduceren van het onderhoudsbaggervolume van de Boontjes en het verminderen van de ecologische impact van het baggeren en verspreiden, gezien de sterke afname van baggervolumes en de beperkte sedimentatie die sinds de pilot is opgetreden. Na het opvullen van de gecreëerde 0,5 m ruimte wordt een beperkte toename van het baggerbezwaar verwacht. Aangezien een ondiepere vaargeul dichter bij de natuurlijke evenwichtsdoorsnede van de Boontjes ligt, is de verwachting dat het baggerbezwaar ook dan substantieel lager zal blijven dan bij de oude streefdiepte. Op langere termijn is de verwachting dat de evenwichtsdiepte van de Boontjes zal afnemen als gevolg van morfologische ontwikkelingen op meso-schaal (verdere ophoging plaatgebied rond Boontjes en opvulling van het Kimstergat).

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek:

- Blijf de bodemontwikkeling en baggervolumes in de Boontjes monitoren. Bredere bodempeilingen, waarbij ook het plaatgebied naast de vaargeul wordt gepeild, helpen om de morfologische ontwikkeling van het gebied beter in kaart te brengen en daarop zo nodig te anticiperen. Bovendien geeft dit meer inzicht in de mate waarin de geul opvult en de verwachte toekomstige ontwikkeling
- Herhaal de analyse van beheerlodingen en baggercijfers uit deze studie voor de gegevens uit kalender 2027 voor meer inzicht in de effectiviteit op langere termijn en de verwachte toekomstige ontwikkeling.
- Breng de ecologische effecten van baggeren en verspreiden beter in kaart, om de doorvertaling van (veranderingen in) baggervolume naar (veranderingen van) ecologische invloed explicieter te kunnen maken.
- Om de mogelijke rol van omgevingsfactoren (bijv. natuurlijke fluctuaties in de sedimentatie in de vaargeul) verder te duiden, wordt aangeraden om een vergelijking te maken van omgevingscondities (met name troebelheid) t.o.v. voorgaande jaren. Ook kunnen de inzichten uit de morfologische analyse en uit de metingen nog meer samengebracht worden om de specifieke condities te identificeren waarbij sedimentatie optreedt.

Aanbevelingen voor beheer en beleid:

- Aangezien extra overdiepte meer sedimentatie veroorzaakt, wordt afgeraden om ‘vooruit’ te baggeren (d.w.z. de geul niet vroegtijdig verdiepen tot onderhoudsdiepte).
- Gezien de effectiviteit van de pilot wordt aanbevolen om de streefdiepte van NAP-3,3 m (met onderhoudsdiepte NAP-3,8 m) te blijven hanteren om natuurimpact te beperken.
- Lokale baggerwerkzaamheden aan de rand van de vaargeul kunnen worden verminderd door de vaargeul zijwaarts mee te laten verplaatsen met het natuurlijke meanderen van de geul Boontjes, mits nautische en praktisch haalbaar. Dit is al staand beleid, maar bij de Boontjes kan hier meer op gestuurd worden gezien de in deze studie geconstateerde meandering.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
	Inhoud	**7**
1	**Inleiding**	**9**
1.1	Pilot verondieping vaarweg Boontjes	9
1.2	Studiegebied en eerdere studies vaarweg Boontjes	9
1.3	Doelstelling	10
1.4	Aanpak en leeswijzer	11
2	**Literatuurstudie**	**12**
2.1	Literatuur grootschalige morfologie	12
2.2	Literatuur mesoschaal morfologie	13
2.2.1	Kombergingsgebied Vlie	13
2.2.2	Kombergingsgebied Marsdiep	14
2.3	Conceptueel systeembegrip vaarweg Boontjes (inzichten tot 2025)	15
2.4	Hypotheses	19
3	**Analyse van baggergegevens vaarweg Boontjes**	**21**
3.1	Doel en methode	21
3.2	Beschikbare gegevens	21
3.3	Ontwikkeling baggervolumes vaarweg Boontjes	21
3.4	Locaties baggerwerkzaamheden	22
3.5	Ontwikkeling baggercijfers elders in de Waddenzee	23
3.6	Samenvatting bevindingen	24
4	**Morfologische analyse van vaarweg Boontjes**	**25**
4.1	Doel en methode	25
4.2	Beschikbare gegevens	25
4.3	Morfologische ontwikkeling tijdens pilot: bodems en doorsnedes	25
4.3.1	Algemene ontwikkeling	25
4.3.2	Doorsnedes	29
4.3.3	Eerste reflectie op hypotheses	31
4.4	Volumeveranderingen en baggervolumes tijdens en in aanloop naar pilot	32
4.5	Verwachte toekomstige ontwikkeling	37
4.6	Samenvatting bevindingen morfologische analyse	38
5	**Voorlopige analyse meetcampagne**	**41**
5.1	Doel en methode	41

5.1.1 Doel 41
5.1.2 Beschikbare gegevens 42
5.1.3 Kalibratie van troebelheidssensoren 44
5.2 Resultaten meetframes en golfdata 44
5.2.1 Waterstanden, stroomsnelheden en troebelheid 45
5.2.2 Gemeten troebelheid en analyse sedimentconcentraties 48
5.2.3 Wind, golven en troebelheid 53
5.2.4 Residuele stroming en sedimenttransporten 59
5.3 Resultaten 13-uursmetingen van stroming en SPM 63
5.4 Resultaten bodemsamenstelling 67
5.5 Samenvatting voorlopige bevindingen meetcampagne 68
6 Synthese: update van conceptueel systeembegrip vaarweg Boontjes 71
7 Conclusie 74
7.1 Bevindingen baggercijfers en morfologie 74
7.2 Voorlopige bevindingen meetcampagnes 75
7.3 Aanbevelingen 76
Literatuur 78
A Aanvullende doorsnedes morfologische analyse 79
B Aanvullende informatie meetframes 81
B.1 Bijzonderheden bij inwinning en oplevering meetgegevens 81
B.2 Basisstatistieken per meetframe en per meetperiode 82
B.3 Ruimtelijke patronen 86
B.4 SPM-tijdreeksen onderste OBS-sensor 90
B.5 Blauwe Slenk 92
B.5.1 Voorjaar 2025 93
B.5.2 Najaar 2025 98
B.6 Kimstergat 101
B.6.1 Voorjaar 2025 102
B.6.2 Najaar 2025 106
B.7 Boontjes Noord 111
B.7.1 Voorjaar 2025 111
B.7.2 Najaar 2025 116
B.8 Boontjes Zuid 121
B.8.1 Voorjaar 2025 122
B.8.2 Najaar 2025 127
B.9 Residuele debieten en sedimenttransporten 132
C Varende metingen 134

1 Inleiding

1.1 Pilot verondieping vaarweg Boontjes

Bij de vaarweg Boontjes wordt een pilot uitgevoerd om het baggervolume, en daarmee de impact van baggeren en verspreiden op natuurwaarden, te verminderen middels een verondieping van de vaarweg Boontjes door de streefdiepte met 0,5 m te verkleinen van NAP -3,80 m naar NAP -3,30 m. De maximale onderhoudsdiepte wordt daarmee ook aangepast en verschuift van NAP -4,30 m naar NAP -3,80 m. De geulbreedte blijft om nautische redenen gehandhaafd op 100 m.

Om de effecten van de pilot te kunnen beoordelen en het systeembegrip te vergroten zijn tussen oktober 2024 en mei 2026 verschillende meetcampagnes uitgevoerd in en rondom vaargeul Boontjes en het Kimstergat. De meetcampagne omvatte een T0-meting tussen oktober 2024 en december 2024 (voorafgaand aan de pilot) en vervolgmetingen tijdens de uitvoering van de pilot. In 2025 is reeds de analyse van de T0-meting uitgevoerd en advies gegeven over de opzet van de vervolgmetingen (Smits et al., 2025). Voor de analyse in 2026 ligt de nadruk op de morfologische ontwikkeling en de baggercijfers, ter ondersteuning van de evaluatie van de pilot. Daarnaast worden ook de metingen gedurende de looptijd van de pilot (uitgevoerd in mei 2025, oktober 2025 en mei 2026) geanalyseerd. Dit wordt in het voorliggende rapport beschreven.

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het SITO-programmasubsidie project Kennis voor Beheer en Onderhoud Waddenzee, wat als doel heeft een solide kennis- en informatiebasis te creëren voor diverse vragen die verband houden met morfologie en sediment in de Waddenzee. De tijdlijn voor de besluitvorming rond de vaarweg Boontjes is van groot belang voor het verloop van deze studie. De informatievoorziening voor volgende planperiode van het Nationaal Waterprogramma (NWP) moet uiterlijk oktober 2026 afgerond zijn. Daarvoor is het belangrijk dat de inzichten uit de monitoring van de pilot goed en tijdig beschikbaar zijn. Dit rapport levert daartoe een belangrijke bijdrage.

1.2 Studiegebied en eerdere studies vaarweg Boontjes

Het studiegebied ligt op de overgang tussen kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie, zie Figuur 1-1 met naamgeving van relevante geulen en platen. In 2015-2016 is hier een drempel uit de vaargeul verwijderd, waarbij de streefdiepte van NAP-2,8 m naar NAP-3,8 m is verlaagd. Deze studie bouwt voort op eerdere B&O Wadden deelprojecten over de vaargeul Boontjes in 2021, 2022 en 2025, uitgevoerd door Deltares. In 2021 is middels data analyse gekeken naar het effect van de drempelverwijdering in de vaargeul Boontjes en sturende processen voor de sedimentatie in de vaargeul (Colina Alonso et al., 2021). In 2022 zijn deze aspecten in een modelstudie nader onderzocht, is gekeken naar alternatieve scenario's voor vaargeuldimensies (waaronder verdieping en verondieping) en is een inschatting gemaakt van de toekomstige ontwikkeling van het benodigde onderhoudsbaggervolume (Smits et al., 2022). Het ontbrak echter aan voldoende meetgegevens om goede inschattingen te maken van de sedimentatie in de vaargeul en daarmee van het baggervolume.

De eerste analyse van de T0-meting tijdens de pilot (Smits et al., 2025) leverde een aantal nuttige inzichten op over de waterbeweging en sedimentdynamiek in en rond de vaargeul Boontjes, zoals samengevat in hoofdstuk 2. Deze inzichten worden, in combinatie met de analyse van de vervolgmetingen uit dit rapport, gebruikt om de resultaten van de pilot te duiden en waar mogelijk het vaargeulonderhoud te optimaliseren.



Figuur 1-1: Kombergingsgebieden Vlie (boven) en Marsdiep (onder) met namen van geulen en platen en op de achtergrond de bodemligging van resp. 2010 en 2009 (beide afkomstig uit Oost et al., 2019). In het rode kader het studiegebied in de omgeving van de Boontjes.

1.3 Doelstelling

De pilot verondieping vaarweg Boontjes heeft als doel om het onderhoudsbaggervolume van de Boontjes omlaag te brengen en de ecologische impact van het baggeren en verspreiden te verminderen.

Het doel van deze studie is om de effectiviteit van de pilot te duiden. Daarbij wordt onderzocht of eventuele afname van het baggerwerk direct aan de pilot gelinkt is. Daarnaast wordt gekeken of een voorspelling van de effecten van de pilot kan worden gedaan. Daarnaast worden de inzichten uit de meetcampagnes gebruikt om het systeembegrip te vergroten. Onderdeel daarvan zijn de oorzaken en sturende parameters van het

baggervolume gedurende de pilot en de verwachting voor de middellange termijn, alsmede de mate van sedimentatie en erosie in de vaargeul en de samenhang daarvan met morfologische veranderingen van de omliggende gebieden.

1.4 Aanpak en leeswijzer

In dit rapport worden de inzichten uit literatuurstudie (hoofdstuk 2), een analyse van de baggergegevens (hoofdstuk 3), een morfologische analyse (hoofdstuk 4) en een eerste analyse van de meetcampagne (hoofdstuk 5) afzonderlijk beschreven. De inzichten uit deze analyses worden bij elkaar gebracht in een synthese (hoofdstuk 6). Het rapport eindigt met een conclusie over de pilot en aanbevelingen voor beheer (hoofdstuk 7).

2 Literatuurstudie

De literatuurstudie in dit hoofdstuk is gericht op morfologie op macro- en mesoschaal. De literatuurstudie dient als achtergrond bij en context voor de morfologische analyse in Hoofdstuk 3. Het hoofdstuk eindigt met een samenvatting van het conceptuele systeembegrip van de situatie in de Boontjes voorafgaand aan de pilot.

2.1 Literatuur grootschalige morfologie

In sedimentbalansen die zijn opgesteld voor de Waddenzee is te zien dat de afsluiting van de Zuiderzee zorgde voor een trend van sedimentimport in het bekken. Dit leidde tot sedimentatie en een toename van het plaatareaal, wat gepaard ging met een afname van het subgetijdegebied. Deze trend was het sterkste in de decennia na de afsluiting en is sindsdien afgezwakt, al importeert het Vlie bekken nog steeds netto sediment. Wanneer de volumeverandering in meer detail wordt bekeken valt op dat met name de plaatgebieden dicht bij de Friese kust toenemen in volume, oppervlakte en hoogte, terwijl centraal in het bekken en nabij de eilandkusten juist sprake is van erosie (Meijers et al., 2025).

In eerdere B&O Wadden deelprojecten is de meer recente ontwikkeling van de westelijke Waddenzee bestudeerd (Grasmeijer et al., 2022), waaruit bleek dat het getijdebiet in het Marsdiep toeneemt, terwijl deze in het Vlie sterk afneemt. De afname van getijdebiet in het Vlie lijkt het gevolg te zijn van sterke sedimentatie en uitbreiding van het plaatoppervlak langs de Friese vastelandskust nabij de Boontjes. De verwachting is dat deze trend de komende jaren zal doorzetten, met als natuurlijk respons van geulen om te vernauwen. Daarnaast zijn kombergingsrapportages opgesteld van het Marsdiep (Vroom et al., 2023) en het Vlie (Meijers et al., 2025), waarin de morfologische ontwikkeling op verschillende tijd- en ruimteschalen is beschreven. Ook is er een bredere studie gedaan naar abiotische effecten van baggerwerkzaamheden in de Waddenzee (De Wit et al., 2024) en is er een knelpuntanalyse uitgevoerd voor het traject Harlingen-Noordzee (Quataert et al., 2024), waarbij specifiek ook aandacht is besteed aan de ontwikkeling van het Kimstergat. Tenslotte is er door Jager et al. (2023) een studie gedaan naar depositie van slib en algen op het strand van Harlingen, waaruit de belangrijke rol van waterafvoer bij Kornwerderzand en de windcondities (zowel windkracht als -richting) naar voren kwam als aandrijvende kracht.

Voor de Afsluitdijk liepen geulen vanuit zowel het zeegat van het Marsdiep als het Vlie door naar de Zuiderzee en bestond er geen morfologisch wantij[1] tussen deze bekkens. Het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie heeft door deze historische achtergrond een ander karakter dan de wantijen tussen andere kombergingsgebieden (Vroom et al., 2023). Het Marsdiep en het Vlie worden nog altijd verbonden door geulen en het sublitoraal. Studies naar de waterbeweging laten een grote uitwisseling van water zien tussen de beide kombergingsgebieden (Ridderinkhof, 1990; Vroom, 2011; Wang et al., 2013; Duran-Matute et al., 2014; Grasmeijer et al., 2022). Op de grens van beide kombergingsgebieden liggen sublitorale gebieden, en er lopen geulen over het wantij (o.a. Boontjes, Molenrak, Zuidoostrak, Scheurrak) (zie o.m. Elias et al., 2012; Elias & Vermaas, 2018; Elias, 2019).

[1] Het morfologische wantij wordt gedefinieerd als het ondiepste gebied tussen twee bekkens, meestal niet doorsneden door geulen. Het morfologische wantij wordt vaak gebruikt als afbakening van een kombergingsgebied. Het hydrodynamische wantij is de zone waar de watermassa's die door de zeegaten naar binnen stromen elkaar ontmoeten. Omdat deze locatie afhankelijk van getij- en windcondities varieert is dit een zone en geen scherpe grens.

Echter uit de meeste studies volgt een verschuiving van het wantij tussen Marsdiep en Vlie naar het noordoosten na aanleg van de Afsluitdijk, vooral in de periode direct aansluitend op de aanleg. Het kombergingsgebied Marsdiep nam daardoor in oppervlakte toe ten koste van het kombergingsgebied Vlie (Vroom et al., 2023). In 1933 had de Doove Balg, de hoofdgeul in het Marsdiep een omvang van 70% ten opzichte van de Blauwe Slenk, de hoofdgeul in het Vlie. In 1950 waren de geuldoorsnedes aangepast, waarbij beide geulen even groot waren geworden. Een verandering wijst erop dat de invloed vanuit het Marsdiep is toegenomen ten opzichte van het Vlie. Deze toename stopt na 1950 en dat wekt de suggestie dat daarna de ligging van het wantij relatief stabiel is geweest (Vroom et al., 2023).

2.2 Literatuur mesoschaal morfologie

De morfologie op mesoschaal wordt uitgebreid besproken in de kombergingsrapportage van het Vlie (Meijers et al., 2025) en de kombergingsrapportages van het Marsdiep (Vroom et al., 2023). Dit zijn de belangrijkste bronnen voor onderstaande literatuurstudie.

2.2.1 Kombergingsgebied Vlie

Het kombergingsgebied Vlie is sterk beïnvloed door de afsluiting van de Zuiderzee in 1932. Zo nam de getijslag bij Harlingen na de afsluiting met 40% toe en namen door de toegenomen getijslag ook de debieten door het zeegat in eerste instantie toe. De huidige trend is dat de debieten en stroomsnelheden juist licht afnemen, met name nabij de kust. Het zoutgehalte in het Vlie is zeer variabel en wordt sterk beïnvloed door de spuisluizen in de Afsluitdijk (Meijers et al., 2025).

Het kombergingsgebied is ontstaan vanuit een gedeeld bekken van het Marsdiep, Vlie en de Zuiderzee. De afsluiting van de Zuiderzee had dan ook een grote invloed op dit kombergingsgebied: de wantijen verplaatsten in (noord)oostelijke richting, er ontstond een nieuw morfologisch wantij tussen het Marsdiep en het Vlie en geulen die vroeger doorliepen naar de Zuiderzee trokken zich terug. De geulen in het zuiden en westen van het Vlie nemen hierdoor nog altijd in omvang af (Meijers et al., 2025).

In sedimentbalansen die zijn opgesteld voor de Waddenzee is te zien dat de afsluiting van de Zuiderzee zorgde voor een trend van sedimentimport in het kombergingsgebied Vlie. Dit leidde tot sedimentatie en een toename van het plaatareaal, wat gepaard ging met een afname van het subgetijdegebied. Deze trend was het sterkste in de decennia na de afsluiting en is sindsdien afgezwakt, al importeert het bekken nog steeds netto sediment. Wanneer de volumeverandering in meer detail wordt bekeken valt op dat met name de plaatgebieden dichtbij de Friese kust toenemen in volume, oppervlakte en hoogte, terwijl centraal in het bekken en nabij de eilandkusten juist sprake is van erosie (Meijers et al., 2025).

Zowel ten zuiden als ten noorden van de Geul langs Pollendam vindt grootschalige sedimentatie plaats, waarbij platen zowel in hoogte als in oppervlakte groeien. De platen rondom de Boontjes, het Molenrak, de oostelijke Ballastplaat en de Vlakte van Oosterbierum (zie Figuur 1-1 voor de naamgeving en ligging van deze geulen en platen) laten een duidelijke trend van verlanding zien. Hierdoor neemt het kombergingsvolume van verschillende geulsystemen geleidelijk af. Een belangrijke ontwikkeling hierin is de voortdurende sedimentatie in het Kimstergat, waar de getijvolumes afnemen. Het Kimstergat wordt in toenemende mate gevoed vanuit het Vlie (via de Geul langs Pollendam), en minder vanuit het Marsdiep (via de Boontjes en het Molenrak, waar de debieten sterk zijn afgenomen). De geulen rond Harlingen functioneren daarbij als een sterk gekoppeld systeem: veranderingen in één geul hebben directe gevolgen voor de waterverdeling en morfologische ontwikkeling van andere geulen in het gebied.

2.2.2 Kombergingsgebied Marsdiep

Veranderingen in de getijslag hebben in het Marsdiep in vergelijking met andere bekkens veel gevolgen voor het kombergingsvolume, vanwege het grote areaal aan sublitorale gebieden. Sedimentatie op en areaaluitbreiding van intergetijdengebieden treden alleen op op het Balgzand en recentelijk rondom de Boontjes, waardoor in deze gebieden het kombergingsvolume afneemt. Rondom de Boontjes leidt dat vooralsnog niet tot een afname van het geulvolume, maar op termijn naar verwachting wel (Vroom et al., 2023). Het is opvallend dat de Boontjes als enige geul na afsluiting direct een toename van het geulvolume laat zien, terwijl alle andere deelgebieden een afname van het geulvolume vertonen. In de afgelopen decennia nemen de geulvolumes in de deelgebieden Boontjes en Zwanenbalg toe. Dit hangt mogelijk samen met het opvullen van het subtidaal gebied (Vroom et al., 2023).

Ten westen van het noordelijk deel van de Boontjes is het ondiepe gebied van jaar op jaar aan het uitbreiden. Ten oosten van de vaargeul neemt de diepte ook af. In dit gebied was, voordat de baggerwerkzaamheden plaatsvonden, sprake van een afname van de doorstroomoppervlakte van de geul (Vroom et al., 2023). De oorzaken van de hoogteveranderingen van de droogvallende platen zijn niet altijd duidelijk. Voor sommige locaties hangt de ontwikkeling samen met veranderingen in de aan- en afstroming over de platen, op andere plekken is de sedimentatie mogelijk het gevolg van een ruime aanvoer van sediment, in combinatie met relatief rustige condities. Omdat de ontwikkelingen zo variabel zijn, is geen sprake van één generiek toepasbare verklaring voor de veranderingen in de hoogte van de platen (Vroom et al., 2023).

Vaarweg Boontjes

De Boontjes is een staartgeul (Van der Vegt, H. & J. Cleveringa, 2022). Voordat de baggerwerkzaamheden plaatsvonden was er sprake van een natuurlijke afname van het doorstroomoppervlak van de geul (De Wit et al., 2024). In 2012 is besloten de drempel in het noordelijke deel van de geul nabij Harlingen te verdiepen van een streefdiepte van NAP-2,8 m naar NAP-3,8 m.

De Boontjes wordt via onderhoudsbaggerwerk op diepte gehouden. De jaarlijkse omvang sinds de verdieping van de drempel varieert en piekt in sommige jaren tot ruim 350.000 m^3. Dit is veel meer dan de 20.000 m^3 die was voorspeld (Ouwerkerk & Vuik, 2012). In 2021 en 2022 is het baggerbezwaar en de morfologische ontwikkeling nader geanalyseerd (Colina Alonso et al. 2021; Smits et al. 2022). Uit deze studies blijkt dat het baggerbezwaar een andere samenstelling heeft dan eerder aangenomen, met een groter aandeel slib. Omdat slib veel water bevat, nemen de baggervolumes sterker toe dan de baggermassa (in ton droge stof, TDS). De baggeraar heeft aangegeven dat het sediment slibrijker is geworden sinds de drempelverwijdering. Dit kan op basis van de beperkte veldmetingen niet worden bevestigd, hoewel het plaatgebied ten westen van de Boontjes iets slibrijker lijkt geworden. In het noordelijk deel van de Boontjes, ter plaatse van de vroegere drempel wordt veel slib gebaggerd en vormt zich in de zomer soms een vloeibare sliblaag aan de bodem (fluid mud). In de zuidelijke Boontjes is het sediment zandiger en ontstaan bodemvormen, waarvan de toppen af en toe worden weggebaggerd.

De Boontjes zal in toenemende mate hinder ondervinden van de grootschalige sedimentatietrend die langs de gehele Waddenzee bij de vastelandskust optreedt. De Boontjes verbindt de twee kombergingsgebieden. Van een hydrodynamisch wantij[1], waar getijstromen uit de twee bekkens elkaar ontmoeten, is hier geen sprake. Het mogelijke morfologische wantij wat zich in het noordoosten van de Boontjes bevindt zorgt echter wel voor lage stroomsnelheden, wat ook bijdraagt aan toegenomen sedimentatie in het gebied rondom de Boontjes. Indien het (nu nog veelal sublitorale) plaatgebied rondom de Boontjes verder ophoogt, zal deze het kombergingsvolume van de geul gaan verkleinen. Bovendien neemt door de ophoging van platen de golfgedreven resuspensie op de platen toe, waardoor

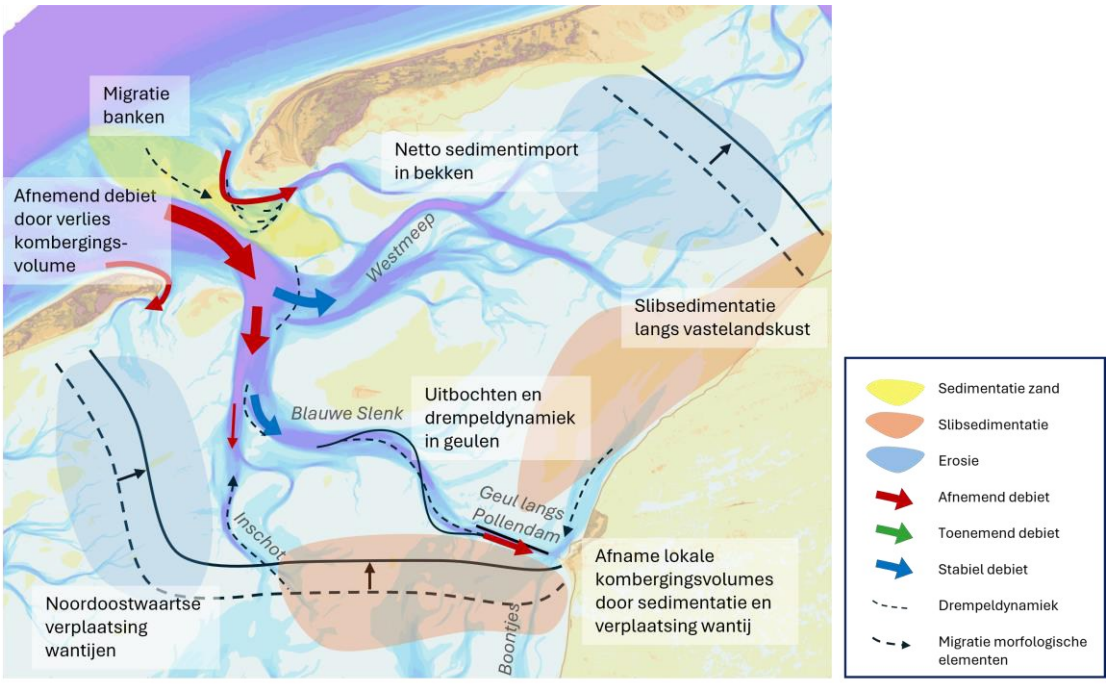
de aanvoer van sediment naar de geul is toegenomen. Vanwege de verdieping van de geulbodem neemt golfgedreven resuspensie in de geul juist af. Dit kan een verklaring vormen voor de toegenomen slibsedimentatie in de geul (Smits et al. 2022).

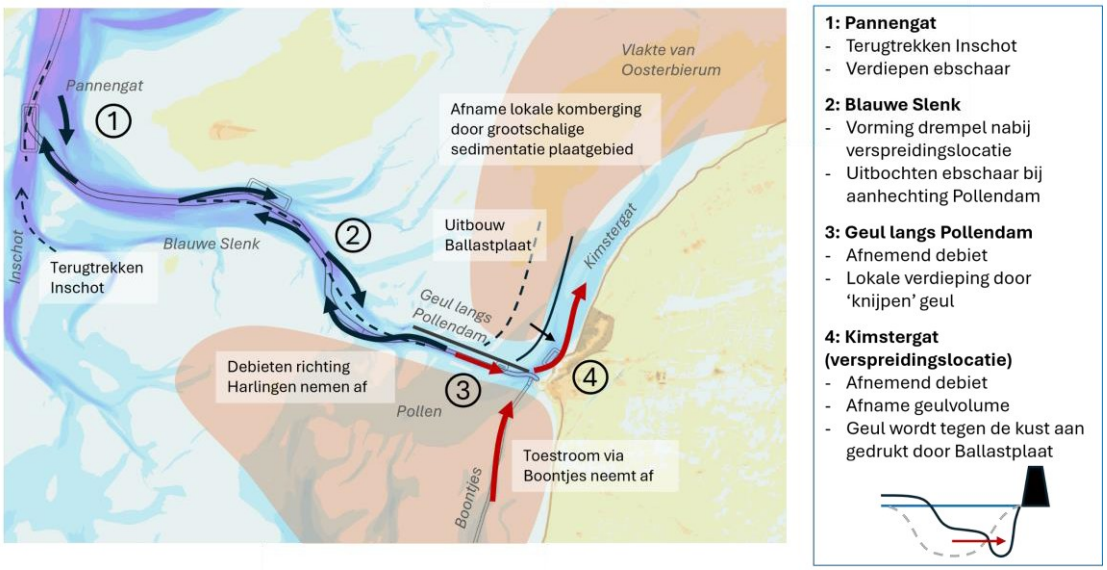
Op basis van modelberekeningen (Ouwerkerk & Vuik, 2012) werd aangenomen dat een verdiepte Boontjes meer stroming trekt. De sedimentatie op het plaatgebied rondom de Boontjes (autonome trend) leidt tot meer beroering door golven en daarmee meer aanvoer van sediment naar de Boontjes, met als gevolg meer sedimentatie in de vaargeul en daardoor een toename van baggerbezwaar. Ook bleek uit modelberekeningen dat de zoetwaterspui bij Kornwerderzand een netto sedimenttransport nabij de bodem van het slibrijke gebied in het noorden (waar ook de verspreidingslocaties liggen) naar het zuiden veroorzaakt (Vroom et al., 2023).

2.3 Conceptueel systeembegrip vaarweg Boontjes (inzichten tot 2025)

In een eerdere studie van Deltares (Smits et al., 2022) is op basis van data-analyse en numerieke modelresultaten een synthese gemaakt van de systeemwerking van de vaarweg Boontjes op mesoschaal en de toename van het baggerbezwaar. De belangrijkste aspecten uit die synthese worden in deze paragraaf (2.3) kort samengevat en aangevuld met inzichten uit de analyse van de T0-meting (Smits et al., 2025) als context voor de analyse. Dit betreft dus de situatie voorafgaand aan de pilot.

Grootschalige en mesoschaal morfologische ontwikkeling
Zoals besproken in paragrafen 2.1 en 2.2 wordt het gebied rond de vaargeul Boontjes nog steeds in belangrijke mate beïnvloed door de gevolgen van de afsluiting van de Zuiderzee, waardoor grootschalige sedimentatie (‘verlanding’) plaatsvindt, aangezien netto sedimentimport groter is dan de huidige zeespiegelstijging en bodemdaling. Daardoor zijn grote gedeelten subgetijdengebied opgehoogd naar intergetijdengebied, met als gevolg een afname van het kombergingsvolume en een afname van het geuldebiet, waardoor het evenwichtsprofiel van de geul afneemt. Deze effecten zijn gevisualiseerd in Figuur 2-1 (Meijers et al., 2024).





Figuur 2-1: Ontwikkelingen op de schaal van het kombergingsgebied Vlie, op de tijdschaal van tientallen jaren (boven) en op de schaal van morfologische eenheden, op de tijdschaal van jaren (onder). Beide afkomstig uit Meijers et al. (2024).

Verder blijkt uit recente bodempeilingen dat de hoofdgeul vanuit het Marsdiep (Doove Balg) rond de zuidelijke Boontjes licht noordwaarts uitbreidt en verdiept. Hierbij vormt een nieuwe vloedschaar oostelijk van de vroegere vaarweg. Deze ontwikkeling wordt in Hoofdstuk 3 in meer detail geanalyseerd. In oktober 2025 (dus tijdens de pilot) is de vaarweg verplaatst naar de nieuwe vloedschaar, het zogenaamde 'oostelijke tracé'. In de toekomst gaat de geul daarbij lokaal naar verwachting steeds meer tegen de harde structuren van de dijk en kribben bij Kimswerd aanliggen, waardoor de geul hier lokaal verder zal verdiepen.

Gevolgen drempelverwijdering

In combinatie met de hoger gelegen platen, heeft de drempelverwijdering geleid tot een flinke toename van het baggerbezwaar voor vaargeulonderhoud als gevolg van:

- afname gemiddelde stroomsnelheden door verruiming (ondanks hogere pieksnelheden)
- afname van het gemiddelde getijdebiet door afname kombergingsvolume door natuurlijke trends;
- toegenomen sedimentaanvoer naar de vaargeul door groei intergetijdengebied en afname getijvolume; en
- mogelijk ook afname van golfgedreven resuspensie (opwoeling van sediment) uit de vaargeul.

Getijvoortplanting en stromingspatronen

- Voor de afsluiting van de Zuiderzee liepen geulen vanuit zowel het Marsdiep als het Vlie door naar de Zuiderzee en bestond er geen morfologisch wantij tussen deze kombergingsgebieden. Door deze gezamenlijke geschiedenis heeft dit wantij nog altijd een bijzonder karakter: het is dieper dan andere wantijen en er lopen geulen over het wantij, waardoor er veel uitwisseling tussen het Marsdiep en het Vlie plaatsvindt.
- De geul Boontjes verbindt de kombergingsgebieden van het Marsdiep en het Vlie en loopt dus over het wantij. Het drempelgebied van de Boontjes ligt op deze overgang tussen het Marsdiep en het Vlie, waardoor lokale slibsedimentatie kan plaatsvinden.
- Uit de T0-meting bleek dat de vloedstroming door de gehele vaargeul meestal noordwaarts gericht was. De getijvulling van de Boontjes is dus voornamelijk vanuit het Marsdiep afkomstig.

- De getijvulling van het Kimstergat vindt steeds meer plaats vanuit het Vlie via de Geul langs de Pollendam en daarnaast via het Molenrak en Boontjes. Als gevolg hiervan lijkt het Kimstergat zich morfologisch aan te passen door zich meer te oriënteren op de Geul langs de Pollendam. Uit de T0-meting bleek echter dat de getijvulling van het Kimstergat ook gedeeltelijk afkomstig is uit de Boontjes en dat ook de ebstroming zich verdeelt over de Geul langs Pollendam, het Molenrak en de Boontjes. De mate van uitwisseling tussen Boontjes en Kimstergat lijkt sterk afhankelijk van getij- en windcondities.

Wind & golven

- Windgolven spelen een rol via resuspensie van sediment op de platen, vooral bij wind uit zuidwesten, westen en noordwesten. Oostenwind speelt een beperkte rol, aangezien de Boontjes en omringende platen zich dan in de luwte van het vasteland bevinden.
- De verwachting is dat het sediment, na resuspensie door golven, in de geul terechtkomt door golfgedreven transport (geul-plaatuitwisseling).
- Windgedreven stroming kan van invloed zijn op de richting van het (netto) sedimenttransport, vooral bij wind uit het zuiden of noorden (langsrichting van de vaargeul).

Uit de T0-meting bleek dat wind en golven vooral een grote rol spelen voor SPM bij hoge windsnelheden in de ondiepere geulen (meetlocaties enkel in geulen). Wind uit het noordwesten (de dominante windrichting voor stormopzetcondities en daarmee meest bepalende conditie voor slibtransport in de Waddenzee) heeft het grootste effect op SPM in de vaarweg Boontjes, al was er weinig zuidwestenwind (normaliter de meestvoorkomende windrichting) gedurende de T0-meting.

- Het Kimstergat heeft hoge wadplaten en zeer hoge slibconcentraties door sterke sedimentatie afgelopen decennia en grote verspreidingsvolumes (grotendeels afkomstig uit de haven van Harlingen). Het effect van golven is hier snel merkbaar in SPM door nalevering vanuit de bodem. Vanwege deze morfologische achtergrond bepaalt windgedreven stroming de richting van het netto sedimenttransport. Door de lokale geometrie zorgt zuidenwind voor netto sedimenttransport in vloedrichting (naar de platen) en noordenwind voor netto sedimenttransport in ebrichting (naar de Geul langs Pollendam, de Boontjes en het Molenrak).

Gravitatiecirculatie en retourstroming

- De combinatie van getijdewerking en de zoetwaterspui vanuit Kornwerderzand kan leiden tot gravitatiecirculatiepatronen in de Boontjes met aan het oppervlak noordwaarts gericht transport (zoetwaterpuls) en nabij de bodem zuidwaarts gericht transport. Hierdoor kan zuidwaarts gericht sedimenttransport optreden en een zogenaamd *Turbidity Maximum* (troebelheidsmaximum) in de Boontjes ontstaan. Bij een modelscenario zonder zoetwater is het transport uniformer over de gehele verticaal (tijdens vloed noordwaarts en tijdens eb zuidwaarts).
- Uit de T0-meting werd geen duidelijke aanwijzing gevonden voor een dergelijk gravitatiecirculatiepatroon uit de 3D-stromingsprofielen; er is slechts een zwakke correlatie tussen zoutgehalte en SPM en er is geen correlatie met het spuidebiet bij Kornwerderzand.
- Onder sommige betrokkenen leeft een hypothese dat het verspreiden van gebaggerd materiaal uit de Boontjes in het Kimstergat ineffectief is, vanwege een mogelijke retourstroming naar de vaargeul Boontjes. Het is goed hierbij te realiseren dat het baggerbezwaar uit de haven van Harlingen (orde 1 miljoen m³ per jaar), tevens

verspreid wordt in het Kimstergat[2]. Met een numeriek model kon een dergelijke ebstroming vanuit het Kimstergat niet bevestigd worden (slechts 1,5% van verspreid volume volgens Smits et al. (2022)), al zou de korte gesimuleerde periode daar van invloed op kunnen zijn geweest. Voor een langere periode kan dit weliswaar hoger zijn, maar dit is voor zover bekend nog niet gekwantificeerd. Op basis van expertinschatting zal de orde grootte van een eventuele ebstroming in de bandbreedte 1-10% van het verspreide volume in het Kimstergat liggen. Vooral bij noorden- of noordoostenwind in de periode na verspreiding kan dit een rol spelen.

Bodemsamenstelling

- Als gevolg van de grootschalige morfologische ontwikkelingen en de onderhoudsbaggerwerkzaamheden is het bodemslibgehalte sinds de drempelverwijdering (in de periode voorafgaand aan de verondieping) toegenomen;
- Op basis van verschillen tussen multibeam en singlebeam dieptemetingen was er in het voorjaar en in de zomer van 2020 en 2021 een slappere bodemlaag van 20 tot 50 cm dik aanwezig in de noordelijke Boontjes, mogelijk ging het hierbij om fluid mud;
- Mogelijke oorzaken van fluid mudvorming zijn seizoensgedreven flocculatie door algengroei en agitatie van bodemslib door scheepvaart (waaronder de baggerschepen).
- Mogelijk speelde ook de baggerstrategie een rol; na wisseling van aannemer worden sinds 2024 geen verschillen meer aangetroffen tussen multibeam en singlebeam metingen en is een dergelijke slappe bodemlaag vermoedelijk dus afwezig;

Sedimentconcentratie en -dynamiek

- Tijdens de T0-meting waren gemeten SPM-gehaltes in het Kimstergat en de zuidelijke Boontjes bij vloed aanmerkelijk hoger dan bij eb. In combinatie met vloeddominante stroomsnelheden duidt dit op netto landwaarts sedimenttransport (of sedimentimport).
- Stroomsnelheden en vloeddominantie nemen noordwaarts sterk af tussen de zuidelijke Boontjes en de noordelijke Boontjes, waardoor ook de transportcapaciteit door getijstroming afneemt in noordelijke richting en sedimentatie in de vaargeul kan ontstaan.
- Dit werd bevestigd uit de residuele stromingspatronen en netto sedimenttransport. Deze waren tijdens de T0-meting alleen in de noordelijke Boontjes in de ebrichting en op de andere meetpunten in de vloedrichting. Daardoor kan lokale sedimentatie kan ontstaan in de vaargeul Boontjes als gevolg van noordwaarts sedimenttransport vanuit het zuiden en zuidwaarts sedimenttransport vanuit het noorden.

Vaargeuldimensies

- Bij het vasthouden aan de streefdiepte van NAP-3,8 m en onderhoudsdiepte van NAP-4,3 m of een verdere verdieping van de vaargeul is de verwachting dat het baggerbezwaar verder toe zal nemen door verdere afname van het kombergingsvolume en geuldebiet en een verdere toename van sedimentaanvoer vanaf de platen naar de vaargeul; en
- De verwachting is dat bij een ondiepere vaargeul, die dichter bij de natuurlijke evenwichtsdoorsnede van de Boontjes ligt, het baggerbezwaar zal afnemen.

[2] Merk op dat het effect van het verspreiden van gebaggerd materiaal op het (versneld) opvullen van het Kimstergat in deze studie niet is beschouwd. Wel wordt dit effect nader bestudeerd en zo mogelijk gekwantificeerd in een ander BO Wadden deelproject dat in 2026 wordt uitgevoerd: de Knelpuntanalyse Kimstergat.

2.4 Hypotheses

In Paragraaf 2.1 en 2.2 zijn de grootschalige en mesoschaal morfologische ontwikkelingen beschreven. In Paragraaf 2.3 is het bestaande conceptuele systeembegrip van de vaarweg Boontjes en de toename van het baggerbezwaar sinds de drempelverwijdering beschreven. Op basis hiervan kunnen een aantal hypotheses worden opgesteld voor de ontwikkelingen tijdens de pilot en de verwachtingen voor de toekomst. Het is niet mogelijk om op alle aspecten nader in te gaan in dit rapport. Gezien de beschikbare gegevens en metingen uit de verschillende meetperiodes wordt gewerkt met de volgende hypotheses om richting te geven aan de data analyse:

hypothese 1: Stromingspatronen en getijvoortplanting:

a. *getijvulling van de Boontjes komt voornamelijk vanuit het Marsdiep;*
b. *getijvulling van het Kimstergat is gedeeltelijk afkomstig uit de Boontjes (en gedeeltelijk vanuit de Geul langs Pollendam). Ook de ebstroming vanuit Kimstergat verdeelt zich over Boontjes, Molenrak en Geul langs Pollendam; en*
c. *stroomsnelheden en vloeddominantie nemen sterk af tussen de zuidelijke Boontjes en de noordelijke Boontjes, waardoor ook de transportcapaciteit afneemt in noordelijke richting en aanslibbing in de vaargeul kan ontstaan.*

hypothese 2: Wind en golven:

a. *Windgolven zorgen voor resuspensie van sediment op de platen, vooral bij wind uit zuidwesten, westen en noordwesten. Oostenwind speelt een beperkte rol, aangezien de Boontjes zich dan in de luwte van het vasteland bevindt.*
b. *Na resuspensie door golven zorgt golfgedreven stroming voor transport richting de vaargeul (geul-plaatuitwisseling).*

hypothese 3: Residuele stroming en netto sedimenttransporten

a. *Residuele stroming en netto sedimenttransport zijn alleen in de noordelijke Boontjes in de ebrichting en op de andere meetpunten in de vloedrichting*
b. *Als gevolg van noordwaarts sedimenttransport vanuit het zuiden en zuidwaarts sedimenttransport vanuit het noorden kan gesuspendeerd sediment ophopen in de vaargeul Boontjes. Hierdoor ontstaat lokale sedimentatie in de vaargeul.*
c. *De windrichting speelt een belangrijke rol voor netto transporten in de vaarweg Boontjes en in het Kimstergat. Wind uit zuidelijke richtingen versterkt vloedtransport op beide locaties, terwijl wind uit noordelijke richtingen het transport afzwakt of zelfs tijdelijk naar de ebrichting kan doen kantelen.*

hypothese 4: Morfologische ontwikkeling:

a. *De geul zal verder verdiepen en versmallen door de groei van de platen*
b. *De meeste sedimentatie vindt rond de (voormalige) drempel plaats*
c. *De geul meandert door verdere afname stroomsnelheden*
d. *Door de afname van de streefdiepte en onderhoudsdiepte neemt de sedimentatiesnelheid af en vermindert het baggerbezwaar*

Merk op dat hypotheses 1b en 1c zijn aangepast en hypotheses 3 en 4 zijn toegevoegd t.o.v. de hypotheses uit de analyse van de T0-meting (Smits et al., 2025), naar aanleiding van de bevindingen uit dat rapport. Dichtheidsinvloeden (zoutgehalte, temperatuur en het spuidebiet bij Kornwerderzand) zijn nog niet meegenomen in dit rapport, omdat daar op basis van de T0-meting niet veel meer inzicht uit de meetdata verwacht wordt. Daarom zijn de hypotheses m.b.t. stratificatie en gravitatiecirculatie uit de analyse van de T0-meting hier niet overgenomen. Door de beperkte bodembemonstering kan er op dit moment geen verdere uitspraak worden gedaan over de bodemsamenstelling en de mogelijke vorming van fluid

mud. Wel wordt op basis van de bodembemonstering onderzocht of de bodemsamenstelling gedurende de looptijd van de pilot verandert.

3 Analyse van baggergegevens vaarweg Boontjes

3.1 Doel en methode

De ontwikkeling van baggerwerkzaamheden in de vaargeul Boontjes wordt in dit hoofdstuk geanalyseerd, waarbij zowel volumes (Paragraaf 3.3) als locaties (Paragraaf 3.4) worden bekeken. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in de periodes voorafgaand aan de pilot en na de aanpassing van streefdiepte. Met deze analyse worden nieuwe inzichten opgedaan over de hypotheses m.b.t. morfologie:

4a) De geul zal verder verdiepen en versmallen door de groei van de platen
4b) De meeste sedimentatie vindt rond de (voormalige) drempel plaats
4c) De geul meandert door verdere afname stroomsnelheden
4d) Door de afname van de streefdiepte en onderhoudsdiepte neemt de sedimentatiesnelheid af en vermindert het baggerbezwaar

Om de ontwikkeling van de baggercijfers in de vaargeul Boontjes in perspectief te plaatsen worden in Paragraaf 3.5 de baggercijfers voor andere vaargeulen in de (westelijke) Waddenzee besproken. In Hoofdstuk 4 worden de inzichten uit deze analyse samengebracht met de morfologische ontwikkelingen.

3.2 Beschikbare gegevens

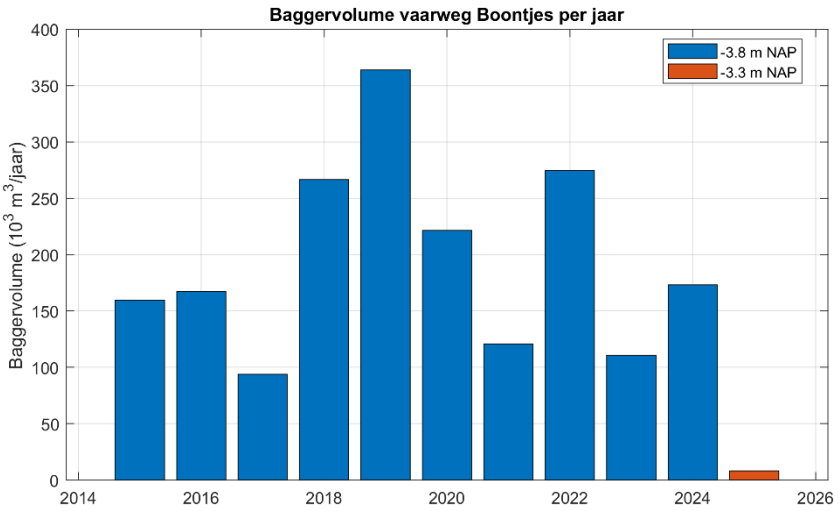
De gegevens die gebruikt zijn voor de analyse van baggergegevens zijn

- Baggervolumes uit de Reizen-database voor de periode 2016-2025
- Baggervolumes elders in de Waddenzee voor de periode 2021-2025 uit de ‘Jaarrapportage baggerwerkzaamheden Waddenzee 2025’ (Rijkswaterstaat, 2026)
- GPS-locaties van de baggerwerkzaamheden uit MARS-database (2016-2021 en 2025).

3.3 Ontwikkeling baggervolumes vaarweg Boontjes

Over de periode 2015-2024 waren baggercijfers tussen 100.000 m³ en 360.000 m³ per jaar met een gemiddelde van 195.000 m³ per jaar en aanzienlijke fluctuaties, zoals te zien in Figuur 3-1. In deze periode zijn er verschillende aannemers actief geweest en is ook de baggerstrategie aangescherpt. Mogelijk heeft dit bijgedragen aan de afname tussen 2019 en 2024. Naar verluid werd in het verleden werd soms vooruitgewerkt door een ‘overdiepte’ te baggeren, zodat de diepgang voor langere tijd gegarandeerd kan worden. Dit versterkt echter de sedimentatie in de vaargeul, waarmee het baggerbezwaar onnodig wordt verhoogd.

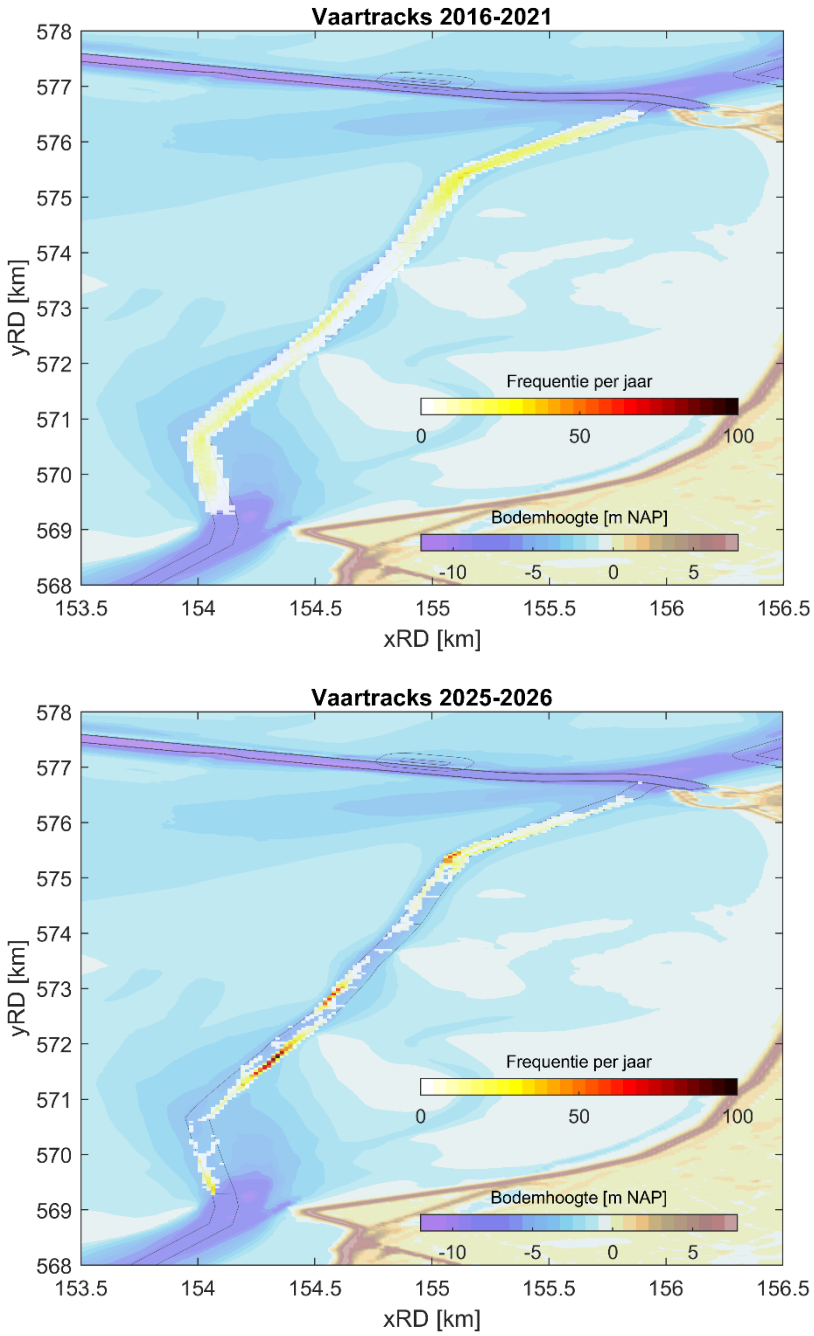
De pilot met verminderde streefdiepte van NAP-3,3 m heeft geleid tot een sterke afname van de baggervolumes van tot 8.000 m³ in 2025 (zie Figuur 3-1). In de maanden januari tot en met juni van 2026 zijn de baggervolumes qua ordegrootte vergelijkbaar met deze maanden in 2025. In totaal is er in deze maanden 6.939 m³ gebaggerd, exclusief ploegen (meest recente informatie ten tijde van schrijven van dit rapport, augustus 2026). Kanttekening daarbij is dat er in de overgangsfase van de oude streefdiepte van NAP-3,8 m naar de tijdelijke streefdiepte van NAP-3,3 m ruimte is voor 0,5 m sedimentatie, voordat opnieuw gebaggerd hoeft te worden. Daardoor geven de baggercijfers de eerste jaren van de pilot dus mogelijk een enigszins vertekend beeld (d.w.z. een onderschatting van de baggervolumes op langere termijn).



Figuur 3-1: Baggervolumes vaarweg Boontjes per jaar voorafgaand aan de pilot (blauw) en sinds de pilot (rood).

3.4 Locaties baggerwerkzaamheden

Figuur 3-2 toont de locaties van het baggerschip in de vaarweg Boontjes, respectievelijk in de jaren 2016-2021 voorafgaand aan de pilot en gedurende de looptijd van de pilot, afkomstig uit de Mars-database. Momenten waarop de vaarsnelheid boven de 7 km/u lag zijn uit de GPS-coördinaten gefilterd, omdat op deze momenten vermoedelijk niet werd gebaggerd. Er wordt aangenomen dat de getoonde frequentie een maat is voor hoe vaak baggerwerkzaamheden plaats hebben gevonden, al is dit niet één op één hetzelfde. Naast de algemene, sterke afname van de onderhoudswerkzaamheden, valt op dat er minder gebaggerd hoeft te worden in het noordelijke deel van de vaargeul. Waar voorafgaand aan de pilot 63% van de baggerwerkzaamheden (en orde 80% van het volume) in de noordelijke Boontjes uitgevoerd werd, is dat sinds de pilot slechts 41% van de baggerwerkzaamheden. Waar de focus van het onderhoudswerk in het verleden lag op de omgeving van de voormalige drempel in de noordelijke Boontjes waar de streefdiepte van NAP-3,8 m niet gehaald werd, is dit nu verschoven naar een aantal specifieke punten aan de randen van de vaargeul, waar de benodigde breedte van 100 m in het geding komt.



Figuur 3-2: Locaties baggerwerkzaamheden op basis van GPS-gegevens uit MARS-database 2016-2021 voorafgaand aan pilot (boven) en gedurende looptijd pilot (onder). N.B. Figuren zijn niet op werkelijke as-verhoudingen weergegeven om de vaargeul beter zichtbaar te maken.

3.5 Ontwikkeling baggercijfers elders in de Waddenzee

Het baggervolume in de Boontjes lag in 2025 (het eerste jaar van de pilot) 94% lager dan het gemiddelde voor de periode 2020-2024. Om te duiden welke rol de pilot speelt in deze afname ten opzichte van andere omgevingsfactoren, worden hier de baggervolumes voor andere vaargeulen en havens in het Marsdiep, Vlie en Borndiep besproken voor de periode 2021-2025 (zie Tabel 3-1). In totaal is het baggervolume van deze drie kombergingsgebieden redelijk stabiel op orde 4 miljoen m³ per jaar. In 2025 was dit totale baggervolume 2% lager dan het 5-jarig gemiddelde. Per kombergingsgebied is de ontwikkeling als volgt:

- Voor het Marsdiep is het baggervolume de laatste jaren afgenomen, ook wanneer de vaargeul Boontjes buiten beschouwing wordt gelaten. Voor het jaar 2025 lag het baggervolume 51% lager dan het 5-jarig gemiddelde (exclusief Boontjes 42% lager).
- Voor het Vlie neemt het baggervolume toe sinds 2023. Deze ontwikkeling vindt vooral plaats in de Blauwe Slenk en bij de Geul langs Pollendam. In 2025 was het baggervolume 23% hoger dan het 5-jarig gemiddelde. Het baggervolume van de Haven van Harlingen was in 2025 4% groter dan het 5-jarig gemiddelde.
- Voor het Borndiep neemt het baggervolume sinds 2023 af met voor 2025 een 6% lagere waarde dan het 5-jarig gemiddelde. Deze afname wordt vermoedelijk sterk gestuurd door de aanpassingen in het beheer van de vaargeul Holwerd-Ameland.

Merk op dat het totale baggervolume in Borndiep en Vlie op basis van deze gegevens in tegenfase zijn.

Tabel 3-1: Baggervolumes (m³) in Marsdiep, Vlie en Borndiep, afkomstig uit 'Jaarrapportage baggerwerkzaamheden Waddenzee 2025' (Rijkswaterstaat, 2026). Bij lokale beheerders (bijv. havenautoriteiten) gaat het om werkzaamheden die niet door Rijkswaterstaat zijn uitgevoerd.

Locatie	Beheerder	2021	2022	2023	2024	2025
Marsdiep	RWS (Boontjes)	120.876	262.922	110.710	175.458	8.045
	RWS (overig)	36.268	67.157	46.348	88.476	69.008
	Subtotaal (incl. lokale beheerders)	818.118	1.132.865	615.396	824.064	367.862
Vlie	RWS	377.586	733.464	609.824	581.238	997.324
	Subtotaal (incl. lokale beheerders)	1.416.255	1.755.021	1.347.884	1.716.037	2.039.156
Borndiep	RWS	1.441.700	1.267.544	1.699.479	1.443.011	1.357.112
	Subtotaal (incl. lokale beheerders)	1.461.931	1.279.544	1.713.379	1.458.211	1.368.401
Totaal (Marsdiep, Vlie en Borndiep)	(incl. lokale beheerders)	**3.696.304**	**4.167.430**	**3.676.659**	**3.998.312**	**3.775.419**

Aangezien de totale baggercijfers voor kombergingsgebieden Marsdiep, Vlie en Borndiep nauwelijks afweken van het 5-jarig gemiddelde, is geen sprake van een grootschalig (Waddenzeebreed) patroon van lagere baggercijfers voor het kalenderjaar 2025. Wel valt op dat het baggerbezwaar in het kombergingsgebied Marsdiep als geheel vrij laag was, dit is voornamelijk gestuurd door de haven van Den Helder. Ondanks de daling geeft deze data geen reden om aan te nemen dat de afname van het baggerbezwaar in de Boontjes aan grootschalige morfologische ontwikkelingen is te danken.

3.6 Samenvatting bevindingen

Het baggerbezwaar is voor het eerste jaar van de pilot sterk afgenomen tot 8.000 m³ in 2025 ten opzichte van gemiddeld 195.000 m³ in de jaren ervoor (96% lager dan het 5-jarig gemiddelde). Ook voor het eerste half jaar van 2026 is het baggervolume sterk afgenomen ten opzichte van de periode voorafgaand aan de pilot. Gesommeerd over de kombergingsgebieden Marsdiep, Vlie en Borndiep was het totale baggervolume vrij stabiel (2% lager dan het 5-jarig gemiddelde). Dat sterkt het vertrouwen dat het aangepaste vaargeulbeheer een belangrijke rol speelt in de afname van het baggerbezwaar in de Boontjes.

4 Morfologische analyse van vaarweg Boontjes

4.1 Doel en methode

In dit hoofdstuk wordt een gedetailleerde morfologische analyse van de vaarweg Boontjes gemaakt op basis van bodemhoogtemetingen. Deze detailanalyse is aanvullend op de grootschalige ontwikkeling en ontwikkeling op schaal van het kombergingsgebied, zoals beschreven in hoofdstuk 2. Hiermee wordt het systeembegrip vergroot en wordt beoogd te duiden of de afname van het baggerbezwaar een tijdelijk of blijvend effect is. Daarnaast worden de inzichten uit de morfologische analyse samengebracht met de bevindingen uit de analyse van baggergegevens uit hoofdstuk 3 om een inschatting te maken van de toekomstige ontwikkeling.

Met deze analyse worden nieuwe inzichten opgedaan over de hypotheses m.b.t. morfologie:

4a) De geul zal verder verdiepen en versmallen door de groei van de platen
4b) De meeste sedimentatie vindt rond de (voormalige) drempel plaats
4c) De geul meandert door verdere afname stroomsnelheden
4d) Door de afname van de streefdiepte en onderhoudsdiepte neemt de sedimentatiesnelheid af en vermindert het baggerbezwaar

4.2 Beschikbare gegevens

De gegevens die gebruikt zijn voor de morfologische analyse, betreffen:

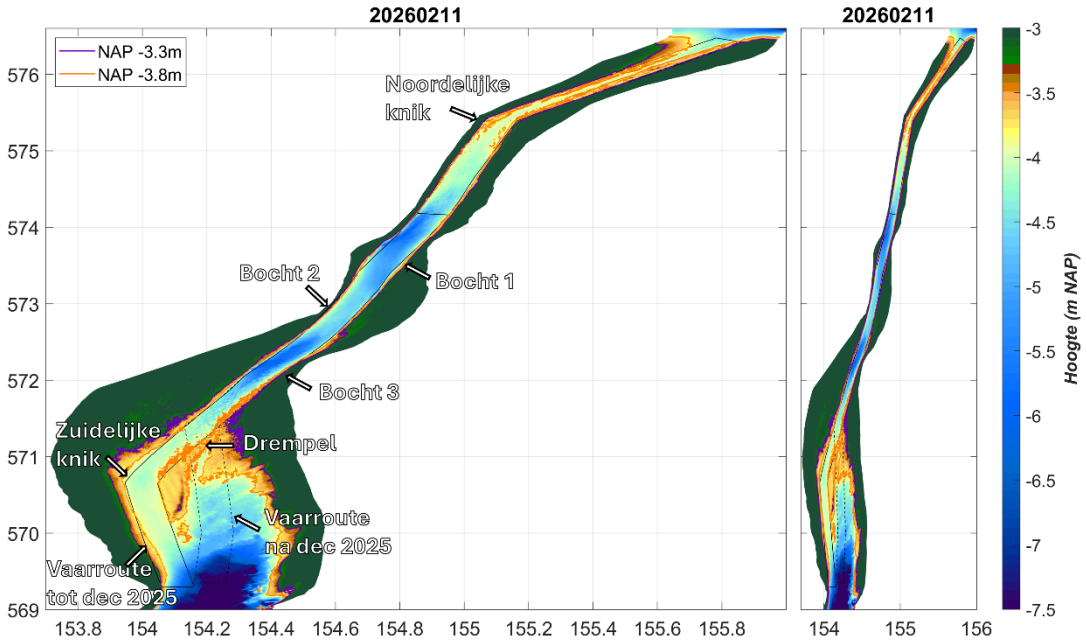
- Maandelijkse bodemhoogtemetingen afkomstig uit de beheerlodingen voor de periode 2020-2026.
- Baggervolumes uit de Reizen-database voor de periode 2016-2025.
- Inzichten uit eerdere morfologische analyses, beschreven in Paragrafen 2.1 en 2.2.

4.3 Morfologische ontwikkeling tijdens pilot: bodems en doorsnedes

Op basis van de beheerlodingen tussen de start van de pilot (januari 2025) en de laatste beschikbare loding (maart 2026) kan de algemene morfologische ontwikkeling gedurende de looptijd van de pilot worden beschreven. Deze zal daarna in meer detail worden beschreven per doorsnede. In Paragraaf 4.4 wordt ook data uit eerdere beheerlodingen beschouwd om de ontwikkeling in middellange termijncontext te plaatsen.

4.3.1 Algemene ontwikkeling

De vaargeul kan ruwweg in drie delen worden opgesplitst, namelijk het deel noordelijk van de noordelijke knik (voormalige drempel), het gedeelte tussen de noordelijke en de zuidelijke knik en het zuidelijk uiteinde (Figuur 4-1). De Boontjes geul loopt nog zuidelijker door, maar hier is het huidige baggervak aangehouden. Voor het zuidelijk uiteinde bestaan twee tracés, namelijk het westelijk tracé waar tot december 2025 de vaarroute liep en het oostelijk tracé waar vanaf december 2025 de vaarroute loopt.

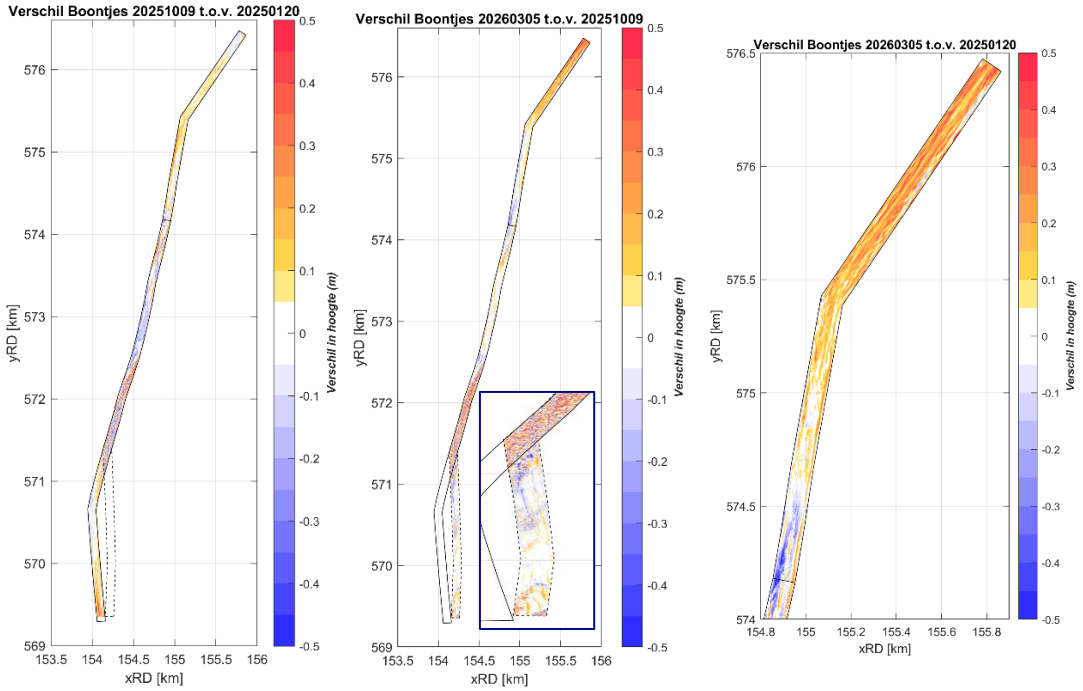


Figuur 4-1: Overzichtsfiguur van de gemeten bodemhoogte van februari 2026 als meest recente brede peiling met indicatie van beschreven locaties. N.B. de xy-verhoudingen zijn niet op ware schaal (Links: X-as opgerekt voor leesbaarheid).

In het gebied ten noorden van de noordelijke knik heeft de geul zeer steile randen en is de sedimentatie relatief groot (Figuur 4-2). Hier wordt in februari 2026 al op een groot deel van de geul de voormalige streefdiepte (en huidige maximale onderhoudsdiepte) van NAP-3,8 m bereikt (Figuur 4-1). Met name rond de noordelijke knik wordt de minimale vaargeulbreedte van 100 m al bereikt.

Tussen de noordelijke en de zuidelijke knik vernauwt de geul op sommige plaatsen (o.a. bij bocht 2). Op andere plaatsen (bijv. bocht 3) is er sprake van verschuiving van de geul, wat kan duiden op meandering. Ook lijkt de geul in dit middelste gedeelte licht verschoven t.o.v. het baggervak, waardoor de breedte van de vaargeul (binnen de betonning) niet voldoet aan de minimale 100 m, terwijl buiten het vak wel voldoende breedte beschikbaar is. Net ten noorden van de zuidelijke knik zijn ribbels in de bodem zichtbaar. Dit past bij het zandige karakter van de bodem op deze locatie. Deze ribbels zijn in dit rapport niet verder geanalyseerd.

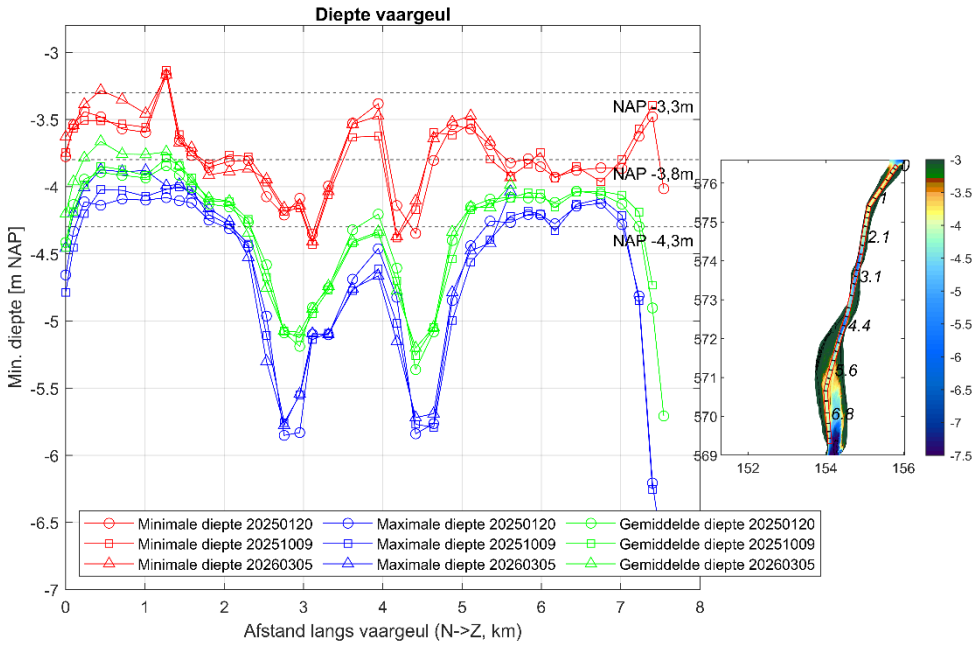
Na de verlegging van de vaargeul in het zuidelijk deel is er sprake van sedimentatie in het oude, westelijke tracé. Er is gelijktijdig ook sprake van enige verlaging van de “drempel” (Figuur 4-2, midden). Door een gebrek aan data in het oostelijk tracé voor de verlegging is niet duidelijk wanneer deze verlaging is ingezet. Dit is mogelijk gelinkt aan het verleggen van de route en het stoppen met baggeren op de westelijke zijde, waardoor meer stroming door het oostelijke tracé plaatsvindt. Het zou ook onderdeel kunnen zijn van grootschaliger verdieping van het zuidelijk deel, hoewel deze tijdens de pilot lokale verschillen laat zien waardoor dit op deze tijdschaal niet goed te duiden is.



Figuur 4-2: Verschil in bodemhoogte tussen januari 2025 en oktober 2025 (links), verschil tussen oktober 2025 en maart 2026 (midden) en verschil tussen januari 2025 en maart 2026 (rechts). Deze verdeling is gehanteerd vanwege de verlegging van de vaarroute in het zuidelijk uiteinde in december 2025. De kleurenschaal loopt van -0,5 m tot +0,5 m, waarbij rood sedimentatie weergeeft en blauw erosie.

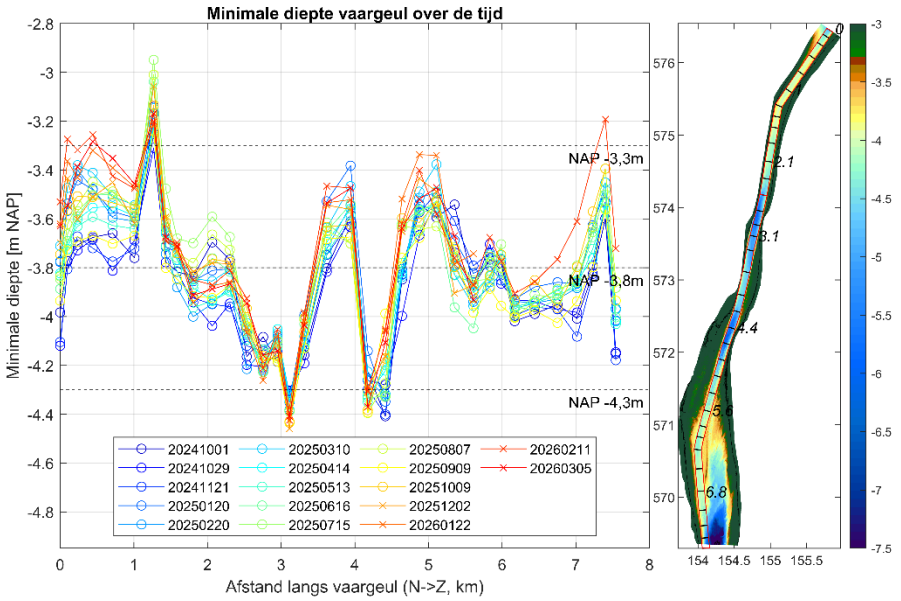
Op basis van de baggervakken zijn een aantal doorsnedes gedefinieerd, met de minimale breedte van 100 m. Voor deze doorsnedes is de minimale, gemiddelde en maximale bodemhoogte bepaald en uitgezet langs de lengte van de vaargeul (Figuur 4-3). Door het eerste moment van de pilot (januari 2025) te vergelijken met het moment net voor verlegging van de geul in het zuiden (oktober 2025) en het laatste beschikbare meetmoment (maart 2026) op de minimale, gemiddelde en maximale bodemhoogte krijgen we meer inzicht in hoe de bodemhoogtes over de vaargeul verdeeld zijn. De afstand tussen de lijnen van dezelfde kleur geeft aan waar sedimentatie/erosie snel is gegaan en waar de minimale bodemhoogte stabiel was.

In het deel ten noorden van de knik (x=0-1,2 km) is ook in deze weergave sedimentatie te zien voor zowel de maximale, gemiddelde als de minimale bodemhoogte. In de noordelijke knik zelf is de minimale bodemhoogte boven NAP-3,3 m, wat betekent dat de vaargeul lokaal niet voldoet aan de minimale breedte van 100 m binnen het gedefinieerde baggervak. Dit lijkt niet wezenlijk te veranderen over de tijd, wat ook op een verschuiving van de geul t.o.v. het baggervak kan duiden. Daar komen we later op terug. Andere punten waar de minimale diepte kritiek is, zijn rond 4 km (bocht 2) en rond 5 km (bocht 3). Hier verandert de diepte wel over de tijd, wat kan duiden op sedimentatie en/of versmalling. In het zuidelijk uiteinde is duidelijk dat binnen de doorsnede een grote variatie aan bodemhoogtes zit, met een maximale bodemhoogte op ongeveer NAP-7 m. Tussen 0 en 2,5 km en tussen 5 en 7 km is de geul gemiddeld het minst diep. Naast de locaties met sedimentatie of kritieke waterdiepte, zijn er ook locaties met erosie. In het noorden van bocht 1 (2,5-3km), in bocht 2 (3-4,2km)

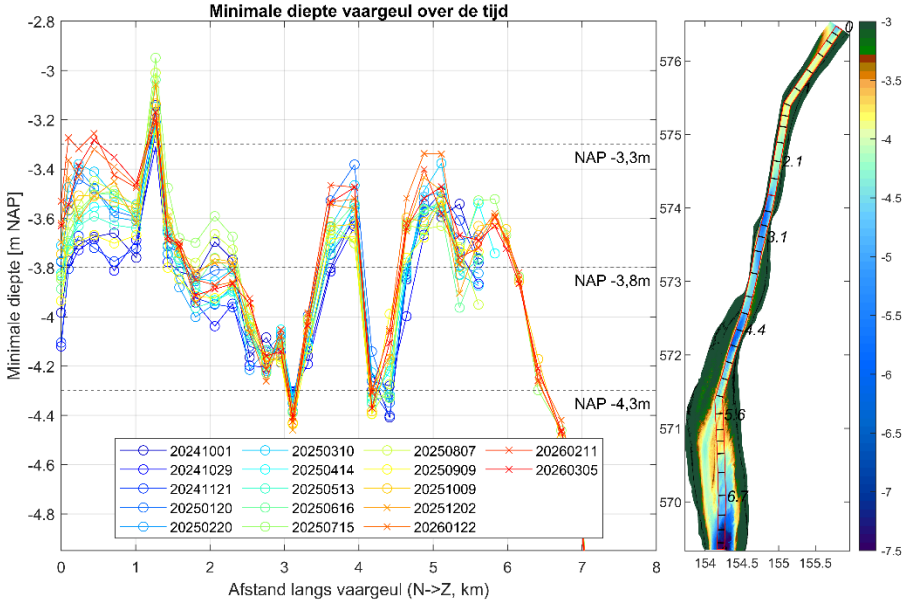


Figuur 4-3: Minimale (rode lijnen), gemiddelde (groene lijnen) en maximale (blauwe lijnen) bodemhoogte aan het begin van de pilot (jan 2025; rondjes), net voor verlegging vaargeul (okt 2025; vierkantjes) en op de laatste beschikbare meting (mrt 2026; driehoekjes).

Omdat de minimale bodemhoogte kritiek is, zijn deze voor alle meetmomenten geplot voor zowel de oude als de nieuwe vaarroute (Figuur 4-4, Figuur 4-5). Hier wordt nog duidelijker dat het noordelijk gedeelte zeer variabel is over de tijd met netto sedimentatie. Ook is in de knik (1,2 km) een variatie in sedimentatie en erosie te zien, maar blijft de minimale bodemhoogte rond NAP-3,3 m. Deze verandert dus wel over de tijd. Merk op dat deze variatie wordt beïnvloed door baggerwerkzaamheden die hier hebben plaatsgevonden aan de westzijde (zie locaties in Figuur 3-2). Ook op de andere kritieke punten rond 4 en 5 km is de variatie nu nog beter zichtbaar. De minimale bodemhoogte in het zuidelijk uiteinde, tussen 7 en 8 km, hangt af van welke vaarroute wordt gekozen. Figuur 4-5 laat zien dat de streefdiepte in de nieuwe route meer dan gegarandeerd is met een minimale bodemhoogte tussen NAP-5 m en NAP-7 m. Op de kritieke punten wordt in de volgende sectie dieper ingegaan.



Figuur 4-4: Minimale bodemhoogte vaargeul per doorsnede over het westelijke tracé. De kleur van de lijnen geeft de datum van de meting aan, waarbij data voor de verlegging is aangegeven met 'o', na de verlegging met 'x'. De afstand langs de vaargeul is aangegeven in cursief in km op de kaart rechts.

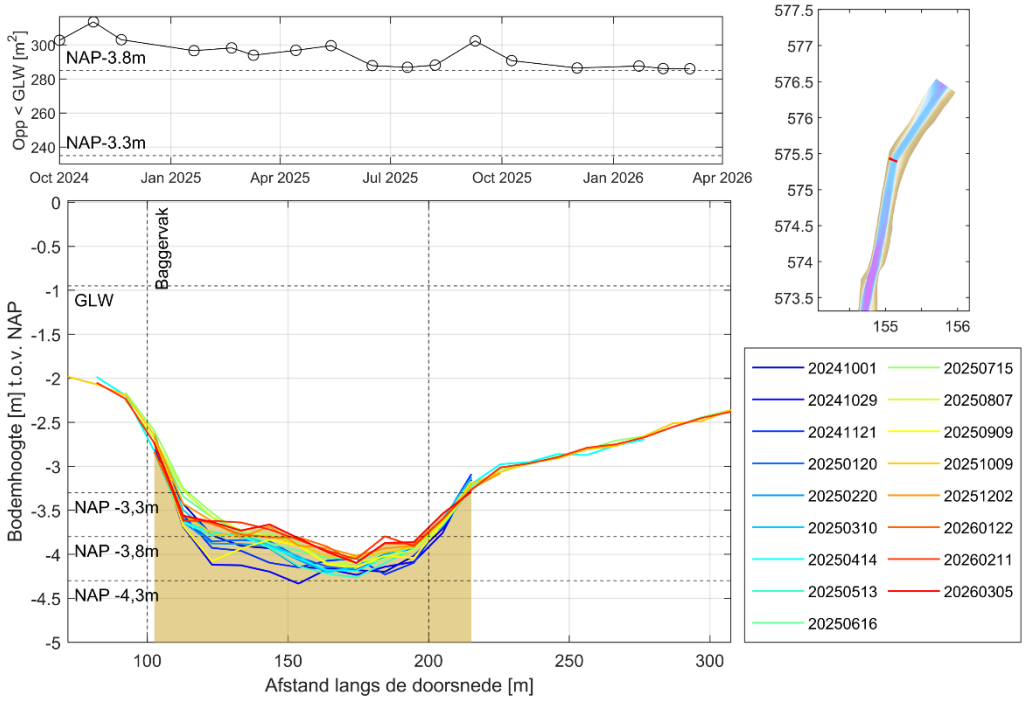


Figuur 4-5: Minimale bodemhoogte vaargeul per doorsnede over het oostelijke tracé. De kleur van de lijnen geeft de datum van de meting aan, waarbij data voor de verlegging is aangegeven met 'o', na de verlegging met 'x'.

4.3.2 Doorsnedes

De minimale diepte geeft maar een beperkt beeld van wat er in de gehele vaargeul gebeurt, maar geeft wel een beeld van welke locaties interessant zijn om verder naar sedimentatie/erosie patronen te kijken. Om daar verder op in te zoomen en een volledig beeld te krijgen van de gehele breedte van de vaargeul, én de natuurlijke geul net buiten het baggervak, worden in deze paragraaf worden een aantal doorsnedes uitgelicht. In deze doorsnedes treedt specifiek interessant gedrag op, namelijk in de noordelijke knik en bochten 1, 2 en 3. Zie voor overige doorsnedes Bijlage A.

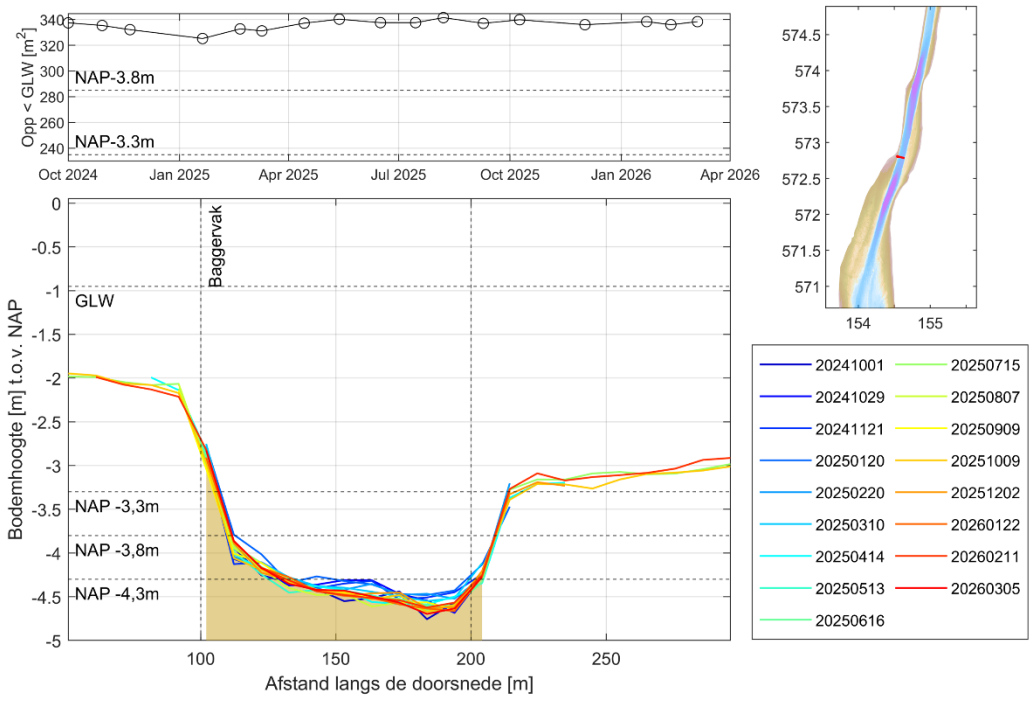
De doorsnede in de noordelijke knik laat inderdaad zien dat de westelijke geulwand binnen het baggervak boven de streefdiepte van NAP-3,3 m uitkomt (Figuur 4-6). Het baggervak zou nog nipt kunnen voldoen aan de minimale breedte van 100 m door het vak ongeveer 10 m in oostelijke richting te verschuiven. Over de gehele doorsnede vindt sedimentatie plaats. Door de natte oppervlakte onder NAP-0,95 m (GLW) over de tijd te volgen, kan worden bepaald of gemiddeld genomen de NAP-3,8 m onderhoudsdiepte of de NAP-3,3 m streefdiepte al zijn bereikt of bijna worden bereikt. De ontwikkeling van de natte oppervlakte (paneel linksboven in Figuur 4-6) laat zien dat de totale doorsnede zich gemiddeld nog boven NAP-3,8 m bevindt, maar door de sedimentatie steeds dichter naar deze horizontale lijn beweegt. Doordat hier baggerwerkzaamheden hebben plaatsgevonden wordt de sedimentatie in de grafiek afgeremd t.o.v. de natuurlijke ontwikkeling.



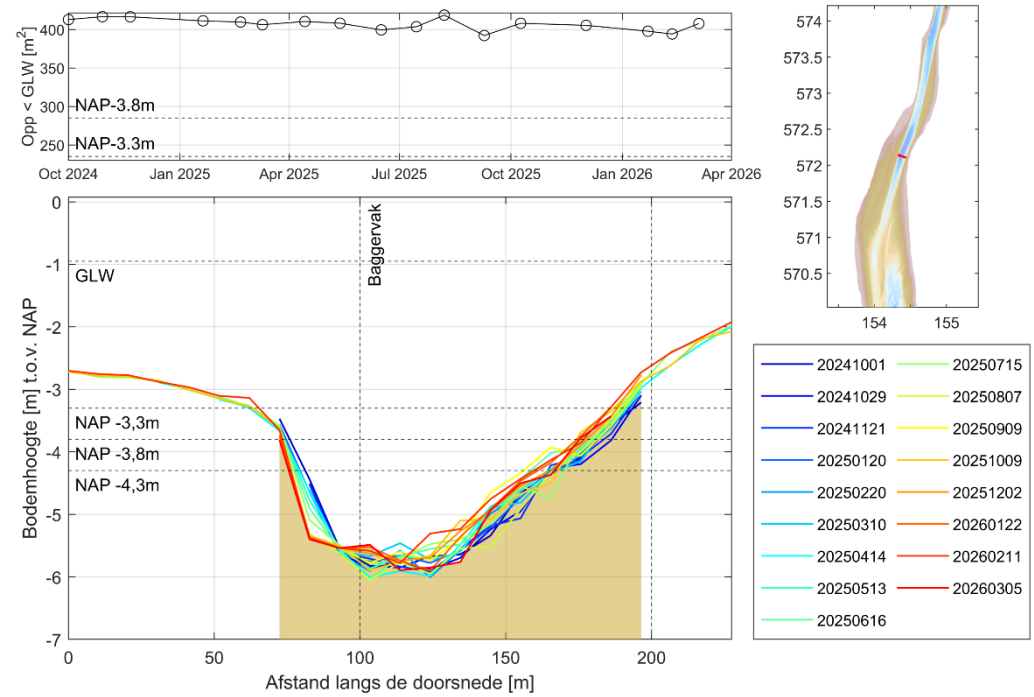
Figuur 4-6: Doorsnede in noordelijke knik met linksboven de natte oppervlakte onder GLW (NAP-0,95 m) binnen het baggervak. De horizontale onderbroken lijnen geven de oppervlakte aan waarvoor de gemiddelde bodemhoogte NAP-3,8 m en NAP-3,3 m is.

Ook voor de doorsnede in bocht 2 (~3,5-4 km) is te zien dat de geul licht is verschoven t.o.v. het baggervak (Figuur 4-7). De doorsnede zelf is vrij stabiel, met lichte erosie op het diepe gedeelte. Door de vorm van de doorsnede en deze verdieping, wordt duidelijk dat hier sprake is van meandering. De geulwanden zijn steil.

Bij de doorsnede in bocht 3 is ook sprake van meandering. Figuur 4-8 laat een verplaatsing van de geul in westelijke richting zien. Daardoor voldoet de vaargeul op dit moment niet aan de minimale 100 m breedte. Er is echter voldoende ruimte voor de vaargeul door het baggervak 10-20 m mee te verplaatsen.



Figuur 4-7: Doorsnede in bocht 2 met linksboven de natte oppervlakte onder GLW (NAP-0,95 m) binnen het baggervak. De horizontale onderbroken lijnen geven de oppervlakte aan waarvoor de gemiddelde bodemhoogte NAP-3,8 m en NAP-3,3 m is.



Figuur 4-8: Doorsnede in bocht 3 met linksboven de natte oppervlakte onder GLW (NAP-0,95 m) binnen het baggervak. De horizontale onderbroken lijnen geven de oppervlakte aan waarvoor de gemiddelde bodemhoogte NAP-3,8 m en NAP-3,3 m is.

4.3.3 Eerste reflectie op hypotheses

Het verdiepen van de geul (hypothese 4a) is op een aantal locaties zichtbaar, maar is over deze relatief korte periode niet als algemene trend opgevallen. Het versmallen van de geul is

met name in het noordelijke deel goed zichtbaar (hypothese 4a), zeker als daarbij rekening wordt gehouden met het op breedte houden van de geul door baggerwerkzaamheden (waarbij dus reeds materiaal aan de rand van de geul is weggehaald). Over de groei van de platen is met de metingen die hier zijn gebruikt niets te zeggen omdat de platen niet voldoende zijn opgenomen in deze metingen.

Het verondiepen van het noordelijk gedeelte van de vaargeul, waar het morfologisch wantij zich bevindt, sluit aan bij de lange termijn beschouwingen uit hoofdstuk 2. Hier vindt, zoals in de hypothese gesteld, inderdaad de meeste sedimentatie plaats. Over de exacte locatie van het wantij binnen de noordelijke Boontjes is op basis van deze gegevens niets te zeggen.

In bocht 2 is naast verdieping ook sprake van meandering (hypothese 4c). In bocht 3 is sprake van geulmigratie en mogelijk ook van meandering, al wordt de buitenbocht niet zichtbaar dieper.

De waarnemingen tijdens de pilot zijn grotendeels in lijn met het vooraf opgestelde systeembeeld. De meeste sedimentatie treedt op in de noordelijke Boontjes rond de voormalige drempel, terwijl in het middendeel vooral geulmigratie en meandering zichtbaar zijn. Ook het versmallen van de geul in het noordelijke deel ondersteunt de hypotheses. De resultaten geven daarmee geen aanleiding om de hypotheses wezenlijk bij te stellen, maar laten wel zien dat de sedimentatie zich beperkt tot een relatief klein deel van de vaargeul.

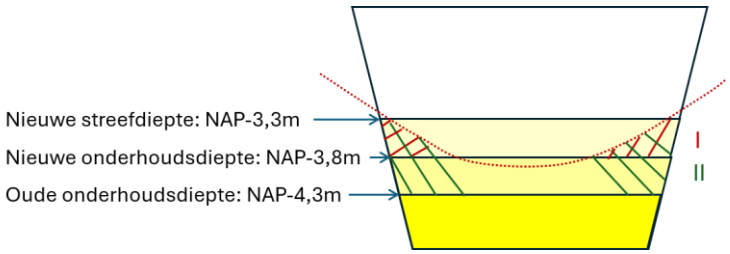
4.4 Volumeveranderingen en baggervolumes tijdens en in aanloop naar pilot

Uit de verschillen tussen de beheerlodingen voor de geanalyseerde pilot periode (januari 2025 tot maart 2026) blijkt in het vak Boontjes Noord een sedimentatie te hebben plaatsgevonden van ongeveer 25.000 m^3 (Tabel 4-1). Voor Boontjes Zuid is sprake van een netto erosie, die verschilt in de periode voor de verlegging oktober 2025 en erna. Voor de verlegging is sprake van ongeveer 12.000 m^3 erosie en erna ongeveer 4.000 m^3 erosie. Als voor Boontjes Noord het verwijderde baggervolume van ongeveer 1.600 m^3 wordt opgeteld bij de netto sedimentatie, gaat het om een totale sedimentatie van een kleine 10.000 m^3 over de periode voor de verlegging (rekening houdend met een verhouding in-situ volume t.o.v. beunvolume van 1:1,15). Na augustus 2025 is de baggerdata niet opgesplitst in Noord en Zuid. Minimaal zou de totale sedimentatie van Boontjes Noord neerkomen op ruim 26.000 m^3. In totaal zou de maximale sedimentatie over de hele vaargeul en de hele periode minimaal 32.000 m^3 bedragen (op basis van 25.000 m^3 sedimentatie Noord + 7.000 m^3 baggervolume Totaal (Noord+Zuid)). Belangrijke kanttekening bij deze getallen is dat ze gevoelig zijn voor de gekozen periode. De morfologische ontwikkeling tijdens de pilotperiode is erg variabel, zoals verderop in Figuur 4-11 en Figuur 4-12 te zien is. Periodes met netto sedimentatie en erosie per maand wisselen elkaar af. Omdat de totale sedimentatie opgeteld voor alle maanden daarmee hoger ligt dan de netto sedimentatie (totale sedimentatie – totale erosie), had dit in de praktijk kunnen leiden tot hogere baggervolumes. In de praktijk worden beslissingen om te gaan baggeren immers meer op korte termijn genomen. Vanwege opvolgende maanden met sedimentatie en erosie kan het baggervolume gereduceerd worden door, indien mogelijk, langer te wachten voordat wordt ingegrepen

Ter vergelijking is ook berekend hoe groot het baggerbezwaar zou zijn als tijdens de pilotperiode tot aan de voormalige streefdiepte van NAP-3,8 m of de voormalige onderhoudsdiepte van NAP-4,3 m zou worden gebaggerd (Figuur 4-9, Tabel 4-1). Voor locaties met bodemhoogte boven NAP-3,8 m is dus het volume boven de streefdiepte (rode vlak (I) in Figuur 4-9) en het volume boven de onderhoudsdiepte (groene vlak (II) in Figuur 4-9) bepaald. In het noordelijke baggervak blijkt 29% van het gebied niet te voldoen aan de oude streefdiepte. In het zuidelijke baggervak is dit slechts 6% van het gebied. Het

baggerbezwaar tot NAP-3,8 m zou (uitgaande van het oostelijk tracé) ongeveer 24.000 m³ in-situ (~27.000 m³ beunvolume; rode vlak (I) in Figuur 4-9).In Tabel 4-1 staan voor de volledigheid ook volumes voor het westelijk tracé uitgewerkt, al was daar alleen data beschikbaar tot oktober 2025.

Als echter tot de oude onderhoudsdiepte van NAP-4,3 m gebaggerd was (bij een streefdiepte van NAP-3,8 m), zou in het noordelijke baggervak een in-situ volume van ongeveer 46.000 m³ verwijderd moeten worden en in het zuidelijke baggervak 12.000 m³ voor het oostelijk tracé (in-situ; groene vlak (II) in Figuur 4-9). Samen met het daadwerkelijk gebaggerde volume is dit in totaal dus ongeveer 65.000 m³ in-situ volume (vergelijkbaar met een beunvolume van 75.000 m³), wat een orde groter is dan het huidige baggervolume. Merk op dat hierbij slechts eenmalig na een jaar overtollig sediment bepaald is en dus geen kans voor herhaalde sedimentatie na baggeren van de vaargeul. Desondanks zijn deze virtuele baggervolume voor de oude streefdiepte en onderhoudsdiepte al fors hoger dan de huidige baggervolumes met de nieuwe streefdiepte van NAP-3,3.



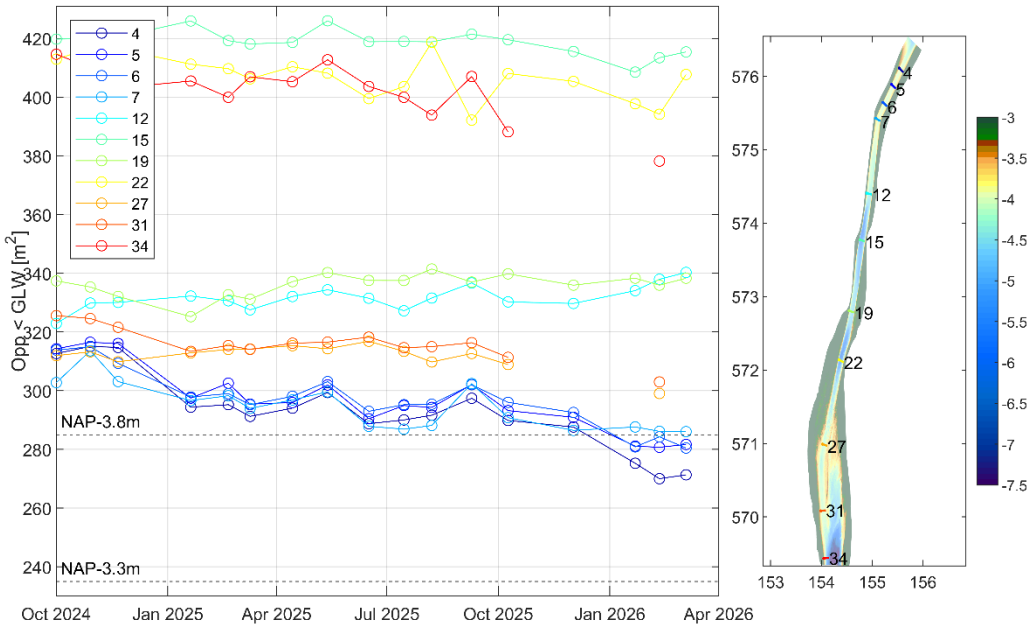
Figuur 4-9: Schematisatie van virtuele baggervolumes. Bij de virtuele streefdiepte van NAP-3,8 m hoort baggervolume I (rood). Bij de virtuele streefdiepte van NAP-4,3 m hoort baggervolume II (groen).

Tabel 4-1: In-situ volumes in m³ per periode waarbij Sedimentatie/erosie bepaald is op basis van de lodingen (sedimentatie is positief, erosie is negatief), In-situ baggervolume is bepaald op basis van de Reizendatabase met een vermindering van 15% en virtueel baggervolume tot NAP-3,8 m en NAP-4,3 m bepaald is voor de meest recente loding van de periode.

Bagger-vak	Grootheden	jan '25 - okt '25	okt '25 - mrt '26	jan '25 - mrt '26
		westelijke tracé	oostelijk tracé	totaal
Noord	Sedimentatie/erosie (m³)	8.128	16.486	24.613
	In-situ baggervolume (m³)	1.583	-	-
	Virtueel baggervolume tot NAP-3,8 m (m³)	5.096	4.746	9.842
	Virtueel baggervolume tot NAP-4,3 m (m³)	23.440	22.240	45.680
Zuid	Sedimentatie/erosie (m³)	-12.049	-3.881	n.v.t.
	In-situ baggervolume (m³)	2.638	-	-
	Virtueel baggervolume tot NAP-3,8m (m³)	6.905	6.895	~6.900
	Virtueel baggervolume tot NAP-4,3m (m³)	17.341	12.958	12.958 à 17.341
Totaal (Noord + Zuid)	Sedimentatie/erosie (m³)	-3.921	12.605	n.v.t.
	In-situ baggervolume (m³)	5.491	1.347	6.838
	Virtueel baggervolume tot NAP-3,8 m (m³)	17.492	12.988	~23.580
	Virtueel baggervolume tot NAP-4,3 m (m³)	40.781	58.638	65.476 à 69.859

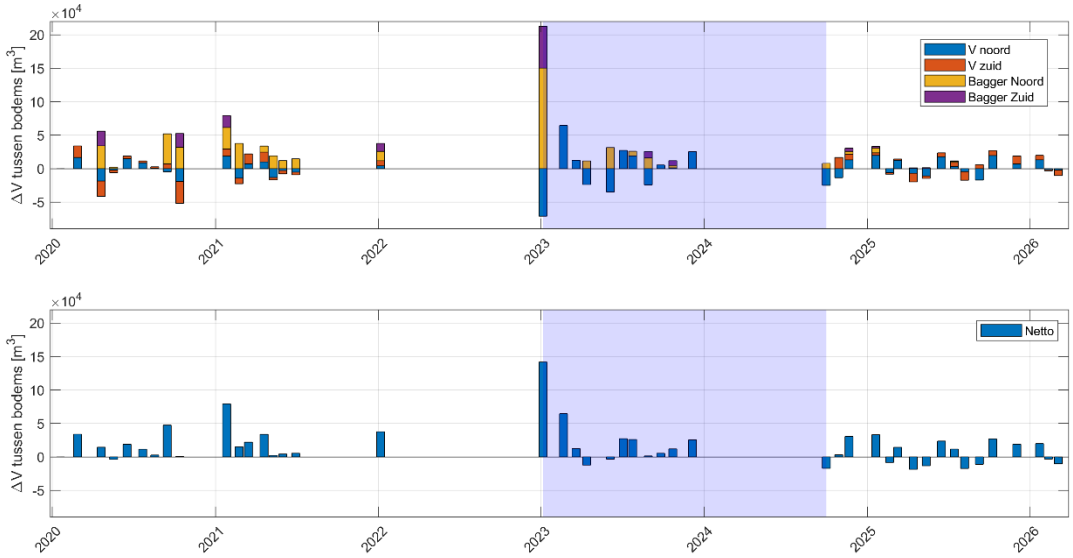
Door de ontwikkeling van de natte doorsnede over de tijd (paneel linksboven in Figuur 4-6, Figuur 4-7 en Figuur 4-8) van een aantal representatieve doorsnedes te vergelijken, vormt zich een gedetailleerder beeld van hoe de geul zich ontwikkelt (zie Figuur 4-10). Ook in deze weergave is goed zichtbaar dat de sedimentatie in het deel noordelijk van de noordelijke knik ervoor zorgt dat de onderhoudsdiepte gemiddeld over de doorsnede wordt bereikt. Opvallend is dat de doorsnede in de knik (doorsnede 7) vanaf oktober 2025 net boven de onderhoudsdiepte blijft, doordat hier onderhoudsbaggerwerkzaamheden hebben plaatsgevonden. In doorsnedes 4, 5, en 6, net noordelijk van de knik, gaat de sedimentatie wel door na oktober 2025.

De natte oppervlaktes in het midden van de vaargeul (doorsnedes 12,15, 19 en 20) geven een stabiel beeld met lichte sedimentatie in het noorden (doorsnede 12), lichte erosie in de diepe bocht 1 en bocht 2 (doorsnedes 15 en 19) en weer lichte erosie in bocht 3 (doorsnede 22). De drie zuidelijke doorsnedes (27, 31, 34) vertonen sedimentatie, wat heeft bijgedragen aan de beslissing om de vaargeul te verleggen naar het diepere oostelijke gedeelte.



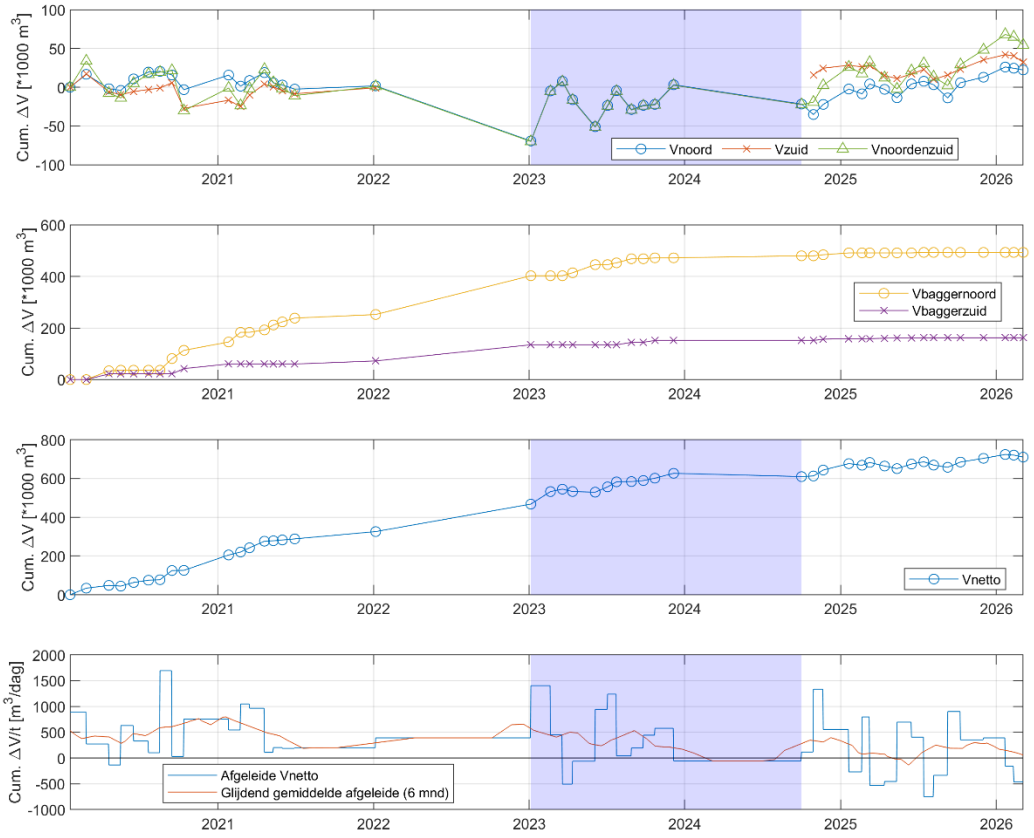
Figuur 4-10: Natte oppervlakte van doorsnedes onder GLW (NAP-0,95 m). De kleuren van de lijnen tonen verschillende doorsnedes, waarbij blauwe tinten het noordelijke deel van de vaargeul representeren en rode tinten het zuidelijke deel. De kaart rechts toont de locaties van de doorsnedes.

Om de ontwikkelingen tijdens de pilot in perspectief te plaatsen, is op basis van beheerlodingen vanaf 2020 sedimentatie en erosie bepaald voor Boontjes Noord en Zuid (Figuur 4-11). Ook zijn baggerwerkzaamheden daartegen afgezet. De staafdiagram laat sedimentatie-/erosievolumes per meetmoment zien, deze gelden voor de hele periode ervoor. De volumes weergegeven in januari 2023 zijn relatief groot, omdat deze zijn berekend over heel 2022. Hierbij moet in gedachten worden gehouden dat er geen beheerlodingen van Boontjes Zuid beschikbaar waren in 2022, 2023 en het eerste deel van 2024 (datapunten die hierdoor beïnvloed zijn, zijn weergegeven in blauwe vlak in Figuur 4-11). Uit dit overzicht wordt nogmaals duidelijk dat de baggervolumes sinds de start van de pilot sterk zijn afgenomen, maar ook dat sedimentatie sinds 2025 is afgenomen. Daarnaast valt op dat in 2025 voor het eerst afwisselend positieve en negatieve netto volumeveranderingen plaatsvinden. De pilot kan er mogelijk voor hebben gezorgd dat natuurlijke patronen weer zichtbaar worden, waaronder ook (tijdelijke)erosieve periodes. Eerder werd (netto) erosie nagenoeg alleen veroorzaakt door baggerwerkzaamheden.



Figuur 4-11 Sedimentatie en erosie op basis van beheerlodingen in Boontjes noord (V noord) en zuid (V zuid) en baggergegevens (Bagger Noord en Bagger Zuid) (bovenste paneel). Door de gebaggerde volumes op te tellen bij sedimentatie/erosie is het netto signaal te zien (onderste paneel). De staven geven informatie over het interval ervoor. Het blauwe vlak geeft de periode aan waarvoor er geen beheerlodingen voor Boontjes Zuid beschikbaar waren. Baggervolumes vanaf augustus 2025 zijn niet meegenomen, omdat de uitsplitsing tussen noord en zuid niet beschikbaar is.

Doordat de periodes tussen de metingen verschillen, is het lastig een duidelijke trend te ontwaren. Daarom is het zinvol om naar de cumulatieve volumes en de afgeleide daarvan te kijken (Figuur 4-12). In totaal wordt er in Boontjes Noord meer gebaggerd dan in Boontjes Zuid. Door de afgeleide van de netto volumeverandering te nemen, zien we de netto volumeverandering per dag in het onderste paneel. Om dit signaal minder gevoelig te maken voor de verschillen in periodes tussen de metingen, nemen we hiervan het lopend gemiddelde over zes maanden. Hieruit wordt duidelijk dat er tijdens de pilot gemiddeld tussen -100 m³/dag erodeert en +300 m³/dag sedimenteert. In de jaren voorafgaand aan de pilot vond geen netto erosie plaats en lag de sedimentatie gemiddeld hoger (de periode zonder beheerlodingen voor Boontjes Zuid buiten beschouwing latende), namelijk tussen +190 m³/dag en +800 m³/dag. Hiermee kan gesteld worden dat de sedimentatie is afgenomen ten tijde van de pilot en dat dit vermoedelijk ook veroorzaakt is door de aanpassing van streefdiepte. Voor deze analyse is ervanuit gegaan dat baggervolumes uniform zijn bijgehouden over de tijd. In 2021 is echter gewisseld van aannemer, wat waarschijnlijk de manier van werken en registreren heeft beïnvloed. Dit moet ook in beschouwing genomen worden bij het interpreteren van deze cijfers.



Figuur 4-12 Cumulatieve sedimentatie/erosie (eerste paneel) en baggervolumes (tweede paneel). Door de gebaggerde volumes op te tellen bij sedimentatie/erosie is het netto signaal te zien (derde paneel). De afgeleide van de cumulatieve netto volumeverandering geeft de volumeverandering per dag (vierde paneel). Het glijdend gemiddelde over 6 maanden geeft een robuuster beeld (vierde paneel). Het blauwe vlak geeft de periode aan waarvoor er geen beheerlodingen voor Boontjes zuid beschikbaar waren.

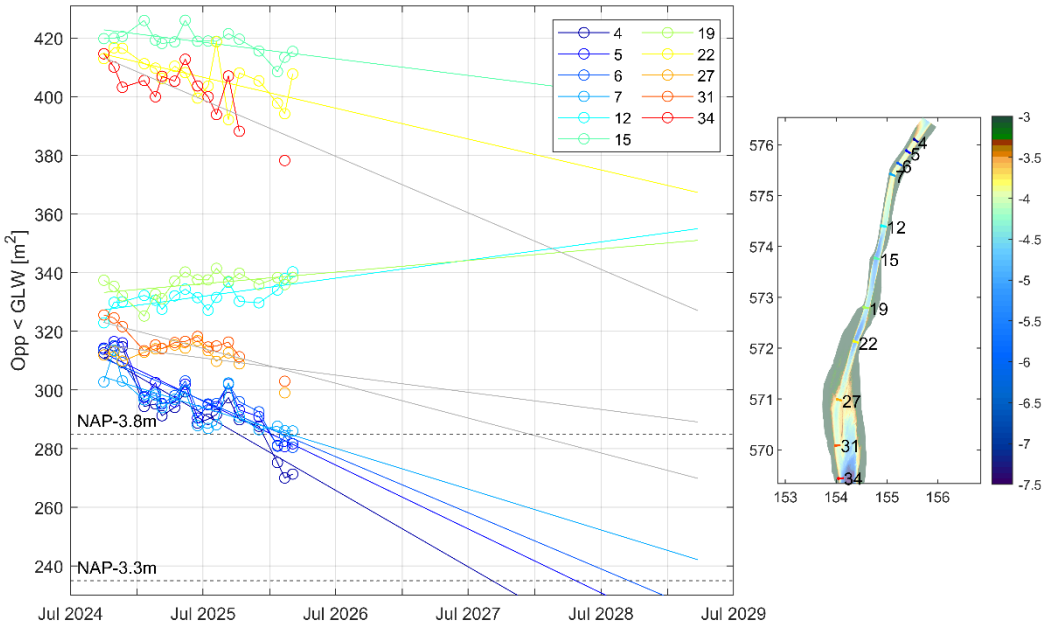
4.5 Verwachte toekomstige ontwikkeling

Op basis van de trendmatige ontwikkelingen van de natte oppervlaktes uit Figuur 4-10 is het mogelijk om een eerste orde inschatting te maken wanneer de natte oppervlakte per doorsnede zodanig klein wordt dat gemiddeld gezien de streefdiepte is bereikt. Twee kanttekeningen bij deze aanpak:

1. Enerzijds geeft dit een overschatting van de tijdsduur tot nieuwe baggerwerkzaamheden nodig zijn, doordat de sedimentatie niet uniform over de bodem verspreid plaatsvindt. In werkelijkheid zal de doorsnede op één locatie de streefdiepte bereiken, waardoor de vaargeul niet meer voldoet aan de vereiste 100 m breedte. Dit gebeurt vóórdat de gemiddelde bodem over de doorsnede de streefdiepte bereikt.
2. Anderzijds geeft dit een onderschatting van de tijdsduur tot nieuwe baggerwerkzaamheden nodig zijn. Het is fysisch gezien aannemelijk dat de sedimentatie niet lineair over de tijd verloopt. Zodra de geul dichter bij zijn evenwichtsdiepte komt zal de sedimentatiesnelheid afnemen en daarmee is de verwachting dat deze zich asymptotisch zal gedragen. Omdat hier op dit moment nog niet voldoende over bekend is, gaan we uit van een lineaire trend als eerste inschatting. De lineair inschatting is hiermee juist conservatief, in werkelijkheid zal de sedimentatie langzamer verlopen.

Figuur 4-13 laat de trends zien voor dezelfde doorsnedes als in Figuur 4-10. Hieruit is af te lezen dat tussen eind 2027 en eind 2028 de streefdiepte bereikt kan worden in het meest

noordelijke gedeelte. De ontwikkeling van het meest zuidelijke gedeelte (doorsnede 27-34) toont het westelijk tracé en is niet meer relevant aangezien de vaarroute daar is verlegd. Voor het oostelijk tracé wordt pas sinds oktober 2025 data verzameld, waardoor de trend nog niet kan worden bepaald. Het midden van de geul is dusdanig stabiel dat in de komende jaren op basis van deze berekening geen baggerwerkzaamheden worden verwacht.



Figuur 4-13 Natte oppervlakte onder GLW (NAP-0,95m). Datapunten aangegeven met 'o' en rechte lijn voor lineair geëxtrapoleerde trend ter indicatie. Trends voor doorsnedes in het westelijk tracé zijn weergegeven in grijs. N.B. een lineaire extrapolatie is niet zonder meer gerechtvaardigd en geeft waarschijnlijk een conservatieve schatting.

Op langere termijn is de verwachting dat de morfologische ontwikkelingen op meso-schaal, zoals beschreven in Paragraaf 2.2, zullen voortzetten. Daardoor zullen de platen verder ophogen, waardoor de lokale komberging verder zal afnemen en ook het geuldebiet zal afnemen. Daarnaast zal het opvullen van het Kimstergat op termijn zorgen voor een verdere afname van het geuldebiet door de Boontjes (aangezien het Kimstergat gedeeltelijk gevoed wordt vanuit de Boontjes). Als gevolg van beide effecten zal de evenwichtsdiepte op langere termijn vermoedelijk afnemen.

4.6 Samenvatting bevindingen morfologische analyse

De morfologische analyse en de analyse van baggergegevens gedurende de pilot leveren de volgende inzichten op:

- De netto sedimentatie in het noordelijke deel van de vaargeul was tijdens het eerste jaar van de pilot 25.000 m³. In het zuidelijk deel was sprake van netto erosie. De bruto sedimentatie lag hoger en daarmee is netto sedimentatie over een langere periode een conservatieve inschatting van het mogelijke baggerbezwaar. Het totale gebaggerde volume bedroeg 7.000 m³ (in-situ). Daarmee lag de totale sedimentatie op minimaal 32.000 m³.
- Alleen in de noordelijke Boontjes is een sterke sedimentatietrend zichtbaar sinds de start van de pilot (omdat niet langer of pas later gebaggerd wordt). Hier is ook het versmallen van de geul goed zichtbaar, zeker als daarbij rekening wordt gehouden met materiaal dat reeds verwijderd is langs de rand van de geul. Dit sluit aan bij de

langjarige observatie dat het morfologische wantij sterk in ontwikkeling is en dat de geul zal versmallen door groei van de platen. Andere delen van de vaargeul Boontjes zijn vrij stabiel, hoewel ook verdieping op sommige locaties zichtbaar is, echter niet structureel.
- In bocht 2 is naast verdieping ook sprake van meandering. In bocht 3 is sprake van geulmigratie en mogelijk ook van meandering, al wordt de buitenbocht niet zichtbaar dieper.
- Door de verlegging van de vaargeul in de zuidelijke Boontjes is de morfologische ontwikkeling tijdens de pilot lastiger te duiden. Data van de bodemligging van het nieuwe, oostelijke tracé ontbreekt, waardoor er geen continuïteit is in de analyse. In de oude vaargeul (westelijk tracé) vindt sedimentatie plaats sinds deze vanaf oktober 2025 niet langer wordt onderhouden. In de nieuwe vaargeul (oostelijk tracé) lijkt de drempel licht te eroderen, maar er is op basis van de data niet te zeggen of dat gelinkt is aan de verlegging of onderdeel van een grootschaligere trend.
- Met de oude streefdiepte van NAP-3,8 m waren er eind 2025 verschillende plekken waarop de vaargeul niet zou voldoen, zie Figuur 4-5. Dat gaat om de gehele noordelijke Boontjes (0,0-2,0 km), een klein stuk in het middelste gedeelte (3,5-4,0 km) en het zuidelijk geuluiteinde rond de verlegging van het tracé (4,5-6,0 km). Op deze plekken zou in het verleden dus gebaggerd zijn. Uitgaande van de onderhoudsdiepte van NAP-4,3 m werd hiervoor een eenmalig virtueel baggerbezwaar bepaald van ongeveer 65.000 m^3 in-situ (75.000 m^3 beunvolume). Voor de oude streefdiepte en onderhoudsdiepte zou het baggerbezwaar dus naar verwachting een orde groter zijn dan het huidige baggervolume.
- De sedimentatie leidt tot enkele lokale hotspots van baggerwerkzaamheden, die op sommige plekken mogelijk te vermijden zijn door het baggervak zijwaarts mee te laten verplaatsen met de natuurlijke meandering (afhankelijk van nautische en praktische haalbaarheid).

Voor de toekomstige ontwikkeling van de geul Boontjes en het baggerbezwaar zijn de verwachtingen als volgt:
- Op basis van lineaire extrapolatie (conservatieve schatting): structureel onderhoud in noordelijke Boontjes naar verwachting nodig tussen medio 2027 en medio 2028; voor de rest van de vaargeul duurt dit nog aanzienlijk langer of zal dit zelfs niet nodig zijn.
- Gezien de sedimentatietrends per doorsnede verwachten we ook in de toekomst dat alleen bij Boontjes Noord structureel onderhoudsbaggerwerk nodig zal zijn.
- Onderhoudsbaggerwerkzaamheden zullen gegarandeerd pas later nodig zijn dan voor een streefdiepte van NAP-3,8 m en het benodigde baggervolume zal ook substantieel lager zijn.
- Op langere termijn is de verwachting dat de evenwichtsdiepte van de Boontjes zal afnemen als gevolg van morfologische ontwikkelingen op meso-schaal (verdere ophoging plaatgebied rond Boontjes en opvulling van het Kimstergat).

Reflectie op hypotheses (zie tevens de eerste reflectie in Paragraaf 4.3.3):
- Het verdiepen van de geul (hypothese 4a) is vanwege de korte looptijd sinds de start van de pilot beperkt zichtbaar. Het versmallen van de geul is met name in het noordelijke deel goed zichtbaar (hypothese 4a). Over de groei van de platen is met de metingen die hier zijn gebruikt niets te zeggen omdat de platen niet voldoende zijn opgenomen in deze metingen.
- Het verondiepen van het noordelijk gedeelte van de vaargeul sluit aan bij de lange termijn beschouwingen uit hoofdstuk 2. Rond de voormalige drempel vindt dus inderdaad de meeste sedimentatie plaats (hypothese 4b).
- In bocht 2 is naast verdieping ook sprake van meandering (hypothese 4c). In bocht 3 is sprake van geulmigratie en mogelijk ook van meandering, al wordt de buitenbocht niet zichtbaar dieper.

- Afname van sedimentatiesnelheid als gevolg van de afgenomen streefdiepte en onderhoudsdiepte (hypothese 4d) blijkt uit de waargenomen sedimentatie (32.000 m³) en vergelijking met het virtuele baggerbezwaar bij de oude streefdiepte en onderhoudsdiepte (65.000 m³ in-situ). Of de sedimentatiesnelheid in de toekomst verder zal afnemen naar mate de geul verder opvult tot NAP-3,3 m, en daarmee ook het baggerbezwaar op langere termijn zal verminderen, is nog onduidelijk en kan pas worden vastgesteld door de ontwikkeling in de komende jaren te blijven monitoren.

Gezamenlijk leveren deze bevindingen een consistent beeld op. De waarnemingen ondersteunen de verwachting dat sedimentatie zich vooral concentreert in het noordelijke deel van de vaargeul, rond het morfologische wantij en de voormalige drempel. Tussen de noordelijke en de zuidelijke knik wordt de ontwikkeling van de vaargeul voornamelijk gekenmerkt door geulmigratie en meandering, zonder duidelijke aanwijzingen voor grootschalige opvulling. Daarmee lijkt het huidige baggerbezwaar steeds meer bepaald te worden door enkele lokale knelpunten, in plaats van door sedimentatie over de gehele lengte van de vaargeul. Dit ondersteunt de hypothese dat een ondieper onderhoudsprofiel beter aansluit op de natuurlijke ontwikkeling van de geul en daarmee leidt tot een structurele afname van het baggerbezwaar.

Gezien de sterke afname van het baggerbezwaar na aanpassing van de streefdiepte, de beperkte sedimentatie die sindsdien is opgetreden en de inschatting van een aanzienlijk hoger baggervolume bij de oude streefdiepte, wordt de pilot op de korte termijn als succesvol beschouwd. Aangezien een ondiepere vaargeul dichter bij de natuurlijke evenwichtsdoorsnede van de Boontjes ligt, is de verwachting bovendien dat het baggerbezwaar substantieel lager zal blijven. In het noordelijk deel, rond de voormalige drempel, wordt in de toekomst weer baggerbezwaar verwacht. Ook wordt verdere meandering van het middelste gedeelte van de geul verwacht. Daarom wordt aangeraden om deze gedeeltes nauw te blijven monitoren en waar mogelijk de vaargeul zijwaarts mee te laten verplaatsen met natuurlijke meandering.

5 Voorlopige analyse meetcampagne

In dit hoofdstuk wordt de voorlopige analyse van de meetcampagnes toegelicht. Eerst worden het doel en de methode beschreven (Paragraaf 5.1), inclusief hypotheses, beschikbare gegevens en kalibratie van troebelheidssensoren. In het vervolg van dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen feitelijk gerapporteerd, uitgesplitst in resultaten van de meetframes en golfdata (Paragraaf 5.2), resultaten van de 13-uursmetingen (Paragraaf 5.3) en resultaten van de bodembemonstering (Paragraaf 5.4). Binnen de randvoorwaarden van dit project was er geen ruimte voor verdere interpretatie of analyse van sturende processen, zoals het onderzoeken van de samenhang of correlatie tussen diverse variabelen. Dat is dus een vervolgstap die nog gezet moet worden. Tenslotte worden de belangrijkste bevindingen aan het eind van dit hoofdstuk samengevat (Paragraaf 5.5).

5.1 Doel en methode

5.1.1 Doel

Om de oorzaken van sedimentatie en condities waarbij sediment ontstaat beter te begrijpen worden de meetgegevens geanalyseerd. Met deze analyses in dit hoofdstuk wordt meer inzicht verkregen over hypotheses 1, 2 en 3, zoals gepresenteerd in Paragraaf 2.4:

hypothese 1: Stromingspatronen en getijvoortplanting:

d. getijvulling van de Boontjes komt voornamelijk vanuit het Marsdiep;

e. getijvulling van het Kimstergat is gedeeltelijk afkomstig uit de Boontjes (en gedeeltelijk vanuit de Geul langs Pollendam). Ook de ebstroming vanuit Kimstergat verdeelt zich over Boontjes, Molenrak en Geul langs Pollendam; en

f. stroomsnelheden en vloeddominantie nemen sterk af tussen de zuidelijke Boontjes en de noordelijke Boontjes, waardoor ook de transportcapaciteit afneemt in noordelijke richting en aanslibbing in de vaargeul kan ontstaan.

hypothese 2: Wind en golven:

a. Windgolven zorgen voor resuspensie van sediment op de platen, vooral bij wind uit zuidwesten, westen en noordwesten. Oostenwind speelt een beperkte rol, aangezien de Boontjes zich dan in de luwte van het vasteland bevindt.

b. Na resuspensie door golven zorgt golfgedreven stroming voor transport richting de vaargeul (geul-plaatuitwisseling).

hypothese 3: Residuele stroming en netto sedimenttransporten

a. Residuele stroming en netto sedimenttransport zijn alleen in de noordelijke Boontjes in de ebrichting en op de andere meetpunten in de vloedrichting

b. Als gevolg van noordwaarts sedimenttransport vanuit het zuiden en zuidwaarts sedimenttransport vanuit het noorden kan gesuspendeerd sediment ophopen in de vaargeul Boontjes. Hierdoor ontstaat lokale sedimentatie in de vaargeul.

c. De windrichting speelt een belangrijke rol voor netto transporten in de vaarweg Boontjes en in het Kimstergat. Wind uit zuidelijke richtingen versterkt vloedtransport op beide locaties, terwijl wind uit noordelijke richtingen het transport afzwakt of zelfs tijdelijk naar de ebrichting kan doen kantelen.

5.1.2 Beschikbare gegevens

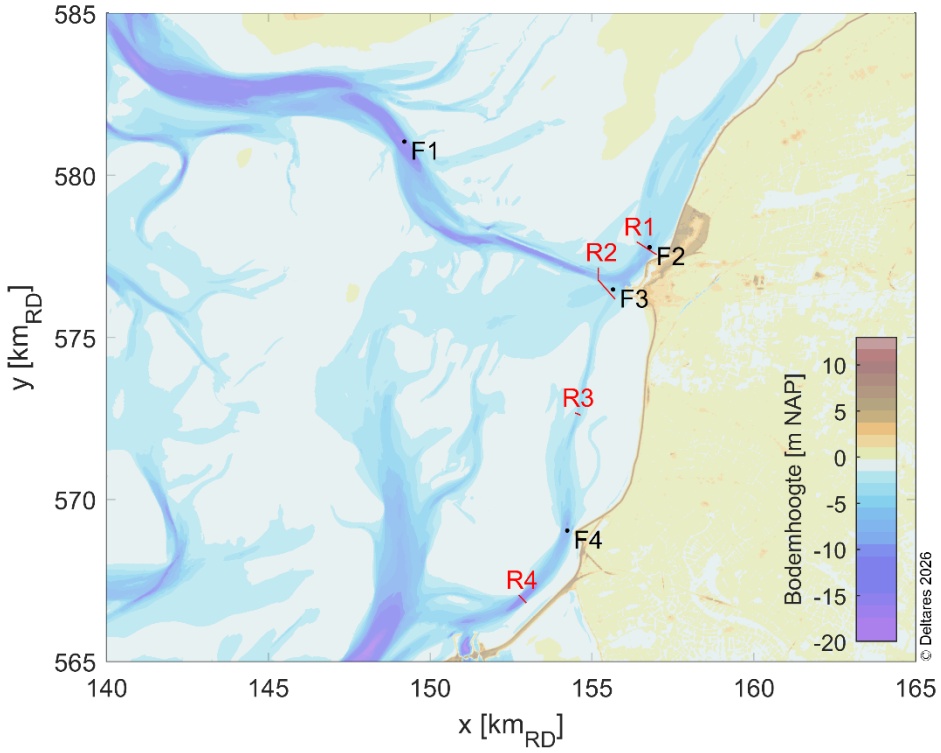
De meetcampagne in en rondom vaarweg Boontjes omvat diverse meetmomenten:

- de T0-meting in het najaar (8 oktober – 17 december) van 2024 (*reeds gerapporteerd door Smits et al. (2025)*);
- de T1-meting, uitgevoerd in het voorjaar (23 april – 2 juli) van 2025;
- de T2-meting, uitgevoerd in het najaar (23 september - 3 december) van 2025; en
- de T3-meting, uitgevoerd in het voorjaar (17 maart – 11 mei) van 2026.

Voor ieder van deze meetmomenten zijn er verschillende metingen uitgevoerd:

- Er zijn vier meetframes (F1 t/m F4, zie locaties in Figuur 5-1 en Tabel 5-1) geplaatst in respectievelijk de Blauwe Slenk, het Kimstergat, de noordelijke Boontjes en de zuidelijke Boontjes met verschillende sensoren die gedurende bovenstaande meetperiodes diverse parameters hebben gemeten:
  – een ADCP-sensor zit bovenop het frame (druksensor 0,65 m boven de bodem) en meet elke 30 seconden een snelheidsprofiel van de bovenkant van het frame tot het wateroppervlak in lagen met een dikte van 0,5 m. Door de zogenaamde *blanking distance* van het instrument bevindt de onderste laag zich tussen 0,32 en 0,82 m boven het instrument, en tussen 0,97 en 1,47 m boven de bodem;
  – een ADV-sensor is horizontaal op het frame gemonteerd, met de druksensor op 0,43 m boven de bodem. De ADV snelheidsmeting wordt op ongeveer dezelfde hoogte boven de bodem gedaan als de druksensor, op een meetfrequentie van 8 Hz;
  – twee OBS-sensoren (type OBS-3+), optische sensoren die troebelheid meten in NTU. De onderste OBS meet de troebelheid ter hoogte van de ADV, op 0,43 m boven de bodem. De bovenste OBS zit hoger op het frame gemonteerd en meet de troebelheid op 0,62 m boven de bodem. Omdat de OBS-sensoren gekoppeld zijn aan de ADV meten zij ook op een frequentie van 8 Hz;
  – een CTD-sensor meet eens per 10 minuten de Conductiviteit (geleidbaarheid), Temperatuur en Druk. De CTD-sensors zitten op verschillende hoogtes boven de bodem gemonteerd, te weten 54 cm (F1), 55 cm (F2), 40 cm (F3) en 23 cm (F4). Op basis van de gemeten conductiviteit en temperatuur is de chlorositeit, de saliniteit, en de dichtheid bepaald;
- Tijdens de T2-meting (najaar 2025) en T3-meting (voorjaar 2026) is golfdata ingewonnen voor meetframes F3 (noordelijke Boontjes) en F4 (zuidelijke Boontjes) met een ADCP Workhorse type II-sensor.
- Er zijn varende 13-uursmetingen uitgevoerd om de stroming en sedimentconcentraties langs vier raaien (R1 t/m R4, zie locaties in Figuur 5-1 en Tabel 5-2) te meten met een naar beneden gerichte ADCP-sensor. De vier raaien liggen in het Kimstergat, Boontjes zuid, Boontjes midden en een geknikte raai Pollendam – Molenrak – Boontjes noord. Deze 13-uursmetingen zijn tijdens de T0-meting één keer bij springtij en één keer bij doodtij uitgevoerd en op de latere meetmomenten slechts eenmalig (in het voorjaar 2025 overgang doodtij naar springtij en in het najaar 2025 bij springtij);
- Tijdens het uitvoeren van de varende 13-uursmetingen zijn diepteprofielen van temperatuur, geleidbaarheid en troebelheid gemeten door een CTD-sensor en een OBS (type EXO) vanaf het meetschip naar de bodem te laten zakken (en weer op te halen). Uit de geleidbaarheid kan het zoutgehalte worden afgeleid, en uit de troebelheid de sedimentconcentratie;
- Tijdens de T0- en T3-meting zijn er sedimentmonsters genomen van de bodem van de vaarweg Boontjes en het Kimstergat, waarvoor de samenstelling van het sediment is bepaald. In de andere meetcampagnes is deze bodembemonstering niet uitgevoerd.

De resultaten van de T0-metingen zijn door Smits et al. (2025) gepresenteerd en geanalyseerd. De eerdere resultaten worden hier gebruikt ter vergelijking met de nieuwe meetresultaten.



Figuur 5-1: Locaties van meetframes (F1-F4, zwarte stippen) en raaien voor varende metingen (R1-R4, rode lijnen) voor de verschillende meetmomenten.

Tabel 5-1: Coördinaten van de vier locaties waar meetframes zijn uitgezet. De bodemhoogte is bepaald als de bodemhoogte van recente vaklodingen op deze locaties, maar is niet ingemeten bij het installeren of ophalen van de frames.

Locatie	X (RD) [m]	Y (RD) [m]	Breedtegraad (WGS84) [°]	Lengtegraad (WGS84) [°]	Naam	Bodemhoogte [m NAP]
F1	149201	581040	53,21595	5,3004	Blauwe Slenk	+/- -14.6
F2	156782	577784	53,18672	5,41387	Kimstergat	+/- -5.9
F3	155650	576478	53,17499	5,39693	Molenrak-Boontjes	+/- -4.1
F4	154234	569038	53,10814	5,37577	Boontjes-Zuricheroord	+/- -8.5

Tabel 5-2: Coördinaten van de begin-(, midden-,) en eindpunten van de raaien waarop varende metingen zijn uitgevoerd.

Raai	Naam	X-begin (RD) [m]	Y-begin (RD) [m]	X-midden (RD) [m]	Y-midden (RD) [m]	X-eind (RD) [m]	Y-eind (RD) [m]
R1	Kimstergat	156380	577950			157000	577550
R2	Pollendam-Molenrak-Boontjes	155194	577157	155189	576776	155714	576178
R3	Boontjes midden	154480	572670			154650	572600
R4	Boontjes zuid	152740	567050			152970	566800

Er zijn diverse bijzonderheden opgetreden bij inwinning en oplevering van de meetgegevens, waaronder onderhoudsmomenten, periodes met ontbrekende data en onrealistische meetwaarden. Deze bijzonderheden zijn opgesomd in Bijlage B.1.

Bij de analyse van de meetgegevens zijn de volgende aanvullende datasets gebruikt:

- **Bodempeilingen** van de westelijke Waddenzee en de vaargeul Boontjes (beschreven in Paragraaf 4.1);
- **Baggervolumes** in de vaargeul Boontjes gedurende de meetcampagne (eveneens beschreven in Paragraaf 4.1);
- **Winddata**: tijdreeksen van de windsnelheid en windrichting gedurende de meetperiodes zijn afkomstig van de meteorologische metingen bij KNMI-station Stavoren en is geleverd door het CIV op aanvraag via Servicedesk Data; en
- **Spuidebieten** bij de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand gedurende de meetperiode zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat.

5.1.3 Kalibratie van troebelheidssensoren

De troebelheidssensoren (OBS type EXO) meten troebelheid (eenheid NTU). De troebelheid wordt omgezet naar concentratie zwevend stof (ofwel SPM, eenheid mg/L) aan de hand van een conversiefactor. Deze conversiefactor wordt bepaald door watermonsters te nemen tijdens de varende 13-uursmetingen. Vanaf het meetschip zijn watermonsters opgepompt terwijl met de OBS een troebelheidsmeting bij de instroomopening van het pompsysteem wordt uitgevoerd. Uit de meting met de OBS volgt dan een troebelheid in NTU. Uit laboratoriumanalyse van de opgepompte watermonsters volgt de concentratie zwevende stof, in mg/L. Door de OBS-meting en de laboratoriumanalyse tegen elkaar uit te zetten wordt een conversiefactor van troebelheid (in NTU) naar concentratie zwevende stof (in mg/L) bepaald. Deze conversiefactor verschilt dus per meetperiode.

Voor waarden van de gehanteerde conversiefactoren zijn getoond in Tabel 5-3.Voor de T0-meting is eerder door Smits et al. (2025) opgemerkt dat de waarde van de gehanteerde conversiefactor van 3,54 (mg/L)/NTU relatief hoog is, ten opzichte van eerder gehanteerde conversiefactoren, bijvoorbeeld bij de meetpalen Holwerd en Dantziggat van 1,9 (mg/L)/NTU (Bi et al., 2024). Voor de vervolgmetingen zijn de waardes voor de conversiefactor tussen de 2,0 en 2,5 (mg/L)/NTU. Deze waardes lijken realistischer, wat het vertrouwen in de absolute waarde van de sedimentconcentraties (na conversie) voor de vervolgmetingen groter maakt dan voor de T0-meting. Voor de verdere interpretatie en vergelijking met de andere meetperiodes wordt de T0-meting gecorrigeerd door de gemiddelde kalibratiecoëfficiënt van de T1-, T2- en T3-meting te gebruiken in plaats van de kalibratiecoëfficiënt die (vermoedelijk foutief) is afgeleid voor de T0-meting. Dit komt neer op een correctie met een factor 0,6486.

Tabel 5-3: Kalibratie troebelheidssensoren per meetperiode

Meetperiode	Conversiefactor [(mg/L)/NTU]
T0-meting (najaar 2024)	3,5403
T1-meting (voorjaar 2025)	2,3017
T2-meting (najaar 2025)	2,4691
T3-meting (voorjaar 2026)	2,1184

5.2 Resultaten meetframes en golfdata

De meetresultaten van de meetframes wordt hier besproken aan de hand van een aantal clusters van parameters. Eerst wordt een algemeen beeld van de waterbeweging en troebelheid beschreven aan de hand van tijdreeksen van waterstanden, stroomsnelheden en troebelheid. Daarna wordt ingezoomd op wind en golven en de samenhang met troebelheid.

Vervolgens worden residuele stroming en sedimenttransporten getoond en wordt de invloed van getij en windrichting besproken. Dichtheidsinvloeden (zoutgehalte, temperatuur en het spuidebiet bij Kornwerderzand) zijn nog niet meegenomen in dit conceptrapport.

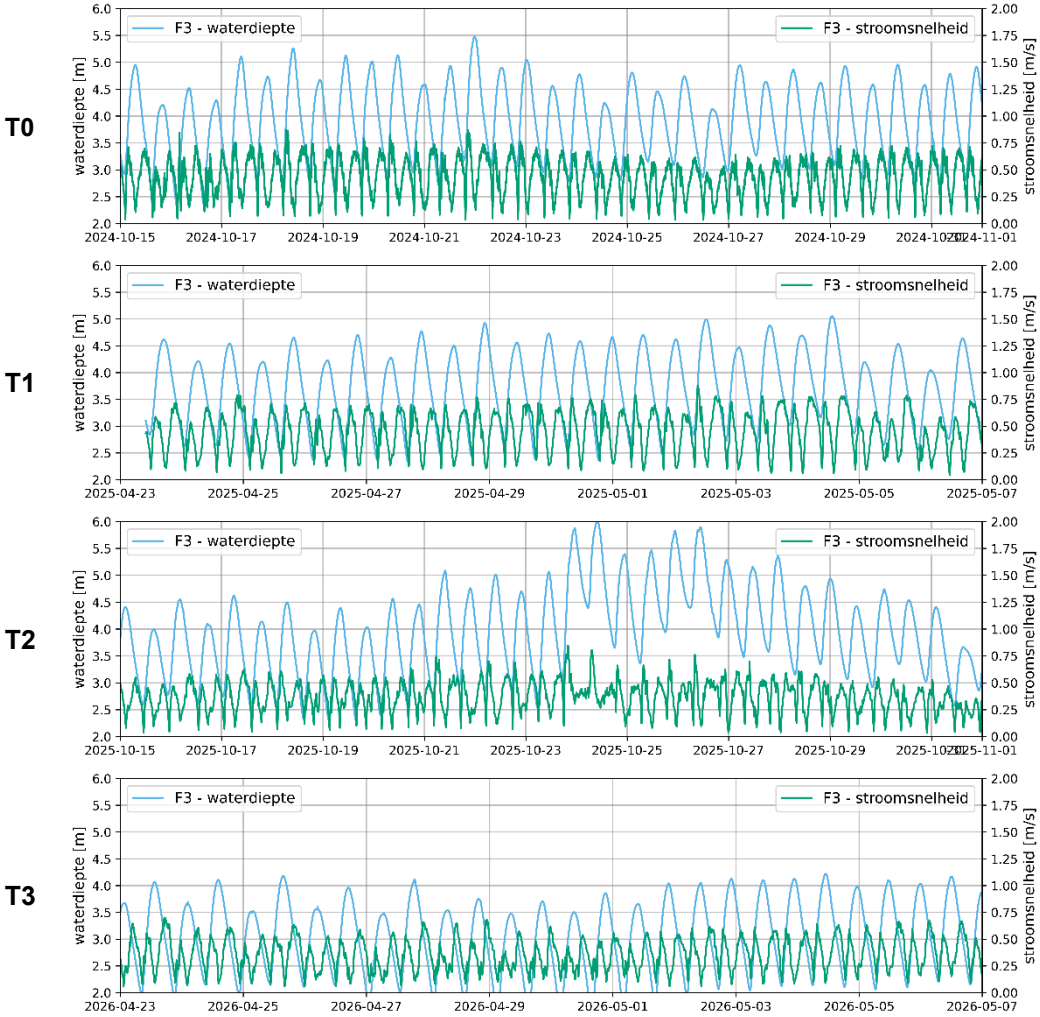
Data die nog niet zijn geanalyseerd en mogelijke analyses hierop, betreffen:

- CTD-metingen van de meetframes van temperatuur, geleidbaarheid (om zoutgehalte uit af te leiden) en druk;
- CTD- en OBS-metingen diepteprofielen van temperatuur, geleidbaarheid en troebelheid verzameld tijdens de 13-uurs metingen;
- samenhang van gemeten parameters met wind en spuitdebieten bij Kornwerderzand; en
- analyse van gecombineerde windsnelheid en windrichting.

Tabellen met een aantal basisstatistieken (waaronder gemiddelde, standaarddeviatie, minimum en maximumwaarde) van de variabelen waterstand, stroomsnelheid, golfhoogte, golfperiode, zoutgehalte en SPM zijn opgenomen in Bijlage B.1.

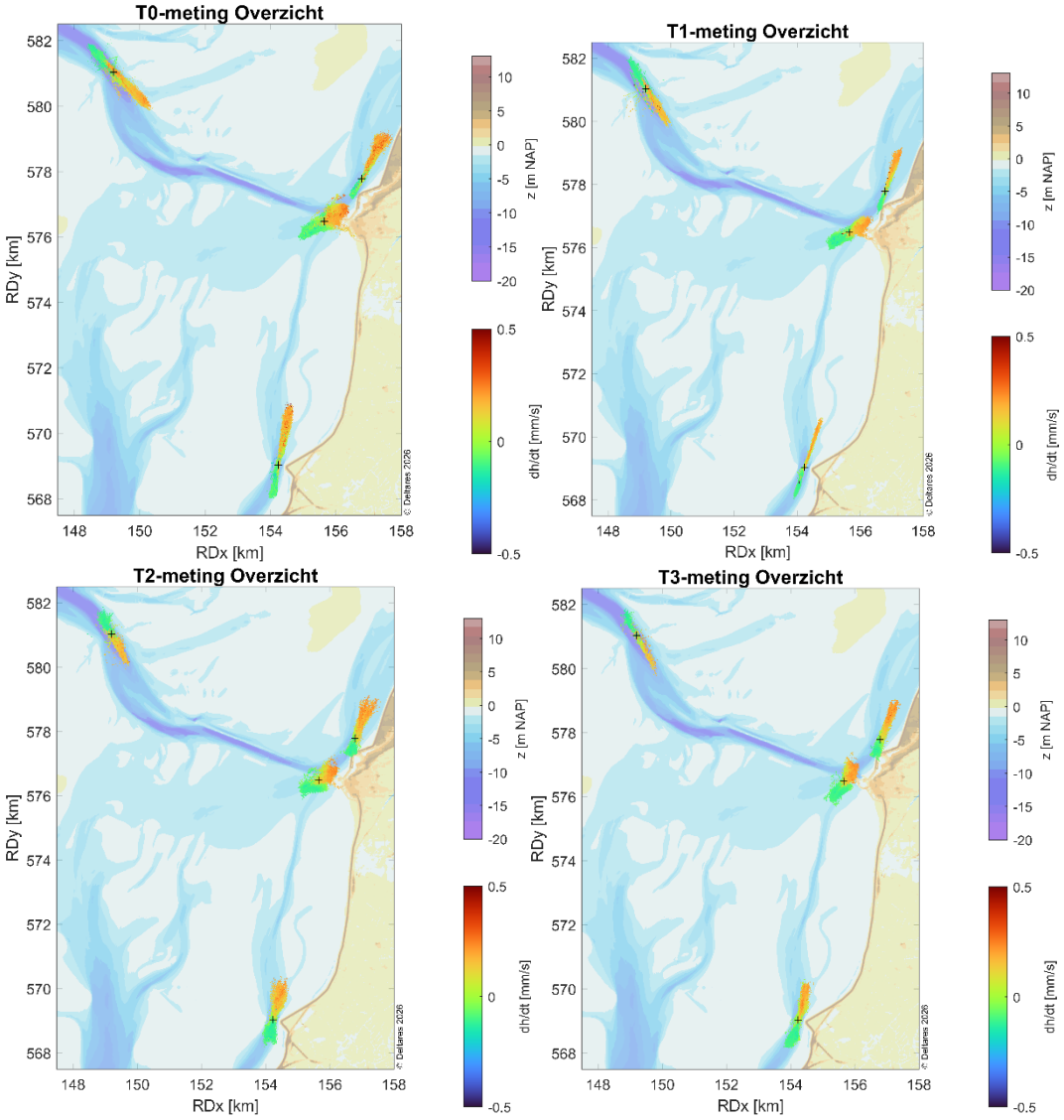
5.2.1 Waterstanden, stroomsnelheden en troebelheid

Om een eerste beeld te krijgen van de waterbeweging worden tijdreeksen van waterstanden en stroomsnelheden gedurende één springtij-doodtijperiode op meetlocatie Boontjes Noord (F3) getoond in Figuur 5-2. Voor de andere meetlocaties zijn deze figuren toegevoegd in Bijlage B (Figuur B-7, Figuur B-18 en Figuur B-29). De stroomsnelheden verschillen niet veel tussen de verschillende meetperiodes, al lagen de piek stroomsnelheden in de T0- en T1-meting iets hoger dan tijdens de T2- en T3-meting (zie ook de statistieken voor ‘velocity magnitude’ in de tabellen in Bijlage B.2). Daarnaast is voor meetperiode T2 goed te zien dat er sprake was van een waterstandsopzet tussen 24 en 29 oktober 2025 (in Sectie 5.2.2 is dit ook terug te zien in windsnelheden) en dat de waterdiepte over de tijd is afgenomen van gemiddeld 4,4 m in het najaar van 2024 tot 3,6 m in het voorjaar van 2026.



Figuur 5-2: Tijdreeksen voor waterdiepte (blauw, linker y-as) en stroomsnelheid (groen, rechter y-as) voor meetframe Boontjes Noord (F3) over één springtij-doodtijperiode. Van boven naar beneden worden meetperiodes T0, T1, T2 en T3 getoond.

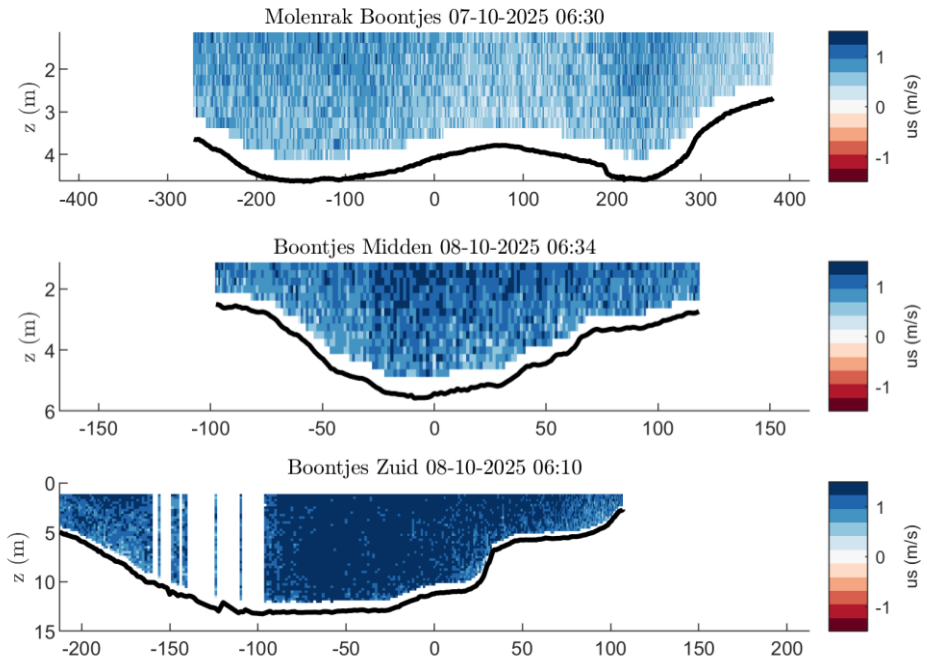
Piek stroomsnelheden tijdens eb en vloed verschillen niet substantieel van elkaar op meetlocatie Boontjes Noord. Op de andere meetlocaties is dit wel het geval, waarbij de stroming tijdens vloed sterker is dan tijdens eb (vloeddominant). Deze getijasymmetrie komt duidelijker naar voren door de snelheidsvectoren op een kaart te tonen, zoals in Figuur 5-3. Deze figuur toont ook de fasering van het verticale getij (kleuren). De verandering van de waterstand is over het algemeen positief tijdens vloed (d.w.z. stijgende waterstand), en negatief tijdens eb (d.w.z. dalende waterstand). Het algemene beeld uit de T0-meting blijft overeind dat de vloedstroming bij Harlingen deels vanuit het Vlie afkomstig is, via de Geul langs Pollendam en deels vanuit het Marsdiep, via de Boontjes (Smits et al., 2025). Ook is de afname van de piek stroomsnelheden tijdens vloed van Boontjes Zuid (F4) naar Boontjes Noord (F3) (respectievelijk 1,0 à 1,5 m/s t.o.v. 0,5 à 1,0 m/s) en tevens de afname van vloeddominantie van zuid naar noord (verhouding tussen piek vloed- en piek ebstroomsnelheden) consistent terug te zien voor de verschillende meetperiodes. Dit beeld is ook terug te zien in de 13-uursmetingen (zie voorbeeld voor T3-meting in Figuur 5-4 en overige figuren in Bijlage C).



Figuur 5-3: Gemeten snelheidsvectoren op de vier meetlocaties voor meetperiodes najaar 2024 (linksboven), voorjaar 2025 (rechtsboven), najaar 2025 (linksonder) en voorjaar 2026 (rechtsonder). De meetlocaties zijn weergeven met een +. Schaal stroomsnelheden: 1 m/s : 1 km op de achtergrondkaart. De kleur toont de verandering van de waterstand en daarmee een indicatie van de fase in het getij. Een grotere weergave van deze figuur is toegevoegd in de bijlage (Figuur B-3 en Figuur B-4).

Bij vergelijking van de verschillende meetperiodes in Figuur 5-3 valt op dat de stroomsnelheden bij Boontjes Zuid in de T2- en T3-meting minder vloeddominant zijn dan in de T0- en T1-meting. Daarnaast valt ook op dat de richting van de stroming tussen verschillende meetperiodes voor sommige meetframes licht gedraaid lijkt. Naar verwachting zijn dit geen werkelijke veranderingen van het systeem, maar zijn de verschillen veroorzaakt door kleine verschuivingen van de locatie van het meetframe tussen de meetperiodes of een verschil in de dominante windrichting (zie Sectie 5.2.3 voor analyse windgegevens). Bijvoorbeeld:

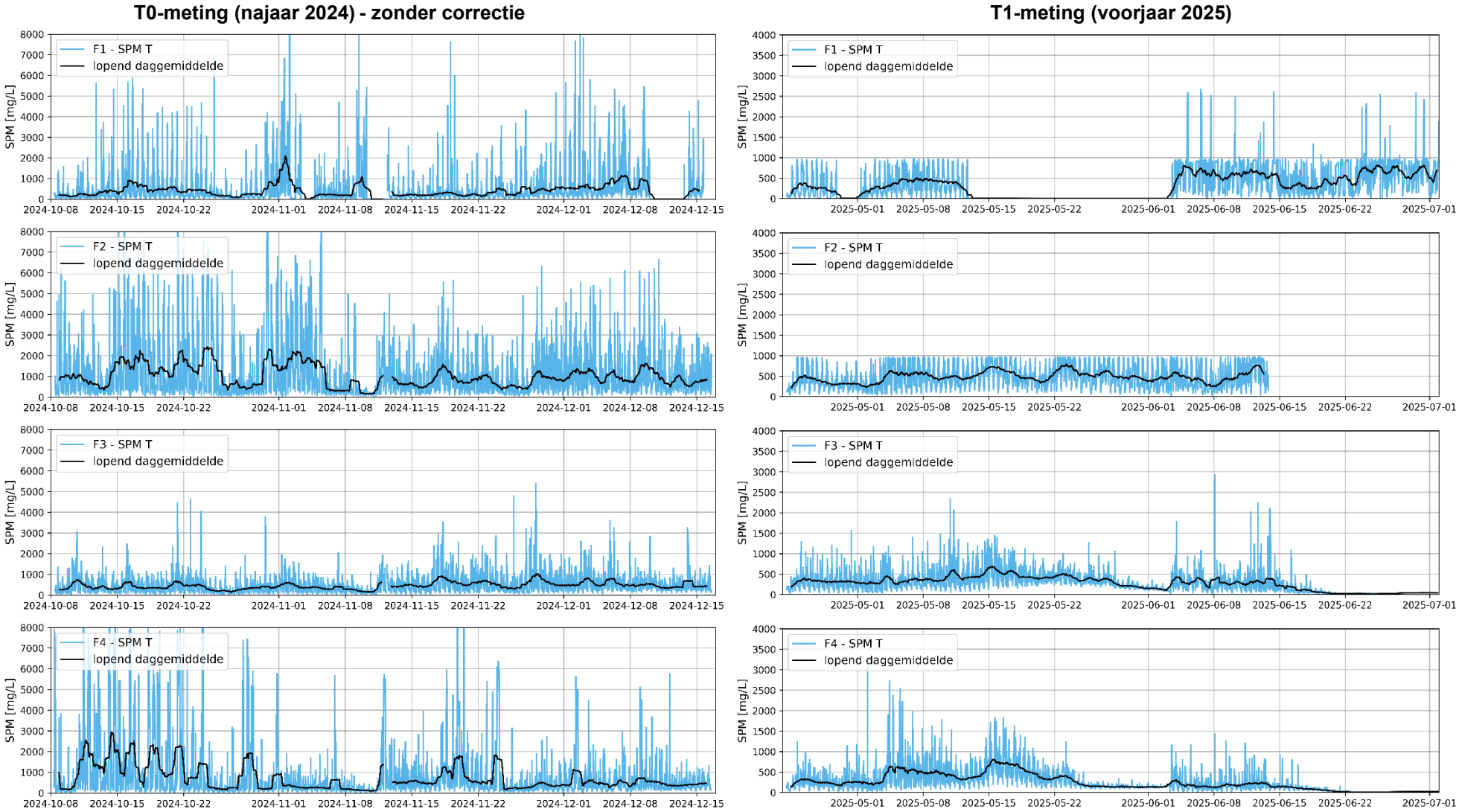
- in de Blauwe Slenk (F1) is de mediane richting gedraaid van NW (318°)–ZO (131°) tijdens de T0-meting naar NNW (330°)–ZZO (153°) tijdens de latere metingen; en
- bij Boontjes Noord (F3) is de mediane richting gedraaid van WZW (240°)–NO (50°) tijdens de T0-, T1- en T2-metingen naar ZW (215°)–NNO (30°) tijdens de T3-meting.



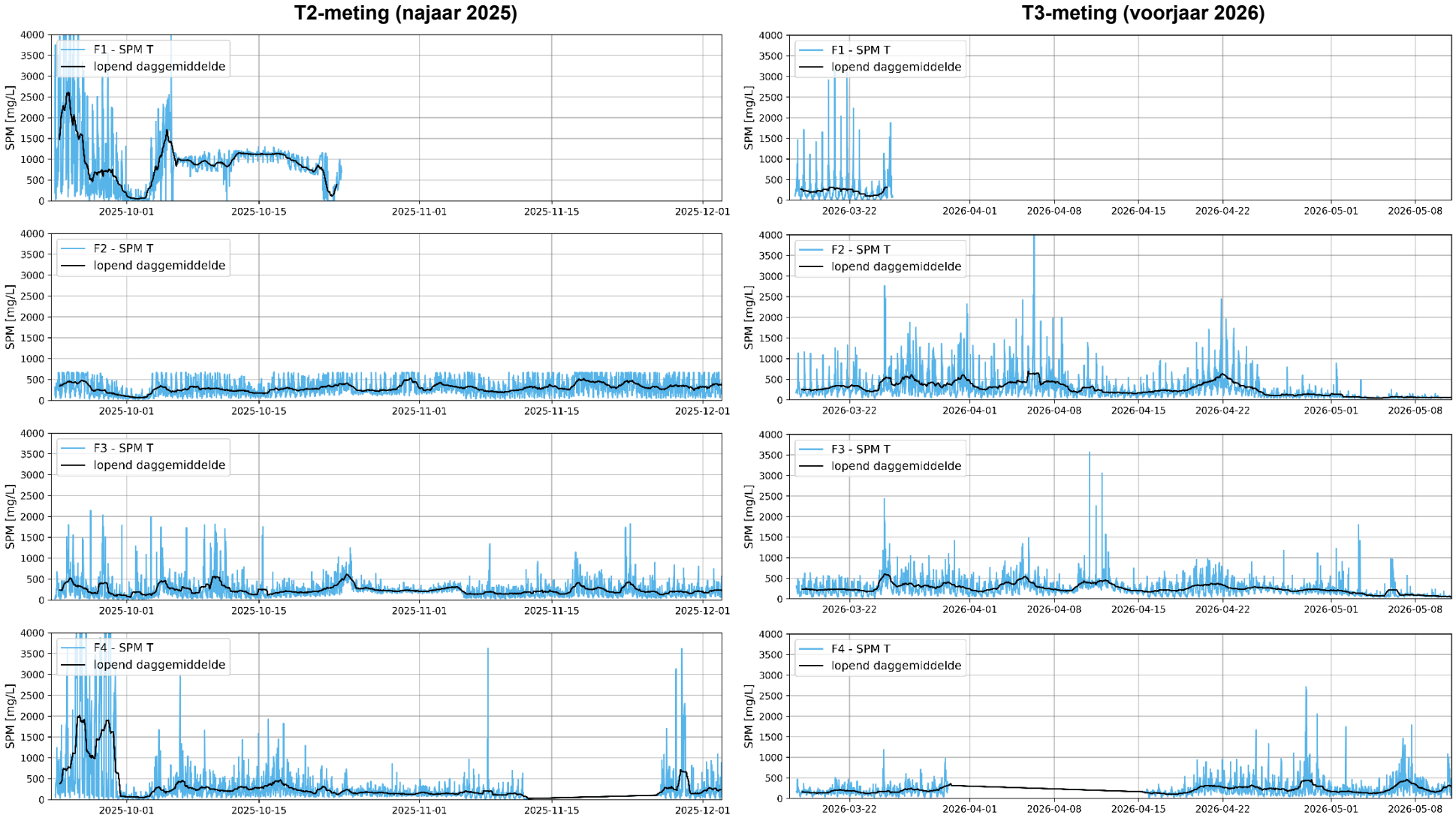
Figuur 5-4: Gemeten stroomsnelheid in de richting van de geul tijdens piek vloedstroming op 7 en 8 oktober 2025 (T3-meting) op raaien Molenrak-Boontjes (R2; boven), Boontjes Midden (R3; midden) en Boontjes Zuid (R4; onder). Positieve waardes zijn in vloedrichting, negatieve waardes in ebrichting. Merk op dat alleen het rechterdeel van de raai Molenrak-Boontjes de geul Boontjes betreft en dat de schaal van x- en y-as verschilt tussen de panelen. De kleurenschaal is echter gelijk voor de drie panelen.

5.2.2 Gemeten troebelheid en analyse sedimentconcentraties

Tijdreeksen van de sedimentconcentraties (SPM) bij de bovenste optische sensor op de frames (0,62 m boven de bodem) zijn weergegeven in Figuur 5-5 (T0- en T1-meting) en Figuur 5-6 (T2- en T3-meting). Dezelfde figuren voor de onderste OBS-sensor zijn toegevoegd in Bijlage B (Figuur B-5 en Figuur B-6). Zoals besproken in Paragraaf 5.1.3 verschilt de kalibratiecoëfficiënt tussen de verschillende meetperiodes, waardoor de resulterende SPM-waardes voor de T0-meting aanmerkelijk hoger liggen dan voor de latere meetperiodes. Dit heeft hoogstwaarschijnlijk te maken met een fout in de kalibratie van de T0-meting en is dus naar verwachting geen fysische verandering in het systeem. Om die reden worden de figuren ook getoond met verschillende y-as, zodat de relatieve verschillen beter zichtbaar zijn. Voor de verdere interpretatie en vergelijking met de andere meetperiodes wordt de T0-meting gecorrigeerd door de gemiddelde kalibratiecoëfficiënt van de T1-, T2- en T3-meting te gebruiken in plaats van de kalibratiecoëfficiënt die (vermoedelijk foutief) is afgeleid voor de T0-meting. Dit komt neer op een correctie met een factor 0,6486.



Figuur 5-5: Tijdreeksen van de gemeten sedimentconcentraties (SSC ofwel SPM) bij de bovenste OBS (0,62 m boven de bodem) op de frames bij (van boven naar beneden) Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2), Boontjes noord (F3) en Boontjes zuid (F4). Links worden de resultaten van de T0-meting (najaar 2024; zonder correctie) getoond en rechts van de T1-meting (voorjaar 2025). Merk op dat de schaal van de y-as verschilt (0-8000 mg/L voor T0 en 0-4000 mg/L voor T1), in lijn met het verschil in kalibratiecoëfficiënten tussen de meetperiodes beschreven in Paragraaf 5.1.3 Daarnaast zijn de waardes .



Figuur 5-6: Tijdreeksen van de gemeten sedimentconcentraties (SSC ofwel SPM) bij de bovenste OBS (0,62 m boven de bodem) op de frames bij (van boven naar beneden) Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2), Boontjes noord (F3) en Boontjes zuid (F4). Links worden de resultaten van de T2-meting (najaar 2025) getoond en rechts van de T3-meting (voorjaar 2026).

Ten aanzien van de datakwaliteit wordt opgemerkt:

- Voor een aantal momenten ontbreekt data op specifieke meetframes (reeds benoemd in Paragraaf 4.1):
    a) op meetframe F1 tijdens de gedeeltes van de T1-meting, in de weken voorafgaand aan het onderhoudsmoment op 3 juni 2025,
    b) op meetframe F2 voor de T1-meting na 14 juni 2025 ,
    c) op meetframe F1 voor de T2-meting na 23 oktober 2025, en
    d) op meetframe F1 voor de T3-meting na 25 maart 2026.
- De sedimentconcentraties op meetframe F2 in de T1-meting (tweede paneel rechts in Figuur 5-5) en T2-meting (tweede paneel links in Figuur 5-6) zijn afgekapt op waardes van respectievelijk 1000 mg/L en 600 mg/L. Zie ook de opmerking hierover in Bijlage B.1. Dit betreft dus een meetfout en geen fysisch gedrag. Vermoedelijk zijn dus ook de daggemiddelde SPM-waardes in het Kimstergat hoger uitgekomen in deze meetperiodes.

De daggemiddelde SPM-waarden (zwarte lijnen in Figuur 5-5 en Figuur 5-6) liggen over het algemeen onder de 1000 mg/L. De enige uitzondering daarop vormen de meetlocaties Kimstergat (F2) en Boontjes Zuid (F4) op enkele momenten in het najaar van 2024 (T0-meting; na correctie) en de meetlocaties Blauwe Slenk (F1) en Boontjes Zuid (F4) in het najaar van 2025 (T3-meting). De door Smits et al. (2025) opgemerkte ‘blokken’ met hoge daggemiddelde SPM voor een aantal opeenvolgende vloedperiodes op meetlocatie F4 tijdens de T0-meting lijken niet of nauwelijks op te treden in de vervolgmetingen.

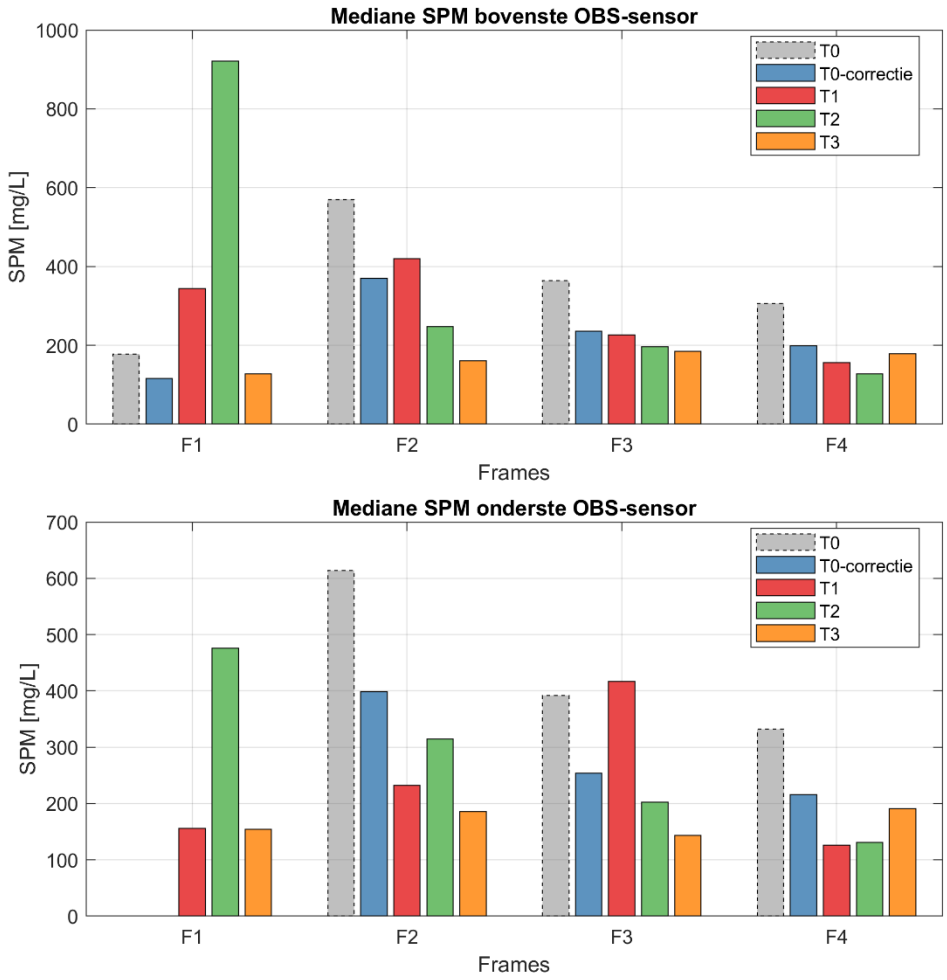
Over de gehele meetperiodes zijn de gemiddelde en mediane SPM-waardes per meetframe samengevat in Tabel 5-4, Tabel 5-5 en Figuur 5-7. De verschillen tussen de onderste en bovenste OBS-sensor zijn substantieel en niet consistent (d.w.z. lager in de waterkolom is niet altijd troebeler), terwijl de twee sensors niet ver uit elkaar hingen (resp. 62 cm en 43 cm boven de bodem). Dat impliceert dat SPM niet alleen uitzakt naar de bodem, maar dat er ook een aanzienlijke mate van menging optreedt. Per meetframe waren de SPM-waardes veelal het hoogst tijdens de T0-meting, vanwege de hoge kalibratiecoëfficiënt. Na correctie voor dit verschil in kalibratie valt op dat er géén duidelijk seizoenseffect optreedt: gemiddelde SPM-waardes in het najaar zijn niet consistent hoger dan in het voorjaar. Waar de daggemiddelde SPM dus wel hogere pieken vertoont in het najaar (vorige alinea), geldt dit niet over langere meetperioden.

*Tabel 5-4: Gemiddelde (mediane) SPM-waarde in mg/L voor bovenste OBS-sensor (62 cm boven de bodem). *) SPM-waardes voor de bovenste OBS-sensor in het Kimstergat zijn tijdens T1- en T2-meting door een meetfout afgekapt op respectievelijk 1000 mg/L en 600 mg/L*

	F1	F2	F3	F4
T0 (najaar 2024)	390 (178)	1013 (570)	453 (364)	723 (306)
T0 (correctie)	253 (116)	657 (370)	294 (236)	469 (199)
T1 (voorjaar 2025)	443 (344)	478 (420)*	275 (226)	243 (156)
T2 (najaar 2025)	907 (921)	297 (247)*	239 (197)	279 (127)
T3 (voorjaar 2026)	233 (127)	247 (161)	226 (184)	241 (179)

Tabel 5-5: Gemiddelde (mediane) SPM-waarde in mg/L voor onderste OBS-sensor (43 cm boven de bodem). Voor de T0-meting was geen onderste OBS-sensor aanwezig in de Blauwe Slenk (F1).

	F1	F2	F3	F4
T0 (najaar 2024)	N/A	1082 (614)	523 (392)	667 (332)
T0 (correctie)	N/A	702 (398)	339 (254)	433 (215)
T1 (voorjaar 2025)	456 (156)	355 (232)	588 (417)	213 (126)
T2 (najaar 2025)	721 (476)	478 (315)	290 (202)	250 (131)
T3 (voorjaar 2026)	276 (154)	266 (186)	204 (143)	287 (191)



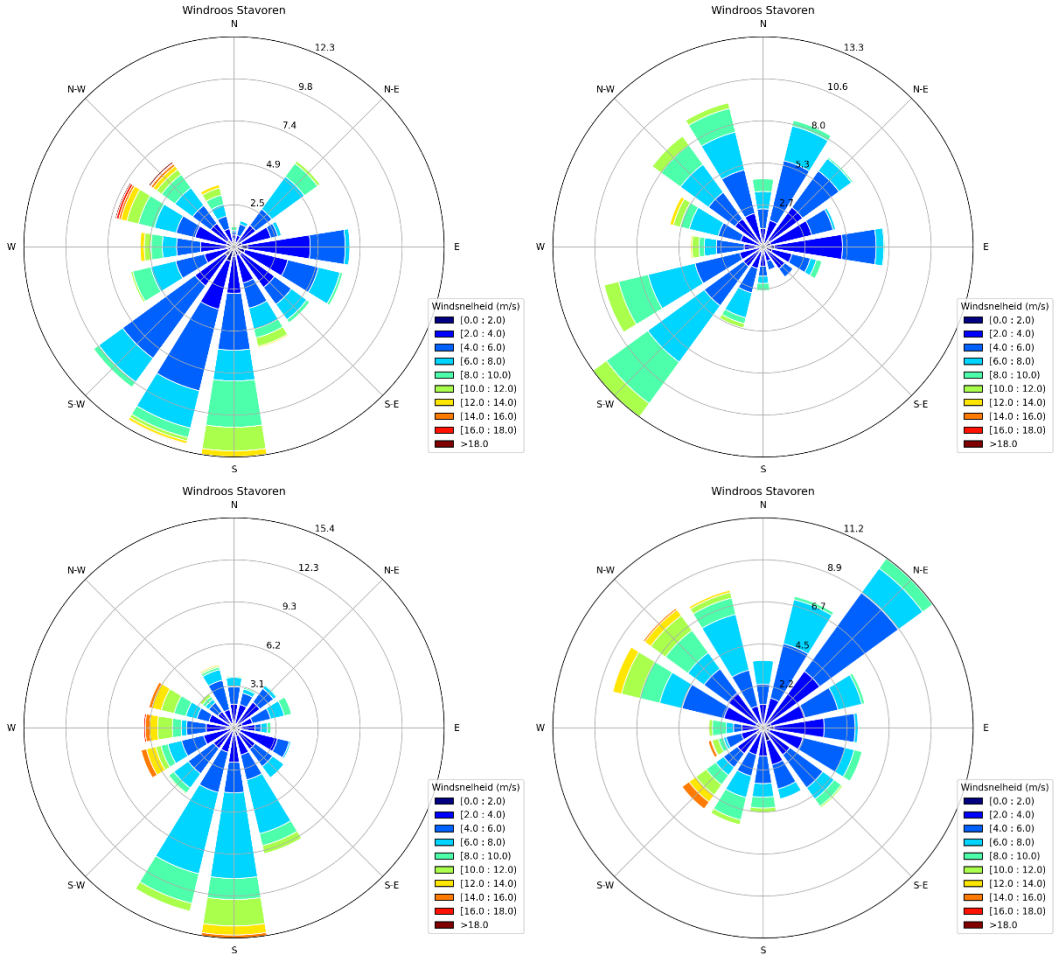
Figuur 5-7: Staafdiagram met mediane SPM-waardes per meetframe (x-as; F1-F4) en meetperiode (kleuren; T0-T3, na correctie). Boven de gemeten waardes voor de bovenste OBS-sensor en onder voor de onderste OBS-sensor. Merk op dat mediane SPM-waardes voor de bovenste OBS-sensor in het Kimstergat (F2) tijdens T1- en T2-meting vermoedelijk hoger liggen door de meetfout waarbij de gemeten SPM-waardes werden afgekapt.

Er is in meer detail gekeken naar de troebelheid in het Kimstergat voor de momenten waarop gebaggerd materiaal uit de Boontjes en uit de haven van Harlingen is verspreid. Hieruit kwam nog in eerste instantie nog geen duidelijke samenhang naar voren: op sommige verspreidingsmomenten zijn SPM-pieken te zien, maar op andere verspreidingsmomenten juist lage SPM-waardes. In de Knelpuntanalyse Kimstergat, die in het najaar van 2026 wordt uitgevoerd als onderdeel van BO Wadden, zal de verspreiding van baggerspecie in het Kimstergat en de samenhang met de gemeten SPM-waardes in meer detail worden bestudeerd.

5.2.3 Wind, golven en troebelheid

Om meer inzicht te krijgen in de rol van wind en golven voor troebelheid en sedimentatie in de vaargeul, worden de wind- en golfcondities in deze sectie geanalyseerd en worden tijdreeksen getoond van windsnelheid, golfhoogte (indien gemeten) en SPM. Dit geeft inzicht in de mate en oorzaken van seizoensvariaties in SPM en ook in de rol van de windrichting.

De gemeten windcondities tijdens de verschillende meetperiodes bij Stavoren zijn weergegeven in Figuur 5-8. Wat daaraan opvalt is dat de voorkomende windrichtingen en met name ook de dominante windrichting sterk verschillen tussen de verschillende meetperiodes. Voor de T0-meting en T2-meting, beiden in het najaar, was zuidenwind de meestvoorkomende conditie. Tijdens de T1-meting (voorjaar 2025) was zuidwestenwind het meestvoorkomend en waren er uitzonderlijk weinig momenten met harde wind (> 6 Bft.). Tijdens de T3-meting (voorjaar 2026) was de meestvoorkomende windrichting uit het noordoosten en relatief weinig wind uit het zuidwesten, al kwamen de hoogste windsnelheden wel uit deze richting. Een aantal basisstatistieken van deze wind zijn weergegeven in Tabel 5-6.



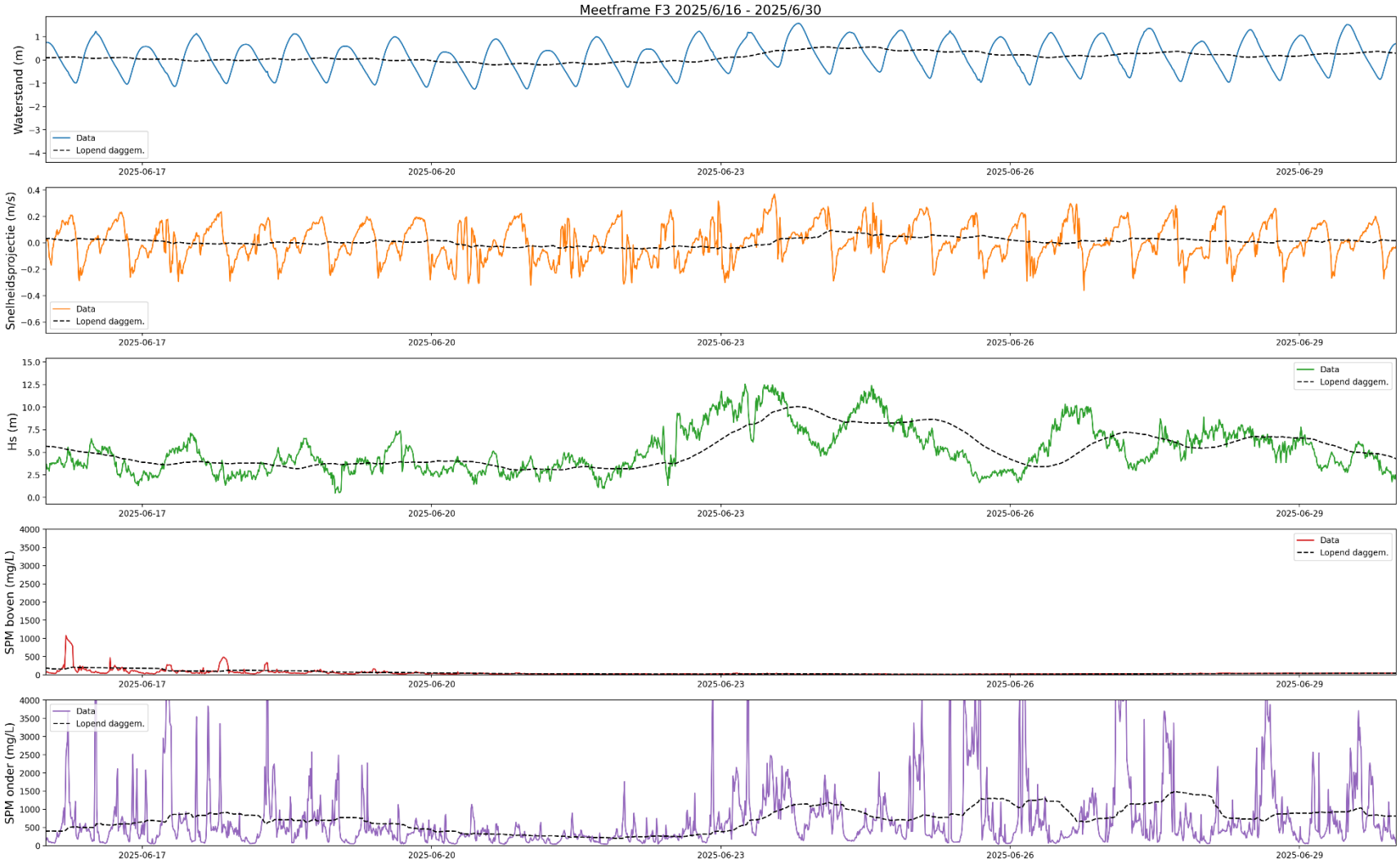
Figuur 5-8: Windrozen bij Stavoren voor najaar 2024 (T0-meting, linksboven), voorjaar 2025 (T1-meting, rechtsboven), najaar 2025 (T2-meting, linksonder) en voorjaar 2026 (T3-meting, rechtsonder). Blauwe kleuren zijn zwakke tot matige wind (<5 Bft.), groene kleuren krachtig tot vrij krachtig (5-6 Bft.), geel is harde wind (7 Bft.) oranje en rood zijn stormachtig en harder (>7 Bft.).

Tabel 5-6: Windstatistieken per meetperiode.

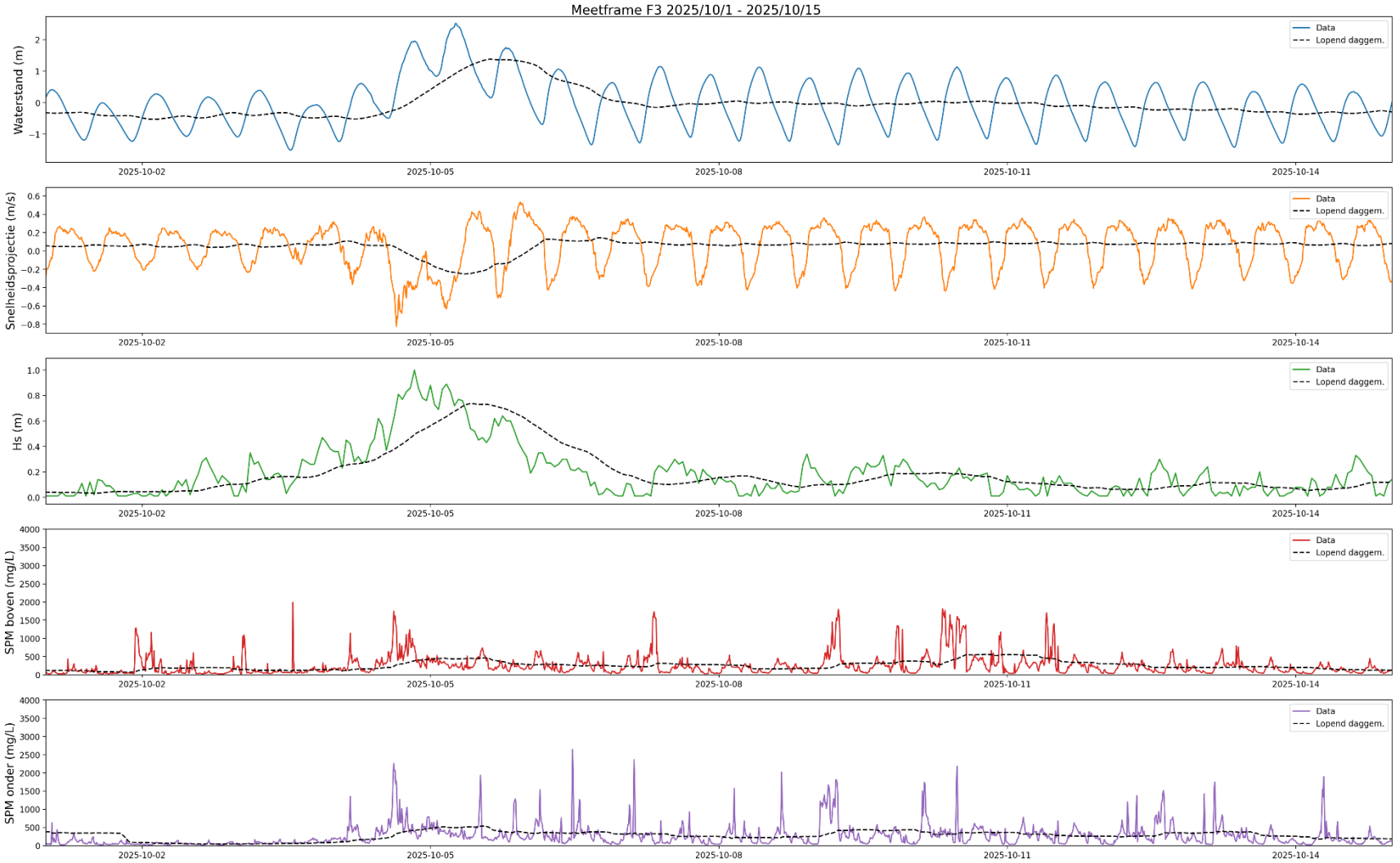
Statistiek	T0-meting najaar ’24	T1-meting voorjaar ’25	T2-meting najaar ‘25	T3-meting voorjaar ‘26
Meestvoorkomende windrichting	Z	ZW	Z	NO
Mediane windsnelheid (m/s)	4.90	5.21	5.56	4.90
Gemiddelde windsnelheid (m/s)	5.42	5.46	5.87	5.46
Standaard deviatie windsnelheid (m/s)	2.84	2.43	3.00	2.74
Aantal 10 min. registraties >6 Bft. (-)	476	201	779	344
Percentage **10 min. Registraties > 6 Bft.** (%)	5%	2%	8%	5%

Om meer inzicht te krijgen in de invloed van wind en golven op troebelheid wordt ingezoomd op de resultaten voor periodes van 14 dagen (een springtij-doodtijperiode). Figuur 5-9 tot en met Figuur 5-12 tonen tijdreeksen van waterstanden, stroomsnelheden, golfhoogte (indien gemeten, anders windsnelheid als proxy) en SPM op meetlocatie Boontjes Noord (F3). Figuren voor de andere meetlocaties zijn toegevoegd aan Bijlage B. Wat opvalt:

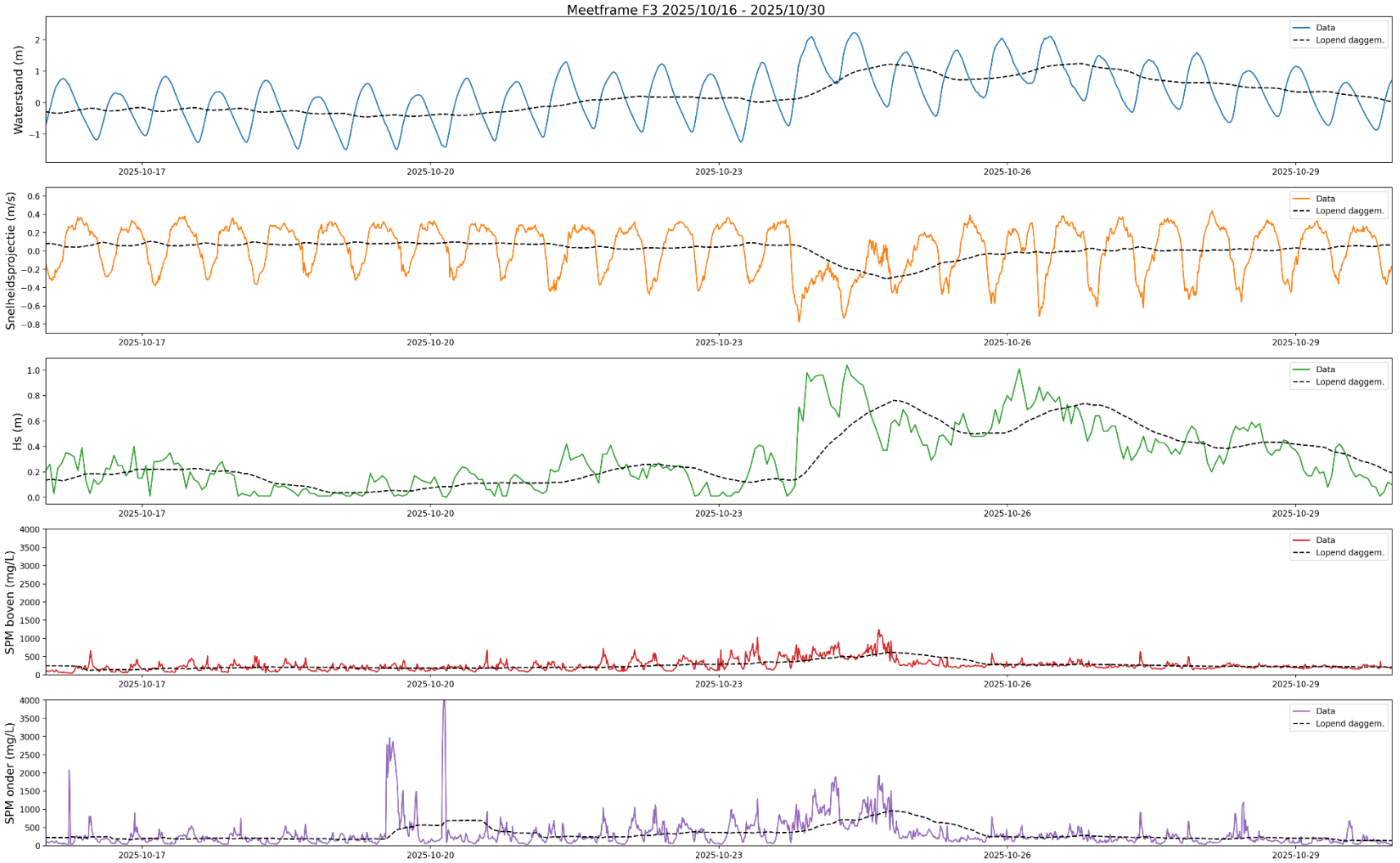
- Er is een duidelijke verhoging van waterstanden (stormopzet), golven en SPM tussen 4-7 oktober 2025 (Figuur 5-10), 23-28 oktober 2025 (Figuur 5-11) en 24-27 maart 2026 (Figuur 5-12). Deze verhogingen komen overeen met momenten van harde wind (7 Bft. of hoger) uit het Zuidwesten of Westen en zijn bij alle meetframes terug te zien.
- Ook bij krachtige wind (6 Bft.) kunnen golven en SPM in korte tijd snel toenemen, zoals op 22 juni 2025 (Figuur 5-9). Hierbij is ook een lichte waterstandsopzet te zien. Voor het meetframe in de Blauwe Slenk is dit moment ook terug te zien (Figuur B-12); voor de meetframes in het Kimstergat en Boontjes Zuid is voor dit moment geen goede SPM-data beschikbaar.
- Na deze momenten met krachtige tot harde wind nemen de waterstanden en golven vrij snel af naar dagelijkse waarden. De SPM-waarden blijven echter fluctuaties vertonen die groter zijn dan voorafgaand aan deze momenten, overeenkomstig met observaties bij de meetpaal bij Holwerd (Bi et al., 2024). Sediment dat recent op de bodem terecht is gekomen heeft waarschijnlijk nog onvoldoende sterkte ontwikkeld om bestand te zijn tegen erosie/resuspensie door (piek) stroomsnelheden of (kleinere) golven.
- De eventuele samenhang van golven en SPM met sedimentatie in de vaargeul is niet direct gemeten en kan alleen indirect worden afgeleid uit de maandelijkse bodempeilingen. Zo kan worden vastgesteld dat in juni 2025 en oktober 2025 (hierboven genoemde maanden waarin duidelijke samenhang aanwezig was tussen golven en SPM) relatief veel sedimentatie in de vaargeul plaatsvond (zie Figuur 4-11). In maart 2026 vond echter netto resuspensie plaats in de vaargeul.



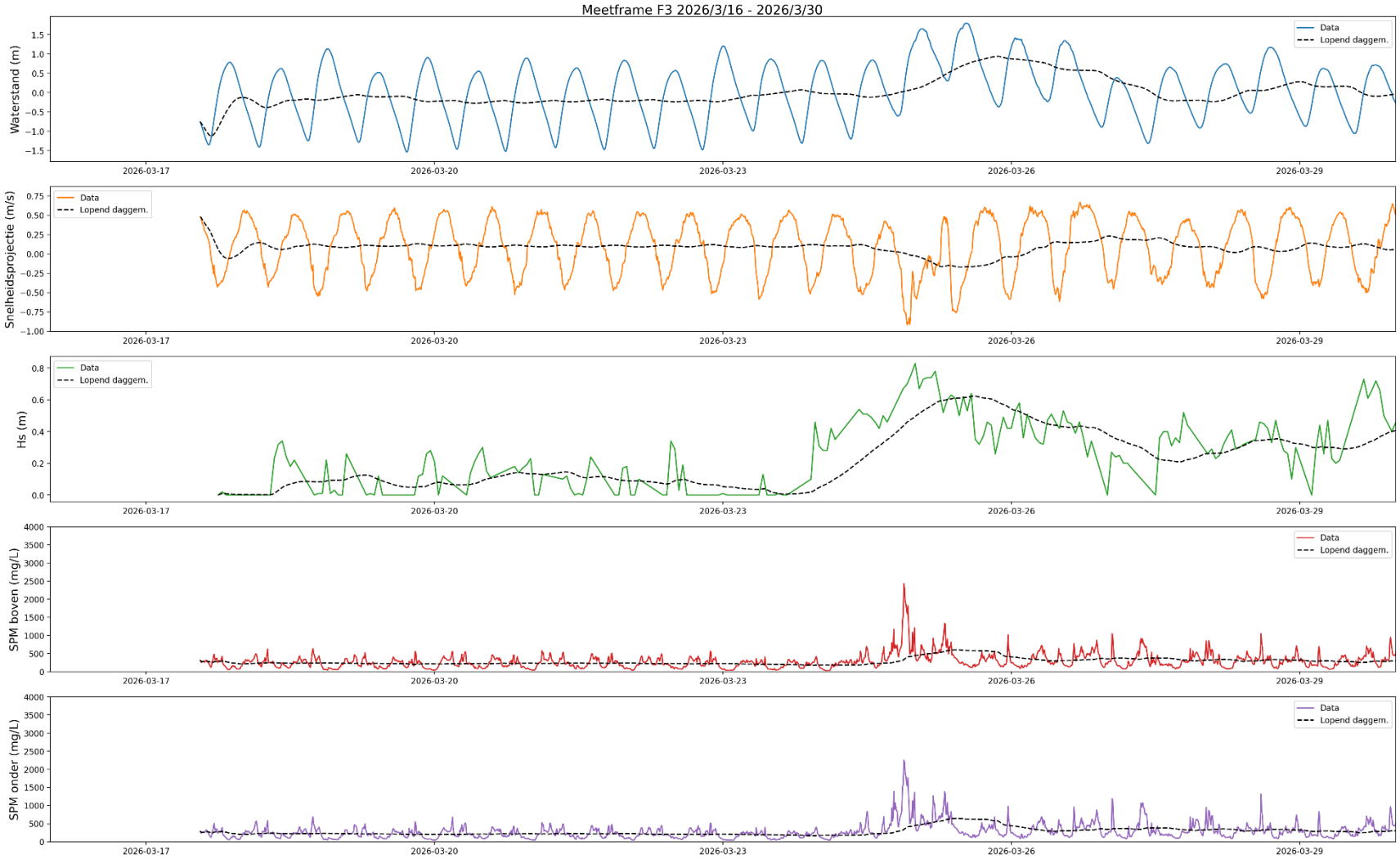
Figuur 5-9: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord (F3) tussen 16 juni en 30 juni 2025 (T1-meetperiode). Merk op dat er op de bovenste OBS geen SPM-data beschikbaar was vanaf 20 juni 2025, zoals ook te zien in Figuur 5-5 (rechts).



Figuur 5-10: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord (F3) tussen 1 en 15 oktober 2025 (T2-meetperiode).

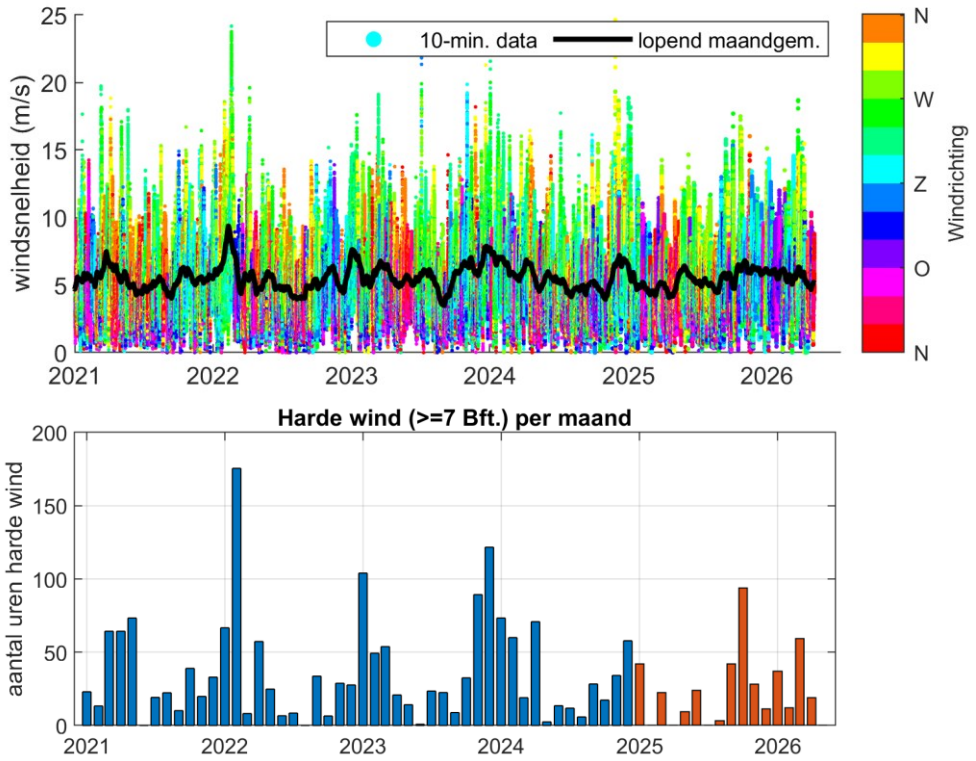


Figuur 5-11: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord (F3) tussen 15 en 30 oktober 2025 (T2-meetperiode).



Figuur 5-12: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord (F3) tussen 16 en 30 maart 2026 (T3-meetperiode).

Om te duiden welke rol meteorologische condities mogelijk gespeeld hebben in de sedimentdynamiek (zowel SPM als sedimentatie) tijdens de pilot wordt hier gekeken hoe de windcondities tijdens de pilot zich verhouden tot de windcondities in de jaren 2021-2024. Figuur 5-13 toont de gemeten windcondities in Stavoren. De maandgemiddelde windsnelheid (zwarte lijn in bovenste paneel) vertoont op het eerste gezicht geen uitzonderlijke waarden. Het aantal uren met harde wind (tenminste windkracht 7 Bft.) lag in 2025 onder het gemiddelde, zoals blijkt uit het onderste paneel van Figuur 5-13. In 2025 was dit slechts 278 uur ten opzichte van een gemiddelde van ongeveer 408 uur per jaar in de periode 2021-2025. Wel was er in oktober 2025 relatief veel harde wind. Dit is echter niet terug te zien in verhoogde SPM-waardes voor de T2-meting op de meetframes (Tabel 5-4, Tabel 5-5 en Figuur 5-7).



Figuur 5-13: Gemeten in Stavoren in de jaren 2021-2026 met in het bovenste paneel de 10 minutendata van windsnelheid (waarde) en -richting (kleur). De zwarte lijn toont de lopende maandgemiddelde windsnelheid. In het onderste paneel wordt het aantal uren harde wind (windkracht van 7 Bft. of meer) per maand getoond.

5.2.4 Residuele stroming en sedimenttransporten

Voor de data van de meetframes is de residuele stroming is bepaald door alle bruto getijvolumes te sommeren tot een netto (residueel) getijdebiet. De residuele sedimenttransporten zijn bepaald door alle bruto sedimenttransporten (stroomsnelheid in langsrichting van de geul vermenigvuldigd met sedimentconcentratie ter hoogte van de OBS-sensors) te sommeren tot een netto sedimenttransport. Opmerking hierbij is dat hierbij enkel is gekeken naar de sedimenttransporten op de hoogte van de stromings- en troebelheidssensoren, dus niet over de gehele verticaal. Aangezien de troebelheid over het algemeen het hoogst is onderin de waterkolom, is de verwachting dat het grootste deel van het sedimenttransport hiermee wordt vertegenwoordigd en dit een goede weerspiegeling geeft van de residuele transporten over de gehele verticaal.

Net als in de T0-meting hebben de residuele stroming en het residuele sedimenttransport over het algemeen voor alle meetperiodes en op alle meetlocaties dezelfde richting. Voor de

Blauwe Slenk is dat telkens de vloedrichting (Figuur B-40). Voor het Kimstergat meestal de vloedrichting, behalve tijdens de T1-meting in het voorjaar van 2025 (Figuur B-41). Voor de Boontjes Noord zijn de residuele stroming en het residuele sedimenttransport beide in ebrichting (Figuur 5-15). Bij Boontjes Zuid fluctueert de richting per meetperiode met beide in vloedrichting voor de T0- en T1-meting en beide in ebrichting tijdens de T3-meting (Figuur 5-15). Voor de T2-meting is het resultaat moeilijker te interpreteren, aangezien de residuele stroming ongeveer in balans lijkt (eindigt ongeveer op netto 0 na een sprong van positief naar negatief midden november 2025) en het residuele sedimenttransport op de bovenste OBS-sensor licht positief was en op de onderste OBS-sensor licht negatief.

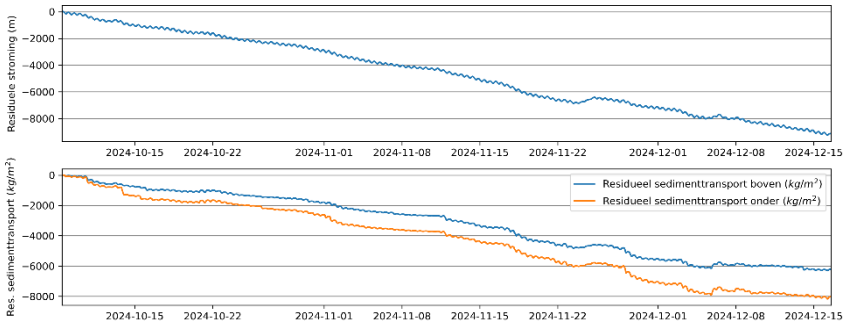
De residuele stroming en sedimenttransporten variëren ook binnen de meetperiodes (d.w.z. periodes waarbinnen de stroming of het sedimenttransport netto omgekeerd is). Dat geldt bijvoorbeeld bij Boontjes Noord voor de stroming tijdens de T1-meting en voor het sediment transport tijdens de T2-meting (Figuur 5-14).

De ruimtelijke patronen worden geïllustreerd in Figuur 5-16, waarin SPM-waardes voor de onderste OBS-sensor worden getoond ten opzichte van de gemeten snelheidsvectoren bij de meetframes voor de gehele meetperiode (zie voor vergelijkbare figuren met de SPM-waardes van de bovenste OBS-sensor Figuur B-1 en Figuur B-2). Hierbij valt op dat bij Boontjes Zuid zowel de stroming als het sedimenttransport vloeddominant was tijdens de T0-meting, maar dat dit minder nadrukkelijk het geval is in de vervolgmetingen. Tijdens de T2- en T3-metingen is de stroming bij Boontjes Zuid veel minder nadrukkelijk vloeddominant en treden hogere SPM-waardes op bij ebstroming. Mogelijk heeft de morfologische ontwikkeling van de zuidelijke geul of de verlegging van de vaargeul (die in de zomer van 2025, tussen T1- en T2-meting heeft plaatsgevonden) hier een rol in gespeeld.

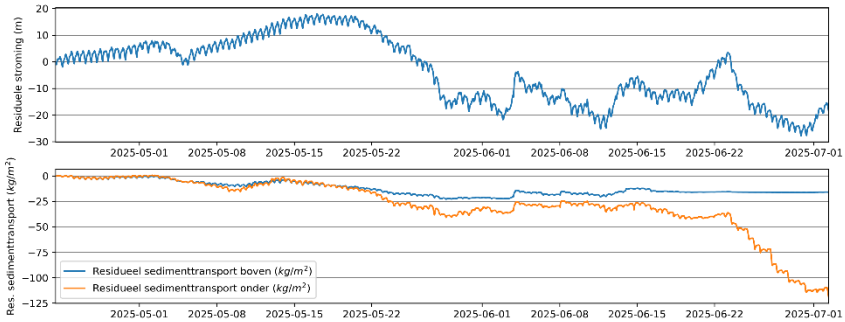
Bij Boontjes Noord zijn SPM-pieken gelijker verdeeld over de getijfases. In de Blauwe Slenk valt vooral op dat de SPM-waardes sterk verschillen tussen de meetperiodes, waarbij met name de najaarsmeting van 2025 hoge SPM-waardes liet zien (alhoewel de SPM-metingen hier zoals eerder beschreven in verschillende meetperiodes vroegtijdig eindigden). In het Kimstergat wordt het beeld sterk vertekend door de afgekapte SPM-waardes, waardoor niet zichtbaar is voor welke getijfase de hoogste SPM-waardes optreden.

Dit resulteert in het volgende beeld: Er zijn meer eenduidige stromingspatronen en netto sedimenttransport in de Blauwe Slenk en het Kimstergat, namelijk netto in vloedrichting. En er is een complexer stromingspatroon en sedimenttransport bij Boontjes Noord met meer fluctuaties binnen de meetperiodes, maar over de gehele meetperiode wel beide consistent in ebrichting. Bij Boontjes Zuid lijkt een verandering te hebben plaatsgevonden van sterke vloeddominantie met netto sedimenttransport in vloedrichting in het najaar van 2024 en voorjaar van 2025 naar een meer gebalanceerde (najaar 2025) residuele stroming en sediment transport of zelfs beide netto in ebrichting (voorjaar 2026).

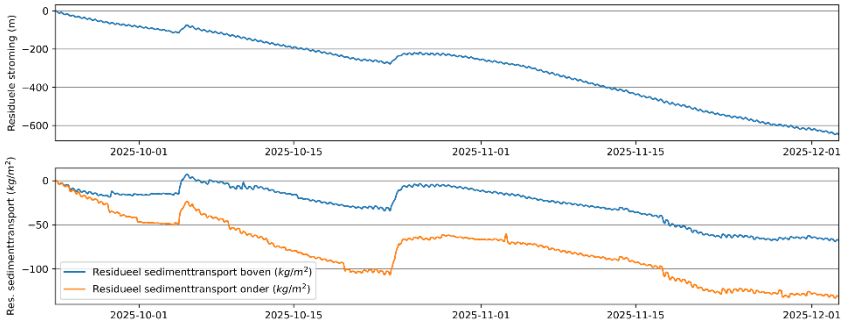
T0 - F3 – Boontjes Noord



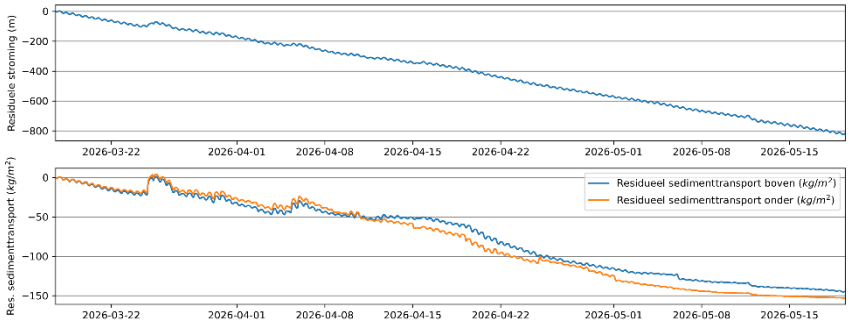
T1 - F3 – Boontjes Noord



T2 - F3 – Boontjes Noord

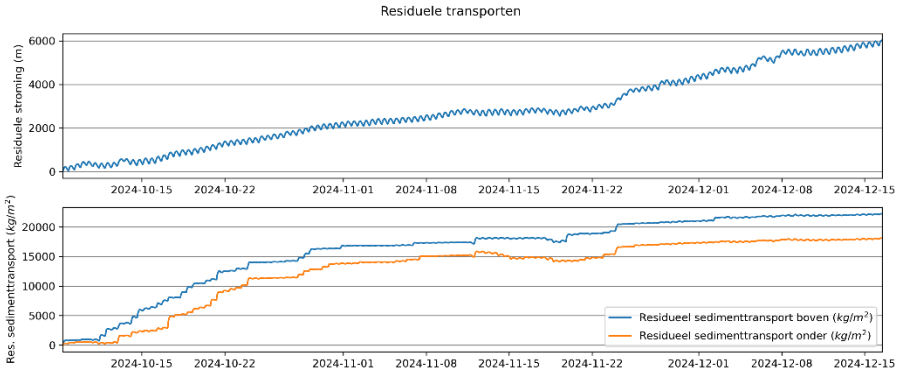


T3 - F3 – Boontjes Noord

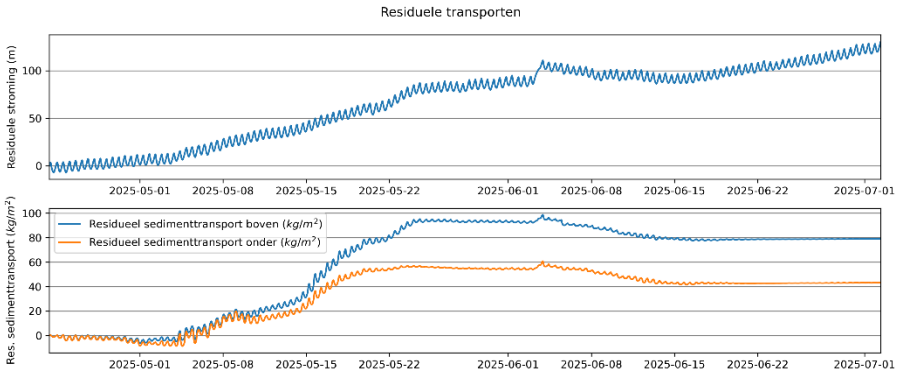


Figuur 5-14: Residuele transporten bij meetframe Boontjes Noord (F3) tijdens de T0-, T1-, T2- en T3-metingen (resp. najaar 2024, voorjaar 2025, najaar 2025 en voorjaar 2026). Per meting is het bovenste paneel steeds het residuele debiet (water), het onderste paneel het residuele sedimenttransport, waarbij de vloedrichting is gedefinieerd als positieve waarde.

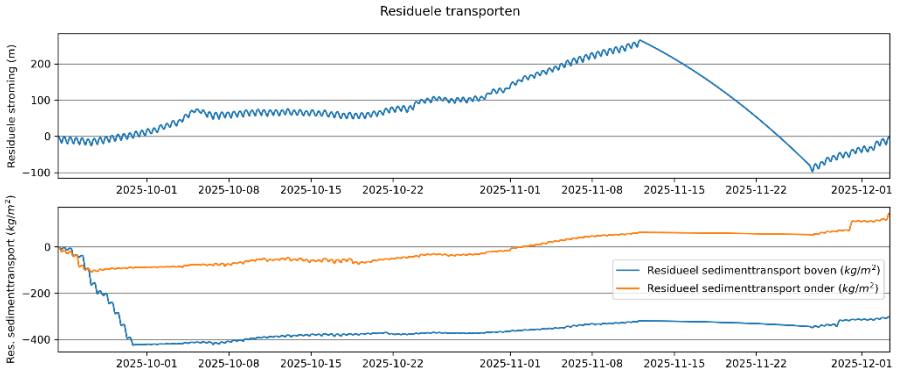
T0 - F4 – Boontjes Zuid



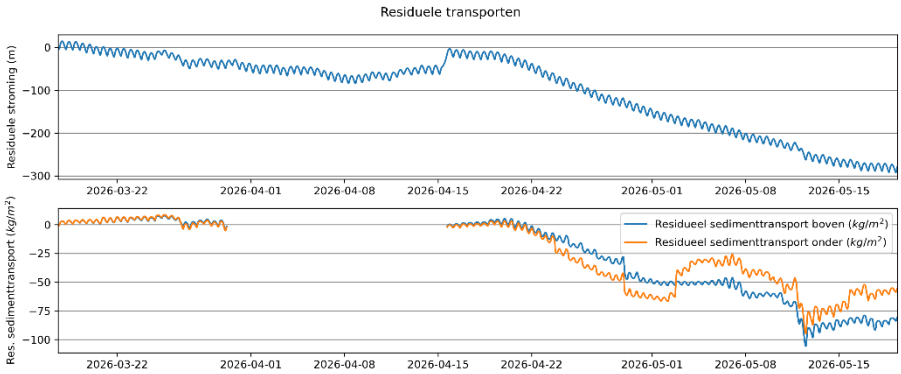
T1 - F4 – Boontjes Zuid



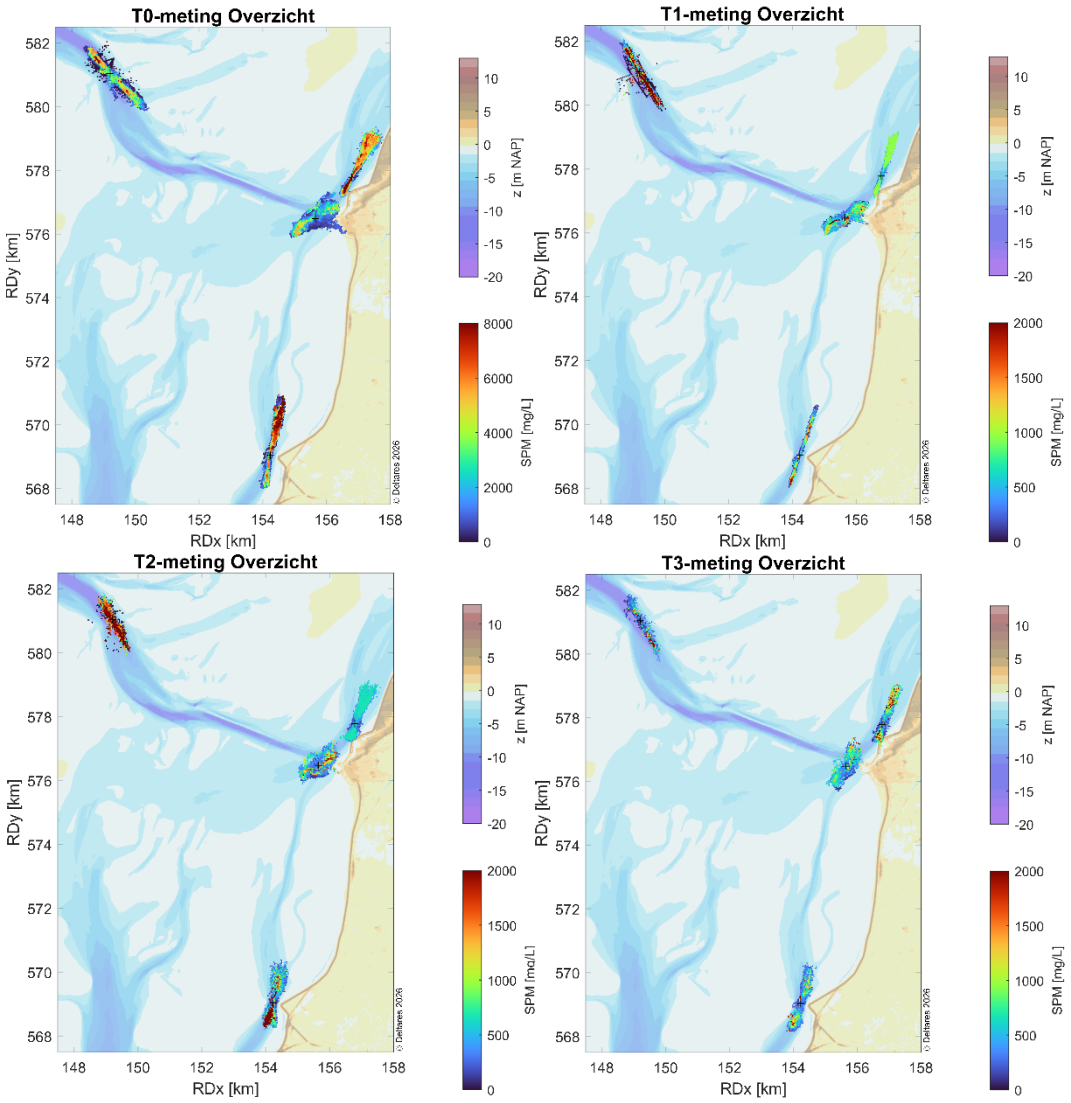
T2 - F4 – Boontjes Zuid



T3 - F4 – Boontjes Zuid



Figuur 5-15: Residuele transporten bij meetframe Boontjes Zuid (F4) tijdens de T0-, T1-, T2- en T3-metingen (resp. najaar 2024, voorjaar 2025, najaar 2025 en voorjaar 2026). Per meting is het bovenste paneel steeds het residuele debiet (water), het onderste paneel het residuele sedimenttransport, waarbij de vloedrichting is gedefinieerd als positieve waarde.



Figuur 5-16: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op de vier meetlocaties voor meetperiodes najaar 2024 (linksboven), voorjaar 2025 (rechtsboven), najaar 2025 (linksonder) en voorjaar 2026 (rechtsonder). De meetlocaties zijn weergeven met een +. Schaal stroomsnelheden: 1 m/s : 1 km op de achtergrondkaart. De kleur toont de gemeten SPM-waardes voor de onderste OBS-sensor, waarbij de hoogste waardes (rode kleuren) bovenop zijn geplot.

5.3 Resultaten 13-uursmetingen van stroming en SPM

Figuren van varende metingen tijdens piek vloed- en piek ebstroming zijn per doorsnede naast elkaar gezet in de bijlage (Figuur C-1 t/m Figuur C-10). Voor elk meetmoment zijn hierin de gemeten stroomsnelheid in de richting van de geul, de stroomsnelheid in de dwarsrichting en de sedimentconcentraties in mg/L.

Voor de varende metingen zijn de getijvolumes en bruto sedimenttransporten door de nabewerking van Rijkswaterstaat-CIV bepaald voor de 13-uur durende meetperiodes (zie waardes Tabel 5-7 met dikgedrukt de netto richting):

- Voor de meetraai in het Kimstergat wisselde de richting van de residuele stroming tussen de vijf meetmomenten: in de vloedrichting bij springtij (T0, T2 en T3) en in de ebrichting voor doodtij (T0) en overgangsfase springtij-doodtij (T1). Het sedimenttransport bleek netto in de vloedrichting als de stroming dat ook is, maar was ongeveer in balans wanneer de residuele stroming in ebrichting was (doodtij T0 en T1).

- Ook voor de meetraai Pollendam – Boontjes noord wisselde de richting van de residuele stroming tussen de vijf meetmomenten: in de ebrichting voor T0 (springtij en doodtij) en T3 en in de vloedrichting voor T1 en T2. De richting van het netto sedimenttransport was alleen tijdens springtij T0 en T3 in vloedrichting en voor de overige meetmomenten in ebrichting. Tijdens T0 (springtij), T1, T2 en T3 waren de residuele stroming en het netto sedimenttransport dus in tegengestelde richting. De vloedgerichte sedimenttransporten op 17 oktober 2024 en 1 april 2026 vormen overigens uitzonderingen met oog op de gehele T0- en T3-meetperiodes. De eerder geanalyseerde residuele sedimenttransporten lieten zien deze vrijwel de hele T0- en T3-meetperiodes in ebrichting was (zie bovenste en onderste paneel van Figuur 5-14).
- Voor de meetraai Boontjes midden was de residuele stroming tweemaal in vloedrichting (T1 en T2), tweemaal in ebrichting (doodtij T0 en T3) en eenmaal ongeveer in balans (springtij T0). Het netto sedimenttransport was ook tweemaal in vloedrichting (springtij T0 en T3), tweemaal in ebrichting (doodtij T0 en T2) en eenmaal ongeveer in balans (T1). Tijdens T1, T2 en T3 waren de residuele stroming en het netto sedimenttransport dus in tegengestelde richting.
- Voor de meetraai Boontjes zuid was de residuele stroming alleen tijdens de T1-meting in ebrichting en voor de andere meetmomenten ongeveer in balans. Het netto sedimenttransport was tijdens de T0-meting bij springtij en tijdens de T3-meting in vloedrichting, tijdens de T2-meting in ebrichting en tweemaal ongeveer in balans (T0 doodtij en T1).

In Tabel 5-7 zijn als mogelijk verklarende factoren opgenomen:

(1) de fasering ten opzichte van springtij en doodtij;
(2) de windsnelheid en -richting; en
(3) het waterstandsverhang tussen Kornwerderzand en Harlingen (toegevoegd t.o.v. de analyse van de T0-meting).

Voor de windcondities valt op dat tijdens de meeste 13-uursmetingen sprake was van lage windsnelheden (zwakke wind van 2-3 Bft), behalve tijdens de T3-meting op raaien Boontjes Midden en Boontjes Zuid (vrij krachtige wind van max. 5 Bft.). Windkracht 2-3 is atypisch laag voor dit gebied en betekent vermoedelijk dat de invloed van getij op de netto transporten in deze resultaten relatief groot is en de invloed van wind en golven via resuspensie beperkt. Als gevolg van deze beperkte invloed van wind en golven blijken de fasering t.o.v. springtij-doodtij en het waterstandsverhang tussen Kornwerderzand en Harlingen voor de drie meetraaien in de vaargeul Boontjes inderdaad sterk samen te hangen met de richting van de residuele stroming.

Bij een vergelijking van de verschillende meetperiodes per meetraai (zie alternatieve presentatie van de data in Tabel C-1) valt op dat de richting van residuele stroming en netto sedimenttransport zeer variabel is en tussen de meetmomenten kan verschillen. Sterker nog: op geen enkele meetraai is de richting consistent geweest tussen alle meetmomenten. De omvang en richting van netto transport binnen één 13-uursperiode is dus zeer gevoelig voor fluctuaties in bruto transport.

Door per meetmoment te kijken naar het ruimtelijke beeld over alle meetraaien (Tabel 5-7) is meer samenhang te zien:

- Tijdens de T0-meting was er bij springtij voor alle meetraaien netto sedimenttransport in vloedrichting. Bij doodtij was er voor alle meetraaien residuele stroming in ebrichting (overeenkomstig met het negatieve waterstandsverhang tussen Kornwerderzand en Harlingen).
- Tijdens de metingen in het voorjaar en najaar van 2025 (T1 en T2) was de residuele stroming op de meetraaien in de Boontjes (meetraaien R2, R3 en R4) steeds (licht) in vloedrichting.

- Tijdens de metingen in het najaar van 2025 (T2) was het netto sedimenttransport voor de meetraaien in de Boontjes in ebrichting. Opmerkelijk is dat de richting van het netto sedimenttransport in de Boontjes tegengesteld was aan de netto richting tijdens de T0-meting (vloedrichting), terwijl de omgevingscondities (springtij met positief verhang tussen Kornwerderzand en Harlingen) vergelijkbaar waren tussen beide meetperiodes.
- Tijdens de metingen in het voorjaar van 2026 (T3) was de residuele stroming voor de meetraaien in de Boontjes in ebrichting, maar het netto sedimenttransport in vloedrichting.

Tabel 5-7: Getijvolumes en sedimenttransporten van de varende metingen (afkomstig uit nabewerking door Rijkswaterstaat-CIV), geclusterd per meetmoment. De grootste waardes tijdens de 13-uursmeting zijn dikgedrukt, wat de netto richting aangeeft (blauwe achtergrond indien het verschil tussen vloed- en ebtransport significant is). Voor duiding van de resultaten worden ook de getijfase (springtij/ doodtij), het waterstandsverhang tussen Kornwerderzand en Harlingen en de windkracht en -richting getoond.

Meetraai	Datum	Getijfase	Verhang KWZ-Harlingen	Wind (Bft)	Getijvolumes		Sedimentfluxen	
					vloed (10^6 m³)	eb (10^6 m³)	vloed (10^6 kg)	eb (10^6 kg)
Kimstergat	17-10-24	Springtij	Positief	3 (Z)	**42,0**	30,0	**11,0**	4,8
Boontjes Nrd	17-10-24	Springtij	Positief	3 (Z)	26,0	**33,0**	**11,0**	5,6
Boontjes Mid	18-10-24	Springtij	Positief	2 (NNW)	**9,4**	9,0	**1,8**	1,0
Boontjes Zuid	18-10-24	Springtij	Positief	2 (NNW)	**43,0**	42,0	**6,9**	3,9
Kimstergat	24-10-24	Doodtij	Negatief	3 (ZO)	26,0	**38,0**	**4,5**	4,4
Boontjes Nrd	24-10-24	Doodtij	Negatief	3 (ZO)	15,0	**43,0**	3,8	**4,7**
Boontjes Mid	25-10-24	Doodtij	Negatief	2 (ZO)	7,3	**14,0**	1,0	**1,3**
Boontjes Zuid	25-10-24	Doodtij	Negatief	2 (ZO)	31,0	**46,0**	2,9	**3,2**
Kimstergat	12-05-25	Overgang	Positief	3 (O)	26,6	**35,1**	3,1	**5,0**
Boontjes Nrd	12-05-25	Overgang	Positief	3 (O)	**24,6**	19,7	3,1	**4,5**
Boontjes Mid	13-05-25	Overgang	Positief	3 (ONO)	**8,3**	7,3	**1,2**	1,1
Boontjes Zuid	13-05-25	Overgang	Positief	3 (ONO)	**36,9**	35,8	**4,8**	4,5
Kimstergat	07-10-25	Springtij	Positief	3 (ZW)	**40,8**	32,2	**9,0**	3,3
Boontjes Nrd	07-10-25	Springtij	Positief	3 (ZW)	**33,2**	26,4	3,0	**9,5**
Boontjes Mid	08-10-25	Springtij	Positief	3 (W)	**9,9**	9,1	0,7	**1,8**
Boontjes Zuid	08-10-25	Springtij	Positief	3 (W)	**40,0**	38,9	2,9	**7,0**
Kimstergat	01-04-26	Overgang	Positief	3 (Z)	**33,3**	27,7	**7,2**	3,6
Boontjes Nrd	01-04-26	Overgang	Positief	3 (Z)	18,4	**24,5**	**7,6**	3,7
Boontjes Mid	02-04-26	Overgang	Positief	5 (NNW)	7,5	**7,9**	**1,2**	0,8
Boontjes Zuid	02-04-26	Overgang	Positief	5 (NNW)	41,2	**41,9**	**7,5**	5,4

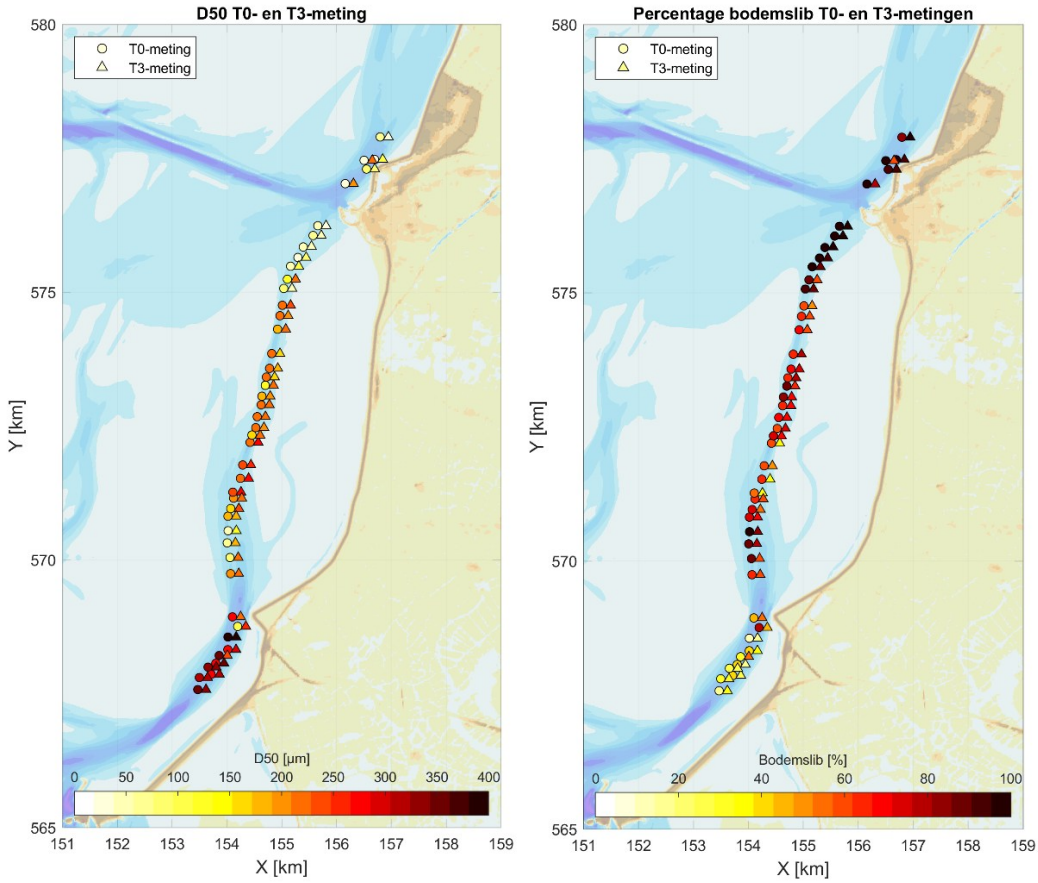
5.4 Resultaten bodemsamenstelling

Tijdens de bodembemonstering zijn op 45 locaties verspreid in de Boontjes en het Kimstergat bodemmonsters verzameld. De bemonstering is uitgevoerd tijdens de T0-meting op 15 januari 2025 en tijdens de T3-meting op 31 maart en 1 april 2026 door subsamples te nemen van boxcore monsters die in het kader van een ander project werden verzameld. Voor elk van de bodemmonsters zijn als karakteristieke waarden van de korrelverdeling de D10, D50 en D90 beschikbaar, en het slibgehalte (d.w.z., de massafractie kleiner dan 63 µm).

Uit de resultaten voor de T0-meting werd de veronderstelde gradiënt in bodemsamenstelling bevestigd, met relatief grof (zandig) materiaal op het zuidelijke uiteinde van de vaarweg Boontjes en relatief fijn (slibrijk) materiaal op het noordelijke uiteinde van de vaarweg Boontjes en in het Kimstergat. Ook kwam naar voren dat er een slibrijk gedeelte aanwezig was bij de overgang van de natuurlijke geul naar de onderhouden vaarweg bij Zuricher Oord polder (Y=570 km).

Uit een vergelijking van de T3-meting met de T0-meting komt naar voren dat de bodemsamenstelling vrij stabiel is over deze periode. Slechts op een beperkt aantal punten is een kleine verandering opgetreden. De mediane korrelgrootte is toegenomen en het slibpercentage afgenomen op twee locaties in het Kimstergat, in de bocht in de noordelijke Boontjes (Y=575 km) en op de overgang van de natuurlijke geul naar de onderhouden vaarweg in de zuidelijke Boontjes (Y=569-572 km). Daarnaast is op één locatie in het zuidelijke uiteinde van de Boontjes (Y=568 km) het slibpercentage toegenomen en de mediane korrelgrootte afgenomen.

Verschillen tussen deze meetmomenten lijken vooral beïnvloed te zijn door de verlegging van het vaargeultracé in de zuidelijke Boontjes en mogelijk ook door seizoensvariaties (januari t.o.v. maart/april). Alleen het afgenomen slibgehalte in de bocht in de noordelijke Boontjes is mogelijk veroorzaakt door de pilot met aangepaste streefdiepte. Het zou goed zijn om de bodemsamenstelling en veranderingen daarin nog nader te beschouwen in de context van de aanwezige geologie en de eventuele correlatie met geulstabiliteit en baggerwerkzaamheden.



Figuur 5-17: Resultaten van bodembemonstering in vaarweg Boontjes en het Kimstergat voor de T0- en T3-metingen (resp. ronde en driehoekige datapunten). Het paneel links toont de mediane korrelgrootte (D50) en het paneel rechts toont de slibfractie (massafractie < 63 µm). (N.B. de resultaten voor de T3-meting zijn iets verschoven op de kaart weergegeven om beide resultaten naast elkaar te laten zien.)

5.5 Samenvatting voorlopige bevindingen meetcampagne

Met de meetcampagne is heel veel data verzameld, die nog niet volledig zijn geanalyseerd. Onder andere dichtheidsinvloeden (zoutgehalte, temperatuur en het spuidebiet bij Kornwerderzand) zijn nog niet meegenomen in dit rapport.

Waar de kalibratie van de troebelheidssensors voor de T0-meting resulteerde in een relatief hoge waarde van 3,5 (mg/L)/NTU, geeft de kalibratie voor de vervolgmetingen realistischere waardes voor de conversiefactor tussen de 2,0 en 2,5 (mg/L)/NTU. Dit sterkt het vertrouwen in de omgerekende SPM-waardes voor de vervolgmetingen en geeft reden voor een correctie van de omgerekende SPM-waardes van de T0-meting. Voor de verdere interpretatie en vergelijking met de andere meetperiodes is de T0-meting daarom gecorrigeerd met een factor 0,6486.

Uit de analyse van gemeten waterstanden en stroomsnelheden komt het volgende beeld naar voren:

- Het algemene beeld van stromingspatronen uit de T0-meting blijft overeind: de getijvoortplanting in Harlingen komt deels uit het Marsdiep en deels uit het Vlie (overeenkomstig met hypothese 1a). De ebstroming bij Boontjes Noord is afkomstig uit het Vlie (overeenkomstig met hypothese 1b).
- De stroomsnelheden bij Boontjes Zuid waren in de T2- en T3-meting minder vloeddominant zijn dan in de T0- en T1-meting. Deze bevinding weerspreekt de eerder geconstateerde afname van vloedstroming en vloeddominantie over de

langsrichting van de vaargeul Boontjes (hypothese 1c), mogelijk als gevolg van de geulverlegging. Met afname van vloeddominantie is ook een aandrijvende kracht voor sedimentatie afgenomen.
- De richting van gemeten stroming is iets gedraaid voor Blauwe Slenk en Boontjes Noord. Vermoedelijk betreft dit geen verandering in systeem, maar een net andere locatie van het meetframe (of invloed van wind).

Aan de gemeten troebelheid valt vooral op dat er voor een aantal momenten een duidelijke samenhang aanwezig is op tijdschaal van uren tot dagen met windsnelheid en golfhoogte voor krachtige tot harde wind uit het zuidwesten, westen en noordwesten (conform hypothese 2a). In de gemiddelde SPM-waardes per meetperiode treedt echter géén duidelijk seizoenseffect op: gemiddelde SPM-waardes in het najaar zijn niet consistent hoger dan in het voorjaar. Hierbij is geul-plaatuitwisseling (hypothese 2b) niet in detail bestudeerd, omdat de meetcampagne daar niet specifiek op ingericht is. Een vergelijking van wind, golven en SPM met de netto sedimentatie in de vaargeul uit maandelijkse bodempeilingen kan hier meer inzicht in geven.

De resultaten van de residuele stroming en sedimenttransporten van de meetframes suggereren dat stromingspatronen en netto sedimenttransport bij Boontjes Zuid minder duidelijk vloeddominant zijn dan op basis van de T0-meting werd gedacht. In de vervolgmetingen vanaf de zomer van 2025 waren residuele stroming en netto sedimenttransport meer gebalanceerd (najaar 2025) of zelfs ebdominant (voorjaar 2026). Zoals hierboven benoemd waren ook de stroomsnelheden tijdens de vervolgmetingen minder vloeddominant. Mogelijk heeft deze verandering te maken met de verlegging van het vaargeultracé in de zuidelijke Boontjes. Dit wijkt dus af van hypotheses 3a en 3b en geeft reden om het beeld van stromingspatronen en sedimenttransport bij te stellen. Mogelijk biedt dit ook een (gedeeltelijke) verklaring voor de afgenomen sedimentatie in de geul. Op de andere meetlocaties is geen duidelijke verandering waargenomen (residuele stroming en sedimenttransport over de gemeten periodes in vloedrichting in de Blauwe Slenk en het Kimstergat en in de ebrichting bij Boontjes Noord).

De getijdebieten en bruto sedimenttransporten uit de varende 13-uursmetingen vertonen samenhang door per meetmoment te kijken naar het ruimtelijke beeld over alle meetraaien. Voor de meetraaien in de Boontjes (noord, midden en zuid) waren de residuele stroming en het netto sedimenttransport veelal per moment in dezelfde richting, waarbij die richting wel fluctueert tussen verschillende meetmomenten. De fasering ten opzichte van springtij en doodtij enerzijds, en het waterstandsverhang tussen Kornwerderzand en Harlingen anderzijds, lijken hierbij sterk samen te hangen met de richting van de residuele stroming. Door de beperkte windkracht tijdens de meeste 13-uursmetingen komt de invloed van windrichting op residuele transporten (hypothese 3c) mogelijk niet volledig tot uiting in deze resultaten.

De bodemsamenstelling is zoals verwacht vrij stabiel tussen de T0-meting en de T3-meting, met slechts enkele kleine veranderingen op een beperkt aantal punten. De opgetreden verschillen zijn mogelijk veroorzaakt door seizoensvariaties (januari t.o.v. maart/april) en door de verlegging van het vaargeultracé in de zuidelijke Boontjes. Alleen het afgenomen slibgehalte in de bocht in de noordelijke Boontjes is mogelijk veroorzaakt door de pilot met aangepaste streefdiepte.

Open vragen naar aanleiding van de analyses uit dit hoofdstuk:
- Hypothese 1:
    c) Is de verandering van stroomsnelheden en vloeddominantie bij Boontjes Zuid blijvend? Welke rol speelt de verlegging van het vaargeultracé hierin?
- Hypothese 2:

a) De gecombineerde invloed van windsnelheid en windrichting is onderbelicht gebleven en zou verder onderzocht kunnen worden om de invloed van wind en golven op SPM en sedimentatie beter te kunnen duiden.
b) Hoe belangrijk is geul-plaatuitwisseling voor sedimentatie in de vaargeul? (hypothese 2b) Bij gebrek aan gedetailleerde metingen in de dwarsrichting op de geul zou een vergelijking van wind, golven en SPM met de netto sedimentatie in de vaargeul uit maandelijkse bodempeilingen (Figuur 4-11) hier meer inzicht in kunnen geven. Dit proces wordt tevens in meer detail bestudeerd voor de omgeving van Holwerd a.d.h.v. veldmetingen in het NWO-project WadSed.

- Hypothese 3:
  a) Is de verandering van residuele stroming bij Boontjes Zuid blijvend? Welke rol speelt de verlegging van het vaargeultracé hierin?
  b) idem voor netto sedimenttransport. Wat is het effect van de veranderde stromingspatronen en sedimenttransporten op sedimentatie in de vaargeul?
  c) Hoe belangrijk is de invloed van de windrichting op residuele transporten? Suggestie: onderzoeken door in te zoomen op momenten met substantiële windinvloed voor ~oostenwind en ~westenwind.

Om deze vragen te beantwoorden zou het waardevol zijn om de data verder te analyseren gericht op de samenhang van diverse parameters met gemeten SPM om meer inzichten op te doen over sturende processen voor sedimentatie in de vaargeul Boontjes en de effectiviteit van de pilot verder te kunnen duiden. Prioriteit zou hierbij gegeven moeten worden aan het onderzoeken van de gecombineerde invloed van windsnelheid en -richting om de invloed van wind en golven op SPM en sedimentatie beter te kunnen duiden. Ook kan de invloed van de windrichting op residuele transporten interessant zijn om verder te onderzoeken, aangezien dit fenomeen met name op ondiepe plaatgebieden bekend is (Colosimo et al., 2020). Minder belangrijk is de invloed van zoetwaterafvoer en stratificatie op SPM, aangezien hiervan in de analyse van de T0-meting geen duidelijke invloed aanwezig leek. Tenslotte kunnen de inzichten uit de morfologische analyse en uit de metingen nog meer samengebracht worden om de specifieke condities te identificeren waarbij sedimentatie optreedt. Dit kan bijvoorbeeld door de tijdreeks met netto sedimentatie/erosie (Figuur 4-11) te vergelijken met de residuele transporten (Figuur 5-14 en Figuur 5-15).

6 Synthese: update van conceptueel systeembegrip vaarweg Boontjes

In Paragraaf 2.3 is het conceptueel systeembegrip van de vaarweg Boontjes bij aanvang van deze studie beschreven. Op basis daarvan zijn in deze studie verschillende gedetailleerde analyses gemaakt van baggergegevens (Hoofdstuk 3), morfologie (Hoofdstuk 4) en veldmetingen van o.a. stroming en sedimentconcentraties (Hoofdstuk 5). In dit hoofdstuk worden de bevindingen uit deze analyses zoveel mogelijk bij elkaar gebracht in een update van het conceptueel systeembegrip van de vaarweg Boontjes.

Morfologische ontwikkeling
Het bestaande beeld van de morfologische ontwikkeling van het gebied rond de vaargeul Boontjes blijft onveranderd: er vindt grootschalige sedimentatie (‘verlanding’) plaats, grotendeels ten gevolge van de afsluiting van de Zuiderzee. Daardoor zijn grote gedeelten subgetijdengebied opgehoogd naar intergetijdengebied en nemen het kombergingsvolume en het debiet door de geulen, waardoor het evenwichtsprofiel van de geulen afneemt.

In de Boontjes worden drie morfologische gebieden onderscheiden, namelijk de noordelijke Boontjes, de zuidelijke Boontjes en de bochten daartussenin (Boontjes midden):

- In de noordelijke Boontjes lag voorheen de drempel die in 2015-2016 verwijderd is. Hier komt de vloedstroming vanuit het Marsdiep en de ebstroming vanuit het Kimstergat. Er vindt veel slibsedimentatie plaats en hier lag in de periode 2017-2024 het zwaartepunt van de onderhoudsbaggerwerkzaamheden.
- In de zuidelijke Boontjes is de bodem zandiger. Uit vaklodingen en bodempeilingen blijkt dat de natuurlijke geul vanuit het Marsdiep rond de zuidelijke Boontjes licht noordwaarts uitbreidt en verdiept. Sinds oktober 2025 wordt de nieuwe vloedschaar (ten oosten van de vroegere vaarweg) als vaarweg gehanteerd. In de toekomst gaat de geul daarbij lokaal naar verwachting steeds meer tegen de harde structuren van de dijk en kribben bij Kimswerd aanliggen, waardoor de geul hier lokaal verder zal verdiepen.
- Tussen de noordelijke en zuidelijke Boontjes heeft de geul de neiging te meanderen, waardoor de geul zijwaarts verschuift ten opzichte van het baggervak en lokale ‘hotspots’ van onderhoudsbaggerwerkzaamheden ontstaan. Daarop wordt ingespeeld door de vaargeul mee te verschuiven indien de natuurlijke geul voldoende breedte heeft.

Ook de inzichten in de gevolgen van de drempelverwijdering zijn ongewijzigd. In combinatie met de hoger gelegen platen, heeft de drempelverwijdering geleid tot een flinke toename van het baggerbezwaar voor vaargeulonderhoud als gevolg van afname van gemiddelde stroomsnelheden, toegenomen sedimentaanvoer naar de vaargeul en mogelijk ook afname van golfgedreven resuspensie.

Waterbeweging, wind en golven
De inzichten in de waterbeweging en het wantij zijn grotendeels ongewijzigd. Oorspronkelijk was er geen wantij aanwezig tussen het Marsdiep en het Vlie, aangezien de kombergingsgebieden samenkwamen in de Zuiderzee. Het drempelgebied van de Boontjes ligt op de huidige overgang tussen de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie, waardoor lokale sedimentatie kan plaatsvinden. Het gebied is atypisch voor een wantij: de omgeving van de Boontjes is dieper dan andere wantijen en er lopen geulen over het wantij, waardoor er veel uitwisseling tussen het Marsdiep en het Vlie plaatsvindt. Uit de meetcampagnes blijkt

dat de vloedstroming door de gehele vaargeul meestal noordwaarts gericht was. De getijvulling van de Boontjes is dus voornamelijk vanuit het Marsdiep afkomstig. De getijvulling van het Kimstergat vindt over de afgelopen decennia steeds meer plaats vanuit het Vlie via de Geul langs de Pollendam en daarnaast via het Molenrak en Boontjes. Als gevolg hiervan lijkt het Kimstergat zich morfologisch aan te passen door zich meer te oriënteren op de Geul langs de Pollendam. Uit de T0-meting bleek echter dat de getijvulling van het Kimstergat ook gedeeltelijk afkomstig is uit de Boontjes en dat ook de ebstroming zich verdeelt over de Geul langs Pollendam, het Molenrak en de Boontjes. De mate van uitwisseling tussen Boontjes en Kimstergat lijkt sterk afhankelijk van getij- en windcondities.

De inzichten m.b.t. wind en golven zijn grotendeels ongewijzigd. Er zijn aanvullende aanwijzingen gevonden die het bestaande beeld ondersteunen. Windgolven spelen een rol via resuspensie van sediment op de platen, vooral bij wind uit zuidwesten, westen en noordwesten. Oostenwind speelt een beperkte rol, aangezien de Boontjes en omringende platen zich dan in de luwte van het vasteland bevinden. Uit de troebelheidsmetingen was voor een aantal momenten met krachtige tot harde wind uit het zuidwesten, westen en noordwesten een duidelijke samenhang aanwezig met wind en golven op tijdschaal van uren tot dagen (conform hypothese 2a, zie Paragraaf 2.4). De verwachting is dat het sediment, na resuspensie door golven, in de geul terechtkomt door golfgedreven transport. Deze geul-plaatuitwisseling (hypothese 2b) is niet in detail bestudeerd in deze studie, omdat de meetcampagne daar niet specifiek op ingericht is. Een vergelijking van wind, golven en SPM met de netto sedimentatie in de vaargeul uit maandelijkse bodempeilingen kan hier meer inzicht in geven. Daarnaast zouden de combinatie van de gemeten dwarsstroming en sedimentconcentraties uit de 13-uursmetingen inzicht kunnen geven in de omvang van de flux in dwarsrichting. Verder kan windgedreven stroming van invloed zijn op de richting van het (netto) sedimenttransport, vooral bij wind uit het zuiden of noorden (langsrichting van de vaargeul). Door de beperkte windkracht tijdens de meeste 13-uursmetingen kwam de invloed van windrichting op residuele stroming en netto sedimenttransport (hypothese 3c) mogelijk niet volledig tot uiting in deze resultaten.

De onderwerpen gravitatiecirculatie en retourstroming zijn niet nader onderzocht in deze studie. Zie voor het meest recente beeld hierover Paragraaf 2.3.

Sediment in de waterkolom en op de bodem
Ondanks effecten van wind en golven op SPM op tijdschaal van uren tot dagen, waren gemiddelde SPM-waardes in het najaar niet consistent hoger dan in het voorjaar. In de SPM-metingen is daarmee géén duidelijk seizoenseffect teruggevonden. Tijdens de metingen waren gemeten SPM-gehaltes in het Kimstergat bij vloed aanmerkelijk hoger dan bij eb. In combinatie met vloeddominante stroomsnelheden duidt dit op netto landwaarts sedimenttransport (of sedimentimport). In de zuidelijke Boontjes gold dit ook voor de T0-meting, maar minder tot niet voor de latere metingen sinds de verlegging van de vaargeul. Uit de analyse van de T0-meting bleek een sterke afname van stroomsnelheden en vloeddominantie tussen de zuidelijke Boontjes en de noordelijke Boontjes. Hierdoor nam ook de transportcapaciteit door getijstroming af in noordelijke richting en ontstond sedimentatie in de vaargeul. Dit werd bevestigd uit de residuele stromingspatronen en netto sedimenttransport. Uit vervolgmetingen bleek een diffuser beeld bij de zuidelijke Boontjes, waarbij stroomsnelheden minder nadrukkelijk vloeddominant waren en residuele transporten in ebrichting. Daardoor is een belangrijke aandrijvende kracht voor sedimentatie in de vaargeul afgezwakt.

Het bodemslibgehalte sinds de drempelverwijdering (in de periode voorafgaand aan de verondieping) toegenomen als gevolg van de grootschalige morfologische ontwikkelingen en de onderhoudsbaggerwerkzaamheden. Tijdens de meetcampagne zijn bemonsteringen van bodemsediment uitgevoerd in de vaargeul Boontjes en in het Kimstergat in het najaar van 2024 en in het voorjaar van 2026. Uit de monsters werden mediane korrelgroottes en bodemslibpercentages bepaald. Tussen deze meetmomenten was de bodemsamenstelling vrij stabiel met alleen kleine verschuivingen in de knik van de vaargeul in de noordelijke Boontjes en in de zuidelijke Boontjes waar de vaargeul verlegd is. In recente jaren zijn geen aanwijzingen meer voor aanwezigheid van fluid mud in de vaargeul (dat eerder in de zomers van 2020 en 2021 werd aangetroffen).

Effectiviteit pilot & vaargeuldimensies
Na aanpassing van de streefdiepte is het baggerbezwaar sterk gereduceerd tot 7.800 m³ in 2025. Als de oude streefdiepte van NAP-3,8 m en onderhoudsdiepte van NAP-4,3 m gehanteerd zouden worden, was het baggerbezwaar weer in dezelfde orde grootte geweest als in eerdere jaren. Daaruit blijkt ook dat veel sedimentatie plaatsvindt tussen de streefdiepte en de onderhoudsdiepte, wat ervoor pleit om niet onnodig of vroegtijdig een ‘overdiepte’ aan te brengen. Daarmee wordt het baggerbezwaar namelijk onnodig verhoogd. Met de nieuwe streefdiepte van NAP-3,3 m is alleen op enkele plekken in de noordelijke Boontjes en op een paar specifieke punten aan de rand van de vaargeul gebaggerd. Ter referentie is ook gekeken naar de baggercijfers voor andere vaargeulen in de (westelijke) Waddenzee. Aangezien deze nauwelijks afweken van het 5-jarig gemiddelde, is geen sprake van een grootschalig (Waddenzeebreed) patroon van lagere baggercijfers voor het kalenderjaar 2025. Op basis van het afgenomen baggerbezwaar, het ingeschatte fictieve baggerbezwaar bij de oude streefdiepte en de baggercijfers elders in de Waddenzee wordt geconcludeerd dat de aanpassing van de streefdiepte naar NAP-3,3 m en onderhoudsdiepte naar NAP-3,8 m een effectieve manier is om het baggerbezwaar op korte termijn sterk te reduceren. Daarmee wordt ook de ecologische invloed van het vaargeulonderhoud sterk verminderd.

Voor de toekomst is de verwachting bij het vasthouden aan de streefdiepte van NAP-3,8 m en onderhoudsdiepte van NAP-4,3 m (of een verdere verdieping) dat het baggerbezwaar verder toe zal nemen door verdere afname van het kombergingsvolume en geuldebiet en een verdere toename van sedimentaanvoer vanaf de platen naar de vaargeul. Wanneer de nieuwe streefdiepte van NAP-3,3 m en onderhoudsdiepte van NAP-3,8 m worden voortgezet zal onderhoudsbaggerwerk in de noordelijke Boontjes structureel nodig blijven. Maar voor de rest van de vaargeul duurt het nog aanzienlijk langer voordat dit weer nodig is of zal dit zelfs niet nodig zijn, omdat er geen (netto) sedimentatie plaatsvindt. Aangezien een ondiepere vaargeul dichter bij de natuurlijke evenwichtsdoorsnede van de Boontjes ligt, is bovendien de verwachting dat het baggerbezwaar substantieel lager zal blijven.

7 Conclusie

7.1 Bevindingen baggercijfers en morfologie

De pilot verondieping vaarweg Boontjes heeft als doel om het onderhoudsbaggervolume van de Boontjes omlaag te brengen en de ecologische impact van het baggeren en verspreiden te verminderen. In deze paragraaf wordt gereflecteerd op de effectiviteit van de pilot en wordt een verwachting gegeven voor de ontwikkeling op middellange termijn.

Het baggerbezwaar is in het eerste jaar van de pilot sterk afgenomen naar 8.000 m³ in 2025 ten opzichte van gemiddeld 195.000 m³ in de jaren ervoor (96% afname t.o.v. 5-jarig gemiddelde baggerbezwaar). Ook voor 2026 (tot en met juni data beschikbaar) is het baggervolume vooralsnog sterk afgenomen ten opzichte van de periode voorafgaand aan de pilot. Er lijkt geen algehele afname van het baggerbezwaar in de (westelijke) Waddenzee, aangezien het baggerbezwaar in de kombergingsgebieden Marsdiep, Vlie en Borndiep als geheel vrij stabiel is gebleven (2% lager in 2025 dan het 5-jarig gemiddelde). Dat betekent dat de afname van baggerbezwaar in de Boontjes direct samenhangt met de aanpassing van het vaargeulbeheer (verkleining van streefdiepte en onderhoudsdiepte). In die zin is de pilot dus op de korte termijn een succes. Om de mogelijke bijdrage van omgevingsfactoren (bijv. natuurlijke fluctuaties in de sedimentatie in de vaargeul) verder te onderscheiden van het effect van de pilot zou het nuttig zijn om een vergelijking te maken van omgevingscondities (wind, waterstanden en SPM) met voorgaande jaren. Dat is in deze studie vooralsnog niet gedaan.

Aan de hand van de beheerlodingen tussen de start van de pilot (januari 2025) en de laatste beschikbare beheerloding (maart 2026) is de morfologische ontwikkeling tijdens de pilot geanalyseerd. De netto sedimentatie tussen januari 2025 en maart 2026 was 25.000 m³ over de gehele vaargeul. De totale sedimentatie kwam daarmee op 32.000 m³ (inclusief baggervolume, omgerekend naar in-situ volume). De sedimentatie concentreert zich tijdens de pilot vooral in het voormalige drempelgebied in de noordelijke Boontjes en een aantal aanwijsbare knelpunten aan de rand van de vaargeul (bochten 1, 2 en 3 uit de morfologische analyse).

Ook is in de morfologische analyse bepaald hoeveel gebaggerd had moeten worden als sinds januari 2025 de oude streefdiepte en onderhoudsdiepte gehanteerd waren door voor locaties die niet aan de oude streefdiepte voldoen het volume boven de onderhoudsdiepte te bepalen. Daaruit kwam een eenmalig virtueel baggervolume van ongeveer 65.000 m³ in-situ (75.000 m³ beunvolume), zonder daarin herhaalde sedimentatie na baggeren van de vaargeul mee te nemen. Voor de oude streefdiepte en onderhoudsdiepte zou het baggerbezwaar dus naar verwachting een orde groter zijn dan het huidige baggervolume.

Per doorsnede is de ontwikkeling over de gehele lengte van de vaargeul Boontjes in meer detail geanalyseerd. Net als in de periode na de drempelverwijdering vindt de meeste sedimentatie plaats in de noordelijke Boontjes (rond de voormalige drempel). In dit gedeelte een sterke sedimentatietrend zichtbaar sinds de start van de pilot (omdat niet langer – of ondieper – gebaggerd wordt). Het midden en zuiden van de vaargeul Boontjes zijn vrij stabiel. Door de oostwaartse verlegging van de vaargeul in de zuidelijke Boontjes is de morfologische ontwikkeling tijdens de pilot in het zuiden echter lastiger te duiden door gebrek aan continuïteit in de data. Wel lijkt deze verlegging effectief te zijn: in de oude vaargeul (westelijk tracé) vindt sedimentatie plaats sinds deze vanaf oktober 2025 niet langer wordt

onderhouden. In de nieuwe vaargeul (oostelijk tracé) lijkt de drempel licht te eroderen, mogelijk doordat er na de verlegging meer stroming doorheen gaat.

Cruciaal hierbij is het inzicht dat de ‘verondieping’ van 0,5 m in de vaargeul Boontjes niet over de gehele lengte van de vaargeul plaatsvindt. Slechts op een aantal plekken blijkt een daadwerkelijke sedimentatietrend op te treden richting NAP-3,3 m. Daarmee is het baggerbezwaar niet alleen uitgesteld door een extra marge in verticale richting in te bouwen, maar is het probleemgebied over de lengte van de vaargeul sterk beperkt tot een kleiner gebied. Op een paar specifieke punten aan de rand van de vaargeul wordt gebaggerd om aan de benodigde 100 m vaargeulbreedte te voldoen. Waarschijnlijk zijn deze lokale baggerwerkzaamheden te vermijden door de vaargeul zijwaarts mee te laten verplaatsen met de natuurlijke meandering (afhankelijk van nautische en praktische haalbaarheid).

Op basis van lineaire extrapolatie is een eerste inschatting gemaakt van de verwachte toekomstige ontwikkeling. Kanttekening daarbij is dat gekeken is wanneer de gemiddelde diepte per doorsnede niet zou voldoen, terwijl wellicht eerder aan de randen onderhoud nodig zal zijn. Anderzijds geeft lineaire extrapolatie een conservatieve inschatting (sedimentatie neemt naar verwachting af naar mate de diepte afneemt). Hieruit blijkt dat ook in de toekomst in de noordelijke Boontjes structureel onderhoudsbaggerwerk nodig zal zijn, naar verwachting te beginnen per medio 2027 - medio 2028. De nieuwe streefdiepte ligt weliswaar dichter bij het natuurlijke profiel, maar is hier lokaal nog te diep vanwege wantijvorming en afzettingen uit het ebschild van het Kimstergat. Voor de rest van de vaargeul duurt dit nog aanzienlijk langer of zal dit zelfs niet nodig zijn, omdat daar geen sedimentatietrend is. Zeker is dat onderhoudsbaggerwerkzaamheden pas later nodig zullen zijn voor een streefdiepte van NAP-3,3 m dan voor een streefdiepte van NAP-3,8 m. Bovendien zal het benodigde baggervolume ook substantieel lager zijn, omdat een ondieper onderhoudsprofiel beter aansluit op het natuurlijke geulprofiel.

Concluderend wordt de pilot op korte termijn zeer effectief geacht in het reduceren van het onderhoudsbaggervolume van de Boontjes en het verminderen van de ecologische impact van het baggeren en verspreiden, gezien de sterke afname van baggervolumes en de beperkte sedimentatie die sinds de pilot is opgetreden. Aangezien een ondiepere vaargeul dichter bij de natuurlijke evenwichtsdoorsnede van de Boontjes ligt, is de verwachting bovendien dat het baggerbezwaar ook in de toekomst substantieel lager zal blijven.

7.2 Voorlopige bevindingen meetcampagnes

De kalibratie van de troebelheidssensors voor de T1-, T2- en T3-meting gaf realistische waardes voor de omzetting van troebelheid (NTU) naar sedimentconcentraties (mg/L). Dit sterkt het vertrouwen in de omgerekende SPM-waardes voor deze metingen en geeft reden voor een correctie van de omgerekende SPM-waardes van de T0-meting.

De getijvoortplanting in Harlingen komt, zoals eerder uit de T0-meting geconstateerd, deels uit het Marsdiep en deels uit het Vlie. Daarnaast was er in de T0-meting en T1-meting een duidelijke afname van vloedstroming en vloeddominantie over de langsrichting van de vaargeul Boontjes. De stroomsnelheden bij Boontjes Zuid waren in de T2- en T3-meting echter minder vloeddominant dan in de T0- en T1-meting, mogelijk als gevolg van de geulverlegging. Een vergelijkbaar patroon kwam naar voren uit de analyse van residuele stroming en sedimenttransport: in de vervolgmetingen vanaf de zomer van 2025 waren residuele stroming en netto sedimenttransport meer gebalanceerd (najaar 2025) of zelfs ebdominant (voorjaar 2026). Met de afname van vloeddominantie is ook een aandrijvende kracht voor sedimentatie in de vaargeul afgenomen. Op de andere meetlocaties is geen duidelijke verandering waargenomen in residuele stroming en sedimenttransport over de gemeten periodes. Wel is de richting van de gemeten stroming licht gedraaid voor de

meetframes in de Blauwe Slenk en Boontjes Noord. Vermoedelijk betreft dit geen verandering in systeem, maar een net andere locatie van het meetframe (of invloed van wind).

Aan de gemeten troebelheid valt vooral op dat er voor een aantal momenten een duidelijke samenhang aanwezig is met windsnelheid en golfhoogte. In de gemiddelde SPM-waardes over langere periode treedt echter géén duidelijk seizoenseffect op: gemiddelde SPM-waardes in het najaar zijn niet consistent hoger dan in het voorjaar.

Voor de varende 13-uursmetingen vertonen de getijdebieten en sedimenttransporten samenhang door per meetmoment te kijken naar het ruimtelijke beeld over alle meetraaien. Voor de meetraaien in de Boontjes (noord, midden en zuid) waren de residuele stroming en het netto sedimenttransport per meetmoment veelal in dezelfde richting. De fasering ten opzichte van springtij en doodtij enerzijds, en het waterstandsverhang tussen Kornwerderzand en Harlingen anderzijds, lijken hierbij sterk samen te hangen met de richting van de residuele stroming. Door de beperkte windkracht tijdens de meeste 13-uursmetingen komt de invloed van windrichting op residuele transporten mogelijk niet volledig tot uiting in deze resultaten.

Er zijn slechts enkele kleine veranderingen op een beperkt aantal punten opgetreden in de bodemsamenstelling tussen de T0-meting en de T3-meting. Deze verschillen zijn mogelijk veroorzaakt door seizoensvariaties (januari t.o.v. maart/april) en door de verlegging van het vaargeultracé in de zuidelijke Boontjes. Alleen het afgenomen slibgehalte in de bocht in de noordelijke Boontjes is mogelijk veroorzaakt door de pilot met aangepaste streefdiepte.

7.3 Aanbevelingen

Aanbevelingen voor beheer en beleid:

- Bagger zo min mogelijk ‘vooruit’, d.w.z. indien wordt voldaan aan de streefdiepte niet de geul verdiepen tot onderhoudsdiepte, omdat extra overdiepte meer sedimentatie veroorzaakt.
- Gezien de effectiviteit van de pilot wordt aanbevolen om de streefdiepte van NAP-3,3 m met bijbehorende onderhoudsdiepte van NAP-3,8 m aan te houden uitgaande van de doelstelling om natuurimpact te beperken.
- Lokale baggerwerkzaamheden aan de rand van de vaargeul kunnen worden verminderd door de vaargeul zijwaarts mee te laten verplaatsen met het natuurlijke meanderen van de geul Boontjes, mits nautische en praktisch haalbaar. Dit is al staand beleid, maar hier kan mogelijk actiever en frequenter op worden gestuurd.

Aanbevelingen voor vervolgstudie:

- Blijf de bodemontwikkeling en baggervolumes in de vaarweg Boontjes monitoren. Bredere bodempeilingen, waarbij ook het plaatgebied naast de vaargeul wordt gepeild, helpen om de morfologische ontwikkeling van het gebied beter in kaart te brengen en daar zo nodig op te anticiperen. Bovendien geeft dit meer inzicht in de mate waarin de geul opvult en de verwachte toekomstige ontwikkeling
- Herhaal de morfologische analyse en analyse van baggercijfers uit deze studie voor de gegevens uit kalender 2027 voor meer inzicht in de effectiviteit op langere termijn en de verwachte toekomstige ontwikkeling.
- Om de mogelijke bijdrage van omgevingsfactoren (bijv. natuurlijke fluctuaties in de sedimentatie in de vaargeul) te onderscheiden van het effect van de pilot zou het nuttig zijn om een vergelijking te maken van omgevingscondities met voorgaande jaren. In deze studie is reeds gekeken naar windcondities (Paragraaf 5.2.3) en baggervolumes (Paragraaf 3.5), maar andere omgevingsfactoren als SPM en waterstanden zouden verdere duiding kunnen bieden. Voor SPM kunnen de

(laagfrequente) MWTL-metingen en de (hoogfrequente) metingen bij de meetpalen Holwerd en Dantziggat worden gebruikt om te duiden hoe de troebelheid in 2025 en 2026 zich verhoudt tot eerdere jaren. Data van de recente metingen bij de meetpalen Holwerd en Dantziggat worden nog geanalyseerd als onderdeel van BO Wadden 2026.

- Binnen dit project zijn de morfologische studie en de studie naar de data uit de campagne met de meetframes nog niet volledig samengebracht. Met de hoeveelheid data die beschikbaar is, zou het zeer waardevol zijn om met de verschillende gemeten parameters meer inzichten op te doen over sturende processen voor morfologische ontwikkeling, Hierbij denken wij aan de volgende mogelijkheden:
    a) Samenhang van diverse parameters (zoals windsnelheid, windrichting, golfhoogte, zoutgehalte en spuidebiet bij Kornwerderzand) met gemeten SPM om sturende processen voor sedimentatie in de vaargeul Boontjes en de effectiviteit van de pilot verder te kunnen duiden.
    b) Samenhang tussen wind en hydrodynamische condities en morfologische ontwikkelingen. Met de nieuwste inzichten dat de morfologische ontwikkeling tijdens de pilotperiode meer fluctueert tussen sedimentatie en erosie, is dit nog relevanter. Als meer inzicht kan worden verkregen in wat erosieve periodes stuurt, kan in de planning van baggerwerkzaamheden daarop worden geanticipeerd.
    c) Uit de 13-uursmetingen zouden uit de combinatie van stroomsnelheid in langs- en dwarsrichting en sedimentconcentratie ook sedimentfluxen bepaald kunnen worden. Met name de dwarsstroming zou gebruikt kunnen worden om een inschatting te maken van de omvang van geul-plaatuitwisseling.
- De verspreiding van baggerspecie uit de Boontjes en uit de haven van Harlingen en de samenhang hiervan met de gemeten SPM-waardes in het Kimstergat kunnen in meer detail worden geanalyseerd. Dit wordt opgepakt als onderdeel van de Knelpuntanalyse Kimstergat, die in het najaar van 2026 wordt uitgevoerd als onderdeel van BO Wadden.
- De stromingspatronen uit de meetraaien en residuele debieten kunnen worden gebruikt voor de validatie van numerieke modelsimulaties. Daarmee zou ook de afname van stroomsnelheden en vloeddominantie in de zuidelijke Boontjes en de mogelijke rol van de geulverlegging hierin verder onderzocht kunnen worden.

Literatuur

Bi, Q., van Weerdenburg, R., van Kessel, T. (2024). Data analysis turbidity monitoring Holwerd - Ferwerd (update 2024). Deltares memo data analysis Holwerd-Ferwerd 2024. Deltares, Delft. Colina Alonso, A., Smits, B.P., Vroom, J.A. (2021). Stijging Baggerhoeveelheden Vaargeul Boontjes. Deltares rapport 11206799-007-ZKS-0001. Deltares, Delft. 93 pp.

Colosimo, I., de Vet, P. L., van Maren, D. S., Reniers, A. J., Winterwerp, J. C., & van Prooijen, B. C. (2020). The impact of wind on flow and sediment transport over intertidal flats. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(11), 910.

Duran Matute, M., Gerkema, T., de Boer, G.J., Nauw, J.J. & Gräwe, U.. 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. Ocean Science Vol. 10, p. 611-632. Duran-Matute, 2014

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., en De Ronde, J., 2012, Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences, 91(03), 293-310.

Elias, E.P.L. & T. Vermaas 2018. Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015); Sedimentbalans Westelijke Waddenzee. Deltares rapport 11202190-000-ZKS-0005.

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

Grasmeijer, B. Jaksic, L., Vroom, J. (2022). Verkenning morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee. Deltares rapport 11208040-005-ZKS-0001. Versie: 1.2. Deltares, Delft.

Jager, Z., Cleveringa J., Van Wezel, R., Walta, J. (2023). Wad Nu Harlingen Strand – Algensmurrie. Rapport Zilt Water Advies, 18 december 2023.

Meijers, C., Oost, A., Cleveringa, J., Taal, M. (2025) Kombergingsrapportage Vlie. Deltares rapport 11210370-001. Deltares, Delft.

Ouwerkerk, S. en Vuik, V. (2012). Drempelverwijdering Boontjes. Effecten op hydrodynamica en morfologie. HKV rapport PR2051.10, maart 2012.

Quataert, E., Meijers, C., De Beer, A., Elias, E. (2024) Knelpuntanalyse Harlingen – Noordzee. Deltares rapport 11210370-005-ZKS-0002. Deltares, Delft.

Ridderinkhof, H., (1990). Reststromen en watermenging in de Waddenzee. Proefschrift Universiteit Utrecht.

Rijkswaterstaat (2026). Mulder, P. en Posthuma, A. Jaarrapportage baggerwerkzaamheden Waddenzee 2025. V1.0, 16 maart 2026.

Smits, B.P., Vroom J.A., Van Weerdenburg, R., Colina Alonso, A. (2022). Morfologie en Onderhoud Vaargeul Boontjes: Systeembegrip en Scenario's. Deltares rapport 11208040-004-ZKS-0004. Deltares, Delft. 66 pp.

Smits, B.P., Van Weerdenburg, R., Bi, Q. (2025). Analyse van T0-meting bij pilot verondieping vaarweg Boontjes. Deltares rapport 11211571-006-ZKS-0002. Deltares, Delft. 113 pp.

Van der Vegt, H. & J. Cleveringa (2022), Dynamische Vaargeulbeheer Waddenzee. Kenmerk: 11208040-009-ZKS-0003, 16-12-2022

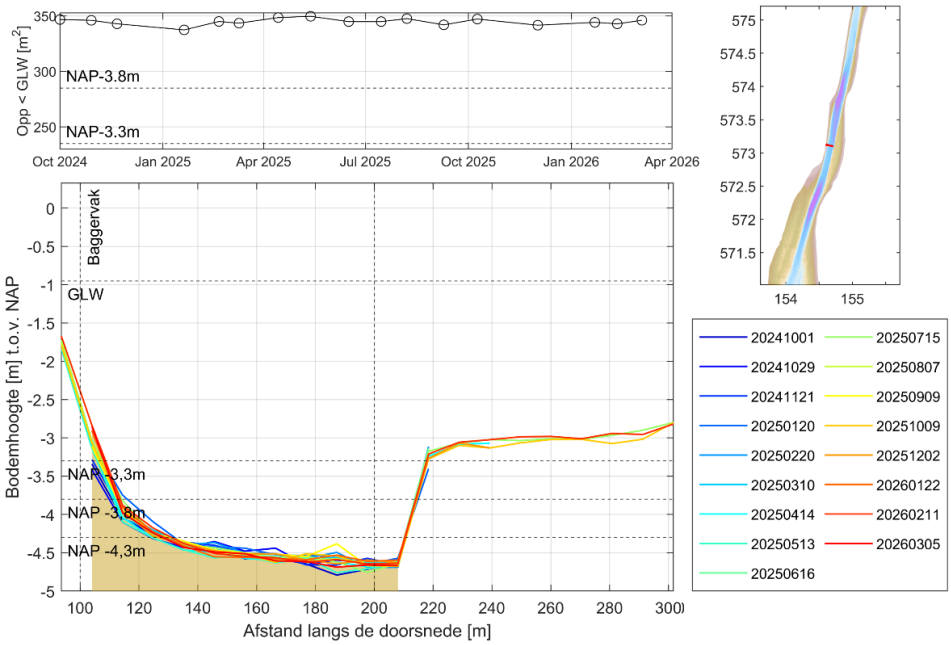
Vroom J., 2011. Tidal divide, a study on a simplified case and the Dutch Wadden Sea, Msc thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences.

Vroom, J., Cleveringa, J., Oost, A., Taal, M. (2023) Kombergingsrapportage Marsdiep. Deltares rapport 11209267-001-ZKS-0005. Deltares, Delft.

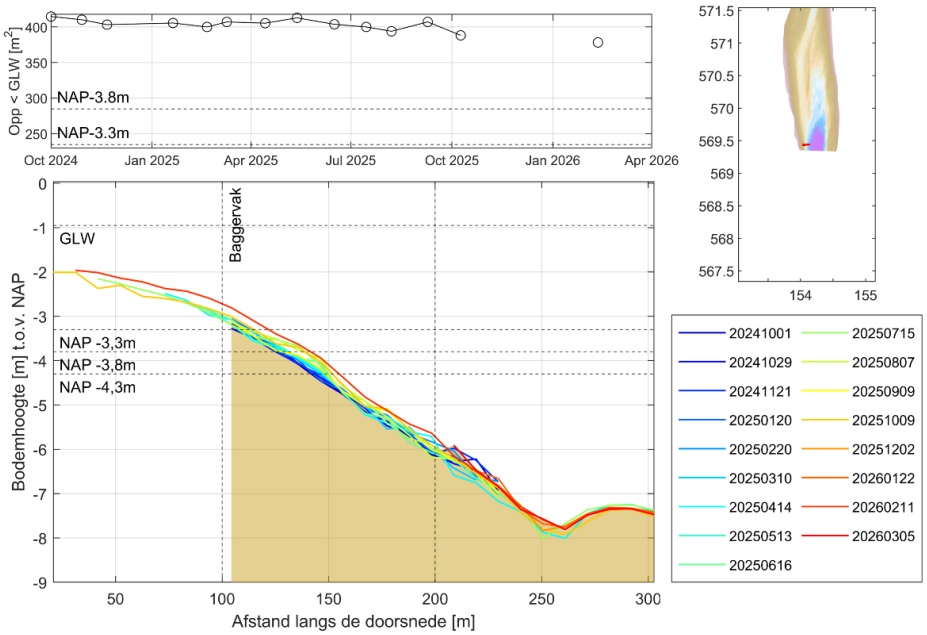
Wang Z.B., Vroom J., Van Prooijen B.C., Labeur R.J., Stive M.J.F., 2013. Movement of tidal watersheds in the Wadden Sea and its consequences on the morphological development, International. J. of Sed. Res., Vol. 28, No. 2, 2013, pp. 162–171.

De Wit, L., Grasmeijer, B., Van Kessel, T., Dees, N., Meijers, C., Quataert, E. (2024). Abiotische effecten baggeren en verspreiden in de Waddenzee - Voorbereidende studie voor het opstellen van het tweede Natura2000 beheerplan Waddenzee. Deltares rapport 11210370-014-ZKS-0001. Deltares, Delft.

A Aanvullende doorsnedes morfologische analyse



Figuur A-1 Doorsnede in bocht 2 met linksboven de natte oppervlakte onder GLW (NAP-0,95 m). De horizontale onderbroken lijnen geven de oppervlakte aan waarvoor de gemiddelde bodemhoogte NAP-3,8 m en NAP-3,3 m is.



Figuur A-2 Doorsnede in zuiden van westelijk tracé met linksboven de natte oppervlakte onder GLW (NAP-0,95 m). De horizontale onderbroken lijnen geven de oppervlakte aan waarvoor de gemiddelde bodemhoogte NAP-3,8 m en NAP-3,3 m is.

B Aanvullende informatie meetframes

B.1 Bijzonderheden bij inwinning en oplevering meetgegevens

Ten eerste is er voor alle meetmomenten is eenmalig onderhoud uitgevoerd aan de meetframes, waardoor gedurende enkele uren geen metingen werden uitgevoerd.

- voor de T0-meting op 12 november 2024;
- voor de T1-meting op 3 juni 2025;
- voor de T2-meting op 5 november 2025; en
- voor de T3-meting op 15 april 2026.

De OBS-sensors zijn uitgerust met een borstel (‘wiper’) om te voorkomen dat aanslag (‘biofouling’) kan ontstaan, waardoor (ten onrechte) hoge troebelheidswaardes geregistreerd zouden worden. Het gebruik van de borstel wordt echter ook door de sensors geregistreerd, waardoor zogenaamde ‘wiperpieken’ ontstaan in het ruwe meetsignaal. Vanwege de hoge frequentie van de metingen (8 Hz) hebben deze pieken nauwelijks effect op gemiddelde waarden over 10 minuten die gebruikt worden in de analyses van dit rapport.

Tijdens de T1-meting (voorjaar 2025):

- De ADCP op meetframe F1 heeft tijdens de T1-meting (voorjaar 2025) wat problemen gehad voorafgaand aan het onderhoudsmoment op 3 juni 2025, mogelijk heeft de sensor gedeeltelijk onder het zand gezeten.
- Bij meetframe F2 is data beschikbaar tot 13 juni 2025 19:11 uur, daarna is de ADCP-sensor om onduidelijke reden gestopt. Ruwe data van de ADV-sensor is wel beschikbaar, maar is voor nabewerking afhankelijk van de ADCP-data.
- Het signaal van de bovenste OBS-sensor op meetframe F2 lijkt te worden afgekapt op 7178 counts en het signaal ziet er getrapt uit (dit is ook tijdens de T2-meting het geval).

Tijdens de T2-meting (najaar 2025):

- De ADV en OBS op frame F1 zijn op 23 oktober rond 18:00 uur gestopt, omdat de vork was afgebroken;
- Het signaal van de bovenste OBS-sensor op meetframe F2 lijkt te worden afgekapt op 7181 counts en het signaal ziet er getrapt uit (dit is ook tijdens de T1-meting het geval).
- Er zijn geen CTD-metingen uitgevoerd op meetframe F4 tijdens de T2-meting. Voor deze locatie is dus geen data beschikbaar voor geleidbaarheid (waaruit zoutgehalte wordt afgeleid), temperatuur en druk in het najaar van 2025.

Tijdens de T3-meting (voorjaar 2026) zijn de ADV en OBS op frame F1 op 25 maart 2026 gestopt, omdat de vork verbogen was.

B.2 Basisstatistieken per meetframe en per meetperiode

Tabel B-1: statistieken meetframe Blauwe Slenk (F1) tijdens T0-meting (najaar 2024)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.006	0.737	-2.159	-0.561	0.016	0.578	2.167
Velocity Magnitude (m/s)	0.556	0.293	0.041	0.331	0.54	0.731	1.568
Velocity projection (m/s)	-0.075	0.62	-1.567	-0.561	-0.108	0.522	1.144
Significant wave height (m)	0.054	0.01	0.042	0.049	0.052	0.055	0.254
Wave period (s)	3.026	1.03	1.0	2.35	3.1	4.0	8.0
Salinity (ppt)	22.57	6.689	2.93	21.076	24.742	27.25	32.045
SPM concentration T (mg/L)	390.295	657.024	3.504	76.765	178.45	396.235	7825.423

Tabel B-2: statistieken meetframe Blauwe Slenk (F1) tijdens T1-meting (voorjaar 2025)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	0.0	0.756	-14.687	-0.559	0.032	0.574	1.683
Velocity Magnitude (m/s)	0.64	0.257	0.025	0.463	0.706	0.808	1.42
Velocity projection (m/s)	-0.211	0.612	-1.399	-0.753	-0.372	0.408	1.063
Significant wave height (m)	0.01	0.009	0.005	0.007	0.008	0.01	0.602
Wave period (s)	2.052	0.13	1.845	1.966	2.014	2.099	3.2
Salinity (ppt)	18.767	11.491	0.01	7.668	19.195	30.692	33.615
SPM concentration T (mg/L)	306.767	364.974	0.891	5.047	156.416	566.781	2670.261
SPM concentration B (mg/L)	226.691	624.464	0.741	1.752	3.604	152.26	8810.866

Tabel B-3: statistieken meetframe Blauwe Slenk (F1) tijdens T2-meting (najaar 2025)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.0	0.742	-1.857	-0.593	-0.002	0.544	2.576
Velocity Magnitude (m/s)	0.396	0.208	0.024	0.243	0.374	0.53	1.185
Velocity projection (m/s)	-0.031	0.42	-1.083	-0.365	-0.021	0.342	0.804
Significant wave height (m)	0.01	0.006	0.005	0.007	0.008	0.011	0.055
Wave period (s)	2.084	0.165	1.634	1.974	2.034	2.153	3.043
Salinity (ppt)	24.35	6.937	5.272	20.164	27.431	29.288	32.138
SPM concentration T (mg/L)	906.502	714.107	0.0	426.871	921.056	1131.371	5537.964
SPM concentration B (mg/L)	721.288	959.4	0.409	9.987	476.116	1123.627	6149.654

Tabel B-4: statistieken meetframe Blauwe Slenk (F1) tijdens T3-meting (voorjaar 2026)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	0.001	0.868	-1.686	-0.674	0.041	0.603	2.038
Velocity Magnitude (m/s)	0.451	0.229	0.038	0.272	0.437	0.604	1.402
Velocity projection (m/s)	-0.136	0.463	-1.353	-0.507	-0.213	0.319	1.013
Significant wave height (m)	0.027	0.006	0.02	0.024	0.025	0.027	0.089
Wave period (s)	1.983	0.063	1.842	1.941	1.971	2.014	2.252
SPM concentration T (mg/L)	232.684	333.038	9.252	65.423	126.802	266.421	3146.079
SPM concentration B (mg/L)	276.1	382.728	9.949	78.889	153.577	318.241	3382.778

Tabel B-5: statistieken meetframe Kimstergat (F2) tijdens T0-meting (najaar 2024)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.0	0.719	-1.931	-0.56	0.024	0.566	2.337
Velocity Magnitude (m/s)	0.51	0.288	0.036	0.324	0.485	0.594	1.526
Velocity projection (m/s)	-0.055	0.58	-1.52	-0.567	0.154	0.47	0.662
Significant wave height (m)	0.075	0.06	0.047	0.056	0.061	0.074	1.078
Peak wave period (s)	2.47	0.714	1.0	2.067	2.667	2.667	8.0
Salinity (ppt)	20.392	2.478	10.582	18.795	20.691	22.085	26.578
SPM concentration T (mg/L)	1013.431	1196.717	0.67	304.379	569.558	1195.138	8812.103
SPM concentration B (mg/L)	1081.942	1200.941	1.192	316.674	614.228	1388.352	8815.494

Tabel B-6: statistieken meetframe Kimstergat (F2) tijdens T1-meting (voorjaar 2025)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.019	0.685	-5.581	-0.581	0.022	0.55	1.516
Velocity Magnitude (m/s)	0.535	0.281	0.041	0.358	0.511	0.637	1.487
Velocity projection (m/s)	0.008	0.259	-0.345	-0.223	-0.09	0.239	0.701
Significant wave height (m)	0.015	0.011	0.0	0.009	0.011	0.016	0.355
Wave period (s)	1.944	0.162	1.584	1.831	1.931	2.007	2.911
Salinity (ppt)	28.682	3.328	0.995	27.351	29.102	31.414	33.778
SPM concentration T (mg/L)	478.386	277.342	1.084	249.01	420.273	709.688	968.519
SPM concentration B (mg/L)	355.11	419.21	3.355	119.503	232.705	422.726	4203.579

Tabel B-7: statistieken meetframe Kimstergat (F2) tijdens T2-meting (najaar 2025)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	0.0	0.739	-1.661	-0.596	0.01	0.549	2.542
Velocity Magnitude (m/s)	0.418	0.237	0.019	0.263	0.408	0.502	1.426
Velocity projection (m/s)	-0.016	0.473	-1.412	-0.419	0.159	0.395	0.602
Significant wave height (m)	0.018	0.027	0.006	0.008	0.009	0.014	0.286
Wave period (s)	1.969	0.144	1.582	1.883	1.957	2.029	2.889
Salinity (ppt)	20.688	3.74	6.638	17.99	20.95	23.785	27.975
SPM concentration T (mg/L)	296.544	181.48	23.696	160.702	246.588	412.915	675.166
SPM concentration B (mg/L)	478.419	500.018	1.206	172.709	315.407	587.293	4834.385

Tabel B-8: statistieken meetframe Kimstergat (F2) tijdens T3-meting (voorjaar 2026)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.001	0.708	-1.588	-0.571	0.04	0.555	1.818
Velocity Magnitude (m/s)	0.434	0.233	0.037	0.289	0.413	0.508	1.341
Velocity projection (m/s)	-0.026	0.487	-1.336	-0.45	0.182	0.401	0.623
Significant wave height (m)	0.018	0.013	0.01	0.013	0.014	0.016	0.176
Wave period (s)	1.95	0.086	1.598	1.908	1.953	1.996	2.738
SPM concentration T (mg/L)	247.592	273.008	35.85	92.78	161.247	294.32	5252.028
SPM concentration B (mg/L)	266.228	320.64	1.438	70.313	186.019	340.622	3975.426

Tabel B-9: statistieken meetframe Boontjes Noord (F3) tijdens T0-meting (najaar 2024)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.0	0.714	-1.92	-0.561	0.019	0.561	2.315
Velocity Magnitude (m/s)	0.439	0.182	0.042	0.291	0.458	0.588	1.02
Velocity projection (m/s)	0.064	0.294	-0.859	-0.218	0.17	0.321	0.603
Significant wave height (m)	0.106	0.085	0.052	0.064	0.078	0.114	1.089
Wave period (s)	2.452	0.595	1.0	2.007	2.667	2.667	7.657
Salinity (ppt)	19.515	2.81	8.915	17.694	19.866	21.405	26.553
SPM concentration T (mg/L)	453.944	377.256	38.808	197.586	363.522	582.567	4475.713
SPM concentration B (mg/L)	523.168	512.088	44.555	197.223	392.039	657.222	5432.627

Tabel B-10: statistieken meetframe Boontjes Noord (F3) tijdens T1-meting (voorjaar 2025)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	0.001	0.685	-4.107	-0.558	0.039	0.565	1.576
Velocity Magnitude (m/s)	0.44	0.181	0.043	0.294	0.469	0.59	0.878
Velocity projection (m/s)	0.002	0.133	-0.633	-0.09	-0.0	0.11	0.368
Significant wave height (m)	0.025	0.022	0.0	0.01	0.017	0.032	0.219
Wave period (s)	1.876	0.163	1.524	1.747	1.871	1.987	2.806
Salinity (ppt)	22.953	9.261	0.33	20.842	26.793	29.995	32.998
SPM concentration T (mg/L)	275.49	245.741	2.202	84.156	226.78	391.02	2929.295
SPM concentration B (mg/L)	587.886	656.776	1.453	229.402	416.523	692.859	7926.519

Tabel B-11: statistieken meetframe Boontjes Noord (F3) tijdens T2-meting (najaar 2025)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.001	0.736	-1.683	-0.592	0.006	0.549	2.52
Velocity Magnitude (m/s)	0.37	0.141	0.023	0.269	0.382	0.482	0.93
Velocity projection (m/s)	0.063	0.24	-0.824	-0.146	0.151	0.261	0.619
Hs (m)	0.196	0.187	-1.0	0.055	0.153	0.282	1.04
Tp (s)	4.472	4.18	-1.0	2.1	2.533	5.05	25.3
Salinity (ppt)	21.55	3.859	0.01	18.74	22.552	24.302	29.522
SPM concentration T (mg/L)	238.386	206.843	18.984	112.175	196.838	285.957	2146.437
SPM concentration B (mg/L)	289.815	341.133	19.497	102.042	201.68	344.322	4116.762

Tabel B-12: statistieken meetframe Boontjes Noord (F3) tijdens T3-meting (voorjaar 2026)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.001	0.706	-1.615	-0.564	0.043	0.548	1.799
Velocity Magnitude (m/s)	0.382	0.161	0.038	0.251	0.388	0.514	0.944
Velocity projection (m/s)	0.09	0.349	-0.92	-0.227	0.155	0.414	0.785
Hs (m)	0.2	0.171	0.0	0.038	0.18	0.32	0.83
Tp (s)	8.531	6.547	1.1	2.5	6.792	13.342	25.6
SPM concentration T (mg/L)	225.502	188.319	27.629	88.663	184.523	302.234	3569.662
SPM concentration B (mg/L)	203.548	244.821	3.514	51.928	142.548	265.418	4671.106

Tabel B-13: statistieken meetframe Boontjes Zuid (F4) tijdens T0-meting (najaar 2024)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.001	0.803	-2.322	-0.556	-0.013	0.621	2.44
Velocity Magnitude (m/s)	0.603	0.347	0.039	0.358	0.576	0.757	1.855
Velocity projection (m/s)	-0.061	0.688	-1.84	-0.6	0.098	0.562	1.014
Significant wave height (m)	0.065	0.031	0.044	0.056	0.059	0.063	0.618
Peak wave period (s)	3.018	1.297	1.0	1.6	4.0	4.0	8.0
Salinity (ppt)	16.674	3.12	4.792	14.8	16.81	18.668	24.09
SPM concentration T (mg/L)	723.261	1266.887	28.11	163.07	305.53	602.416	8807.128
SPM concentration B (mg/L)	666.779	1070.898	26.385	171.767	332.019	639.42	8806.409

Tabel B-14: statistieken meetframe Boontjes Zuid (F4) tijdens T1-meting (voorjaar 2025)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	0.0	0.682	-8.921	-0.556	0.037	0.553	1.534
Velocity Magnitude (m/s)	0.608	0.311	0.04	0.385	0.608	0.782	1.666
Velocity projection (m/s)	-0.013	0.306	-0.502	-0.287	-0.099	0.239	0.755
Significant wave height (m)	0.01	0.008	0.0	0.008	0.009	0.011	0.769
Wave period (s)	2.082	0.135	1.781	1.984	2.046	2.153	3.312
Salinity (ppt)	20.71	7.534	0.292	12.242	22.898	27.63	32.317
SPM concentration T (mg/L)	243.231	265.425	2.543	75.57	156.06	321.074	3162.111
SPM concentration B (mg/L)	212.688	260.499	1.425	40.571	125.912	286.385	3174.213

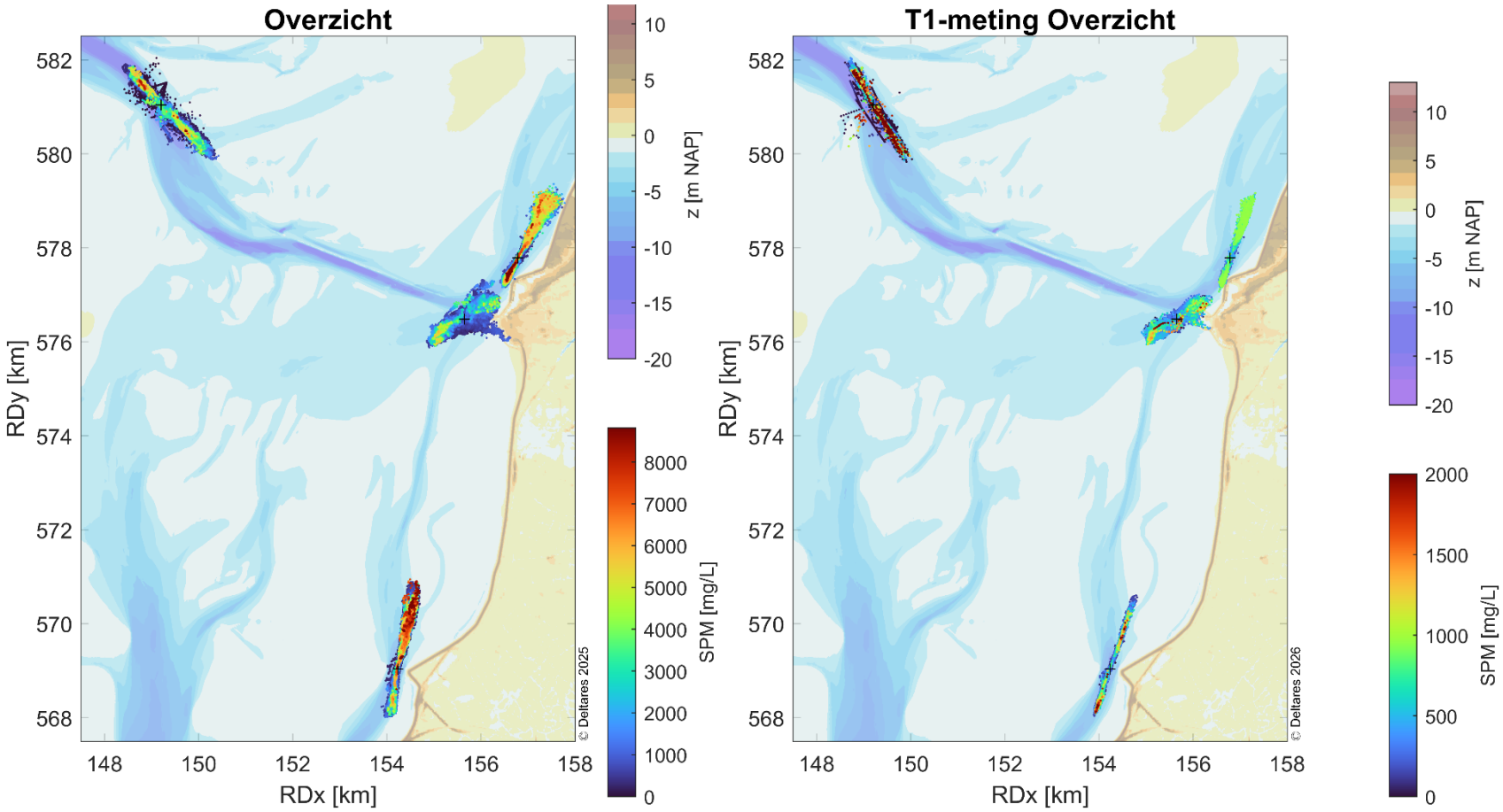
Tabel B-15: statistieken meetframe Boontjes Zuid (F4) tijdens T2-meting (najaar 2025)

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	0.068	0.671	-1.565	-0.471	0.191	0.486	2.636
Velocity Magnitude (m/s)	0.363	0.24	0.022	0.171	0.315	0.501	1.37
Velocity projection (m/s)	0.0	0.422	-1.363	-0.294	0.141	0.303	0.861
Hs (m)	0.196	0.187	-1.0	0.055	0.153	0.282	1.04
Tp (s)	4.474	4.182	-1.0	2.1	2.533	5.054	25.3
SPM concentration T (mg/L)	279.222	571.126	13.086	77.595	127.092	234.663	5228.626
SPM concentration B (mg/L)	249.902	394.628	13.64	39.572	130.659	289.609	5301.97

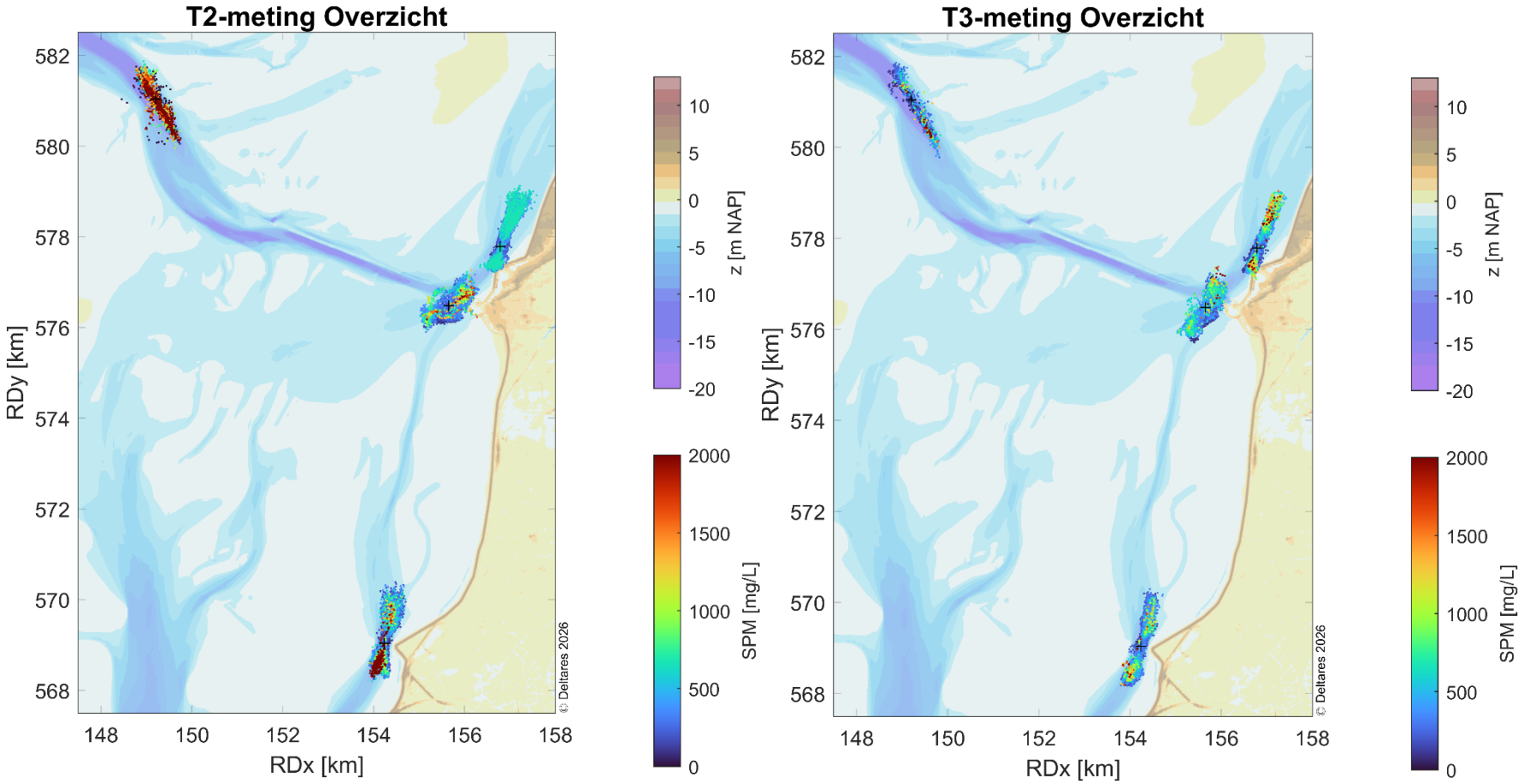
Tabel B-16: statistieken meetframe Boontjes Zuid (F4) tijdens T3-meting (voorjaar 2026).

	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Water level (m)	-0.029	0.593	-1.571	-0.361	-0.062	0.382	1.767
Velocity Magnitude (m/s)	0.503	0.249	0.042	0.309	0.512	0.676	1.273
Velocity projection (m/s)	0.031	0.545	-1.268	-0.425	0.149	0.525	0.895
Hs (m)	0.14	0.16	0.0	0.01	0.09	0.195	0.82
Tp (s)	9.185	6.424	1.1	3.1	8.467	13.833	25.6
SPM concentration T (mg/L)	240.834	187.563	18.681	140.473	204.129	280.801	2940.066
SPM concentration B (mg/L)	276.21	273.054	19.207	147.638	213.203	300.366	4222.515

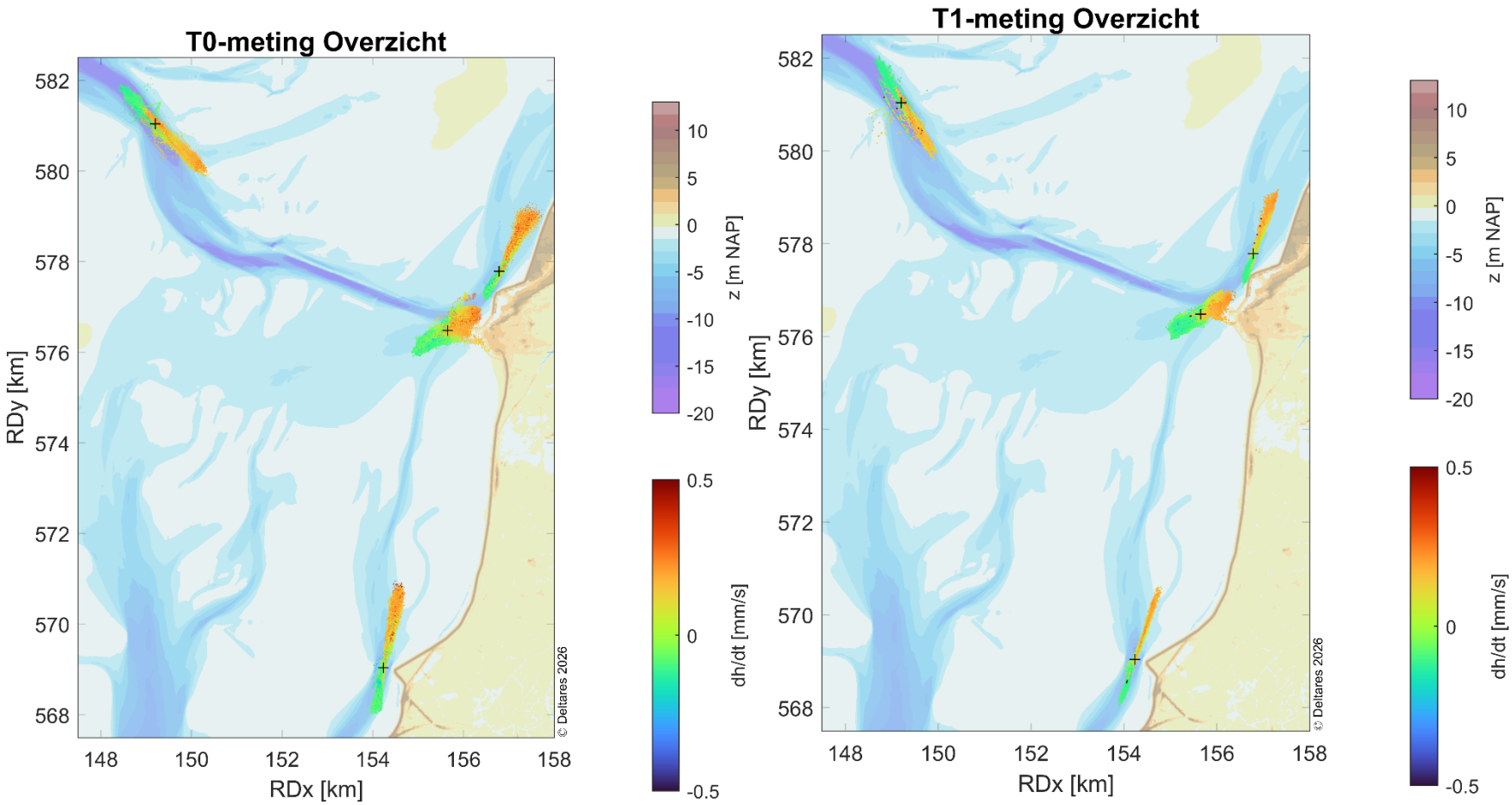
B.3 Ruimtelijke patronen



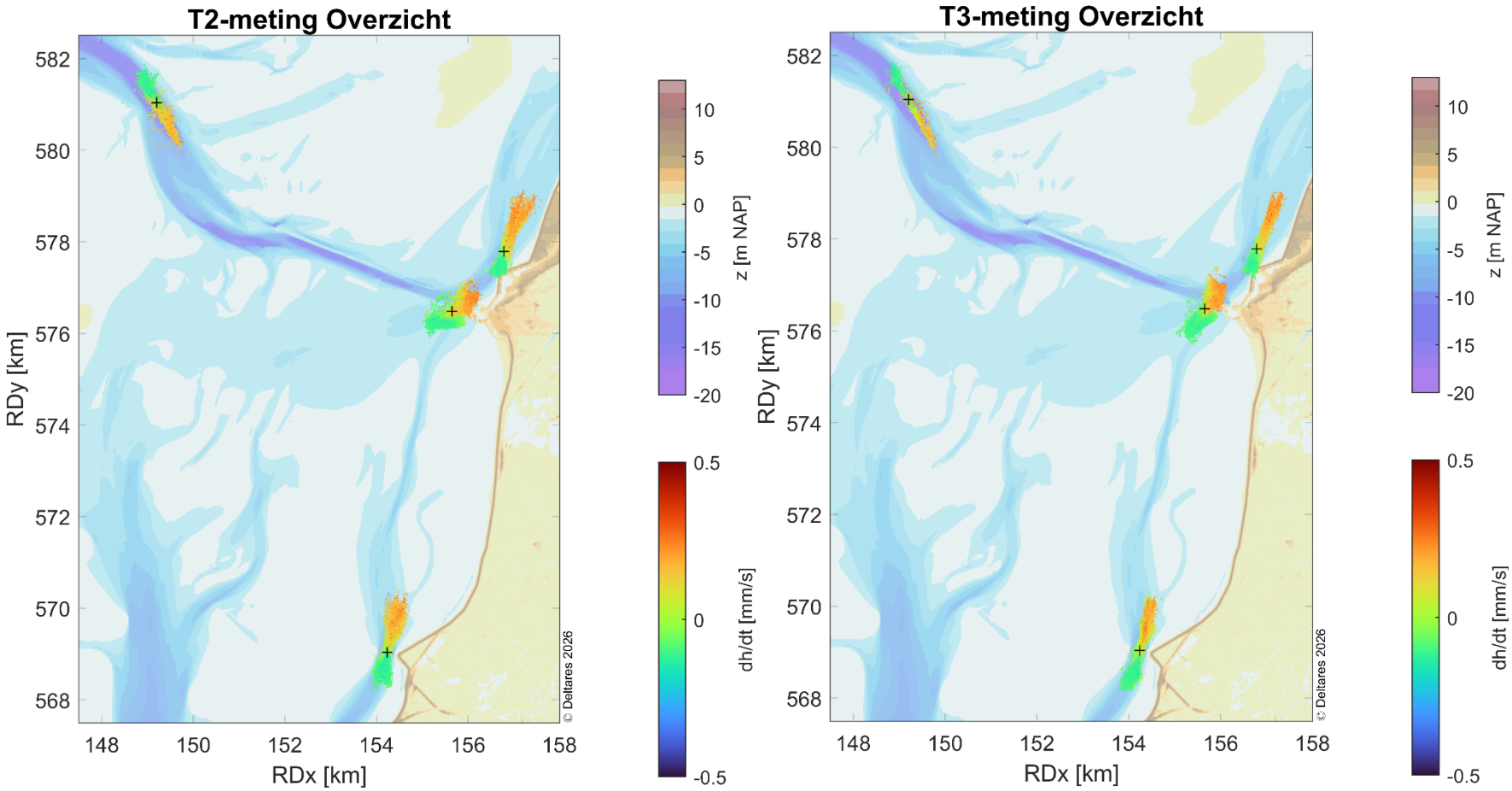
Figuur B-1: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op de vier meetlocaties tijdens de gehele meetperiodes van de T0-meting (najaar 2024; links) en T1-meting (voorjaar 2025; rechts). De meetlocaties zijn weergeven met een +. Schaal stroomsnelheden: 1 m/s : 1 km op de achtergrondkaart. De kleur toont de omgerekende SPM van de bovenste OBS-sensor. Zoals eerder opgemerkt is de SPM-waarde in het Kimstergat tijdens de T1-meting afgekapt op een waarde van ~1000 mg/L en daardoor onrealistisch laag.



Figuur B-2: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op de vier meetlocaties tijdens de gehele meetperiodes van de T2-meting (najaar 2025; links) en T3-meting (voorjaar 2026; rechts). De meetlocaties zijn weergeven met een +. Schaal stroomsnelheden: 1 m/s : 1 km op de achtergrondkaart. De kleur toont de omgerekende SPM van de bovenste OBS-sensor. Zoals eerder opgemerkt is de SPM-waarde in het Kimstergat tijdens de T2-meting afgekapt op een waarde van ~1000 mg/L en daardoor onrealistisch laag.

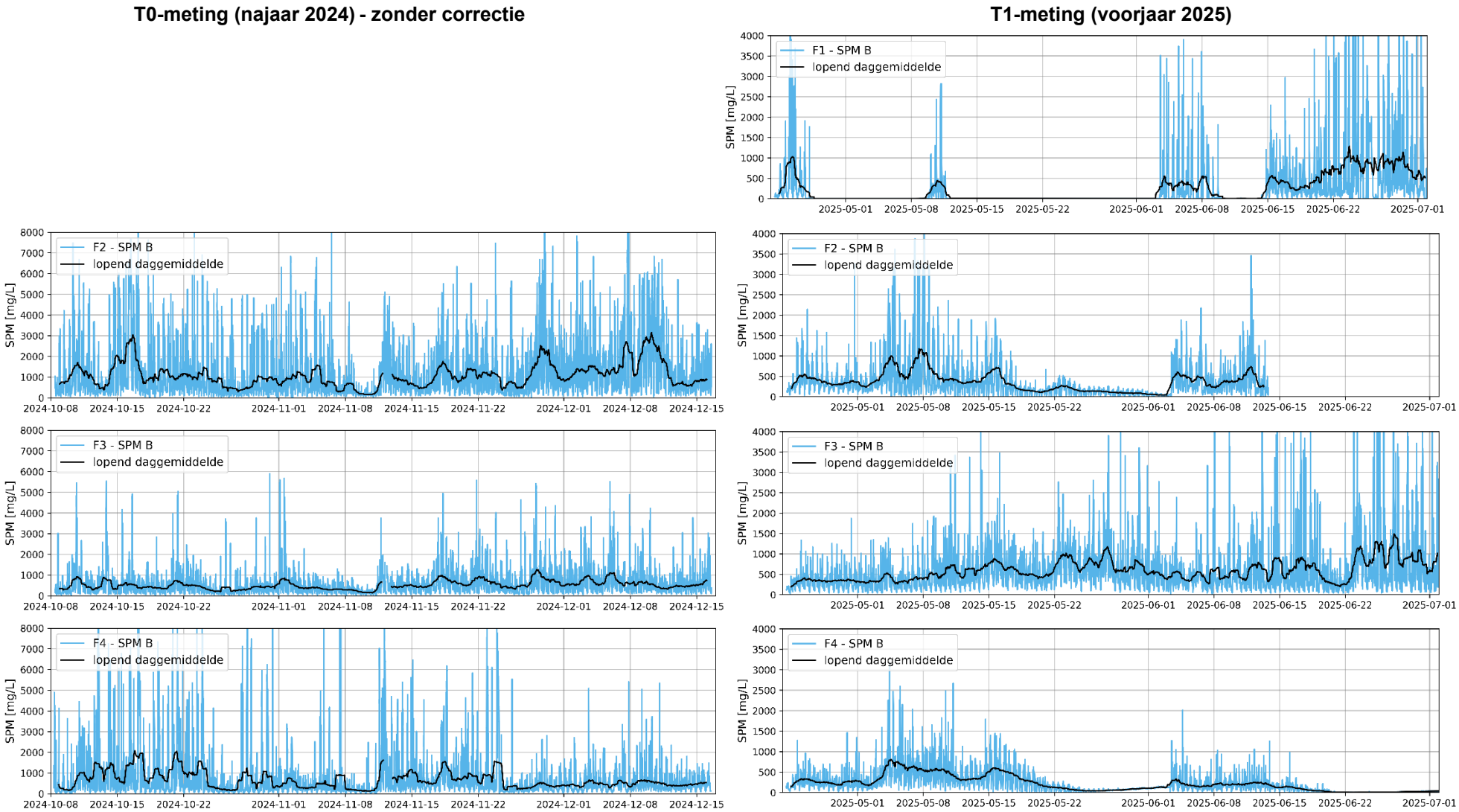


Figuur B-3: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op de vier meetlocaties tijdens de gehele meetperiodes van de T0-meting (najaar 2024; links) en T1-meting (voorjaar 2025; rechts). De meetlocaties zijn weergeven met een +. Schaal stroomsnelheden: 1 m/s : 1 km op de achtergrondkaart. De kleur toont de verandering van de waterstand en daarmee een indicatie van de fase in het getij.

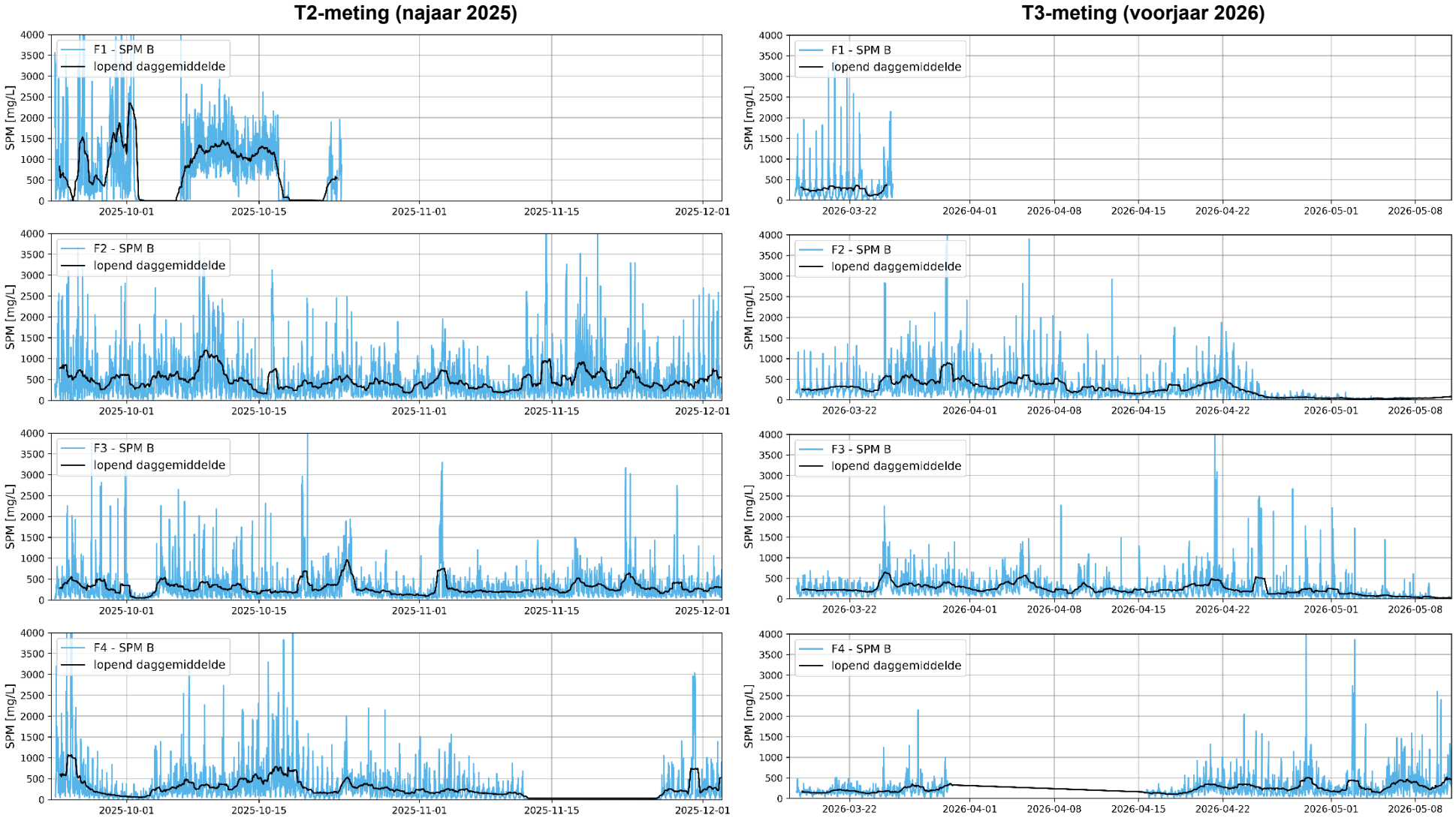


Figuur B-4: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op de vier meetlocaties tijdens de gehele meetperiodes van de T2-meting (najaar 2025; links) en T3-meting (voorjaar 2026; rechts). De meetlocaties zijn weergeven met een +. Schaal stroomsnelheden: 1 m/s : 1 km op de achtergrondkaart. De kleur toont de verandering van de waterstand en daarmee een indicatie van de fase in het getij.

B.4 SPM-tijdreeksen onderste OBS-sensor

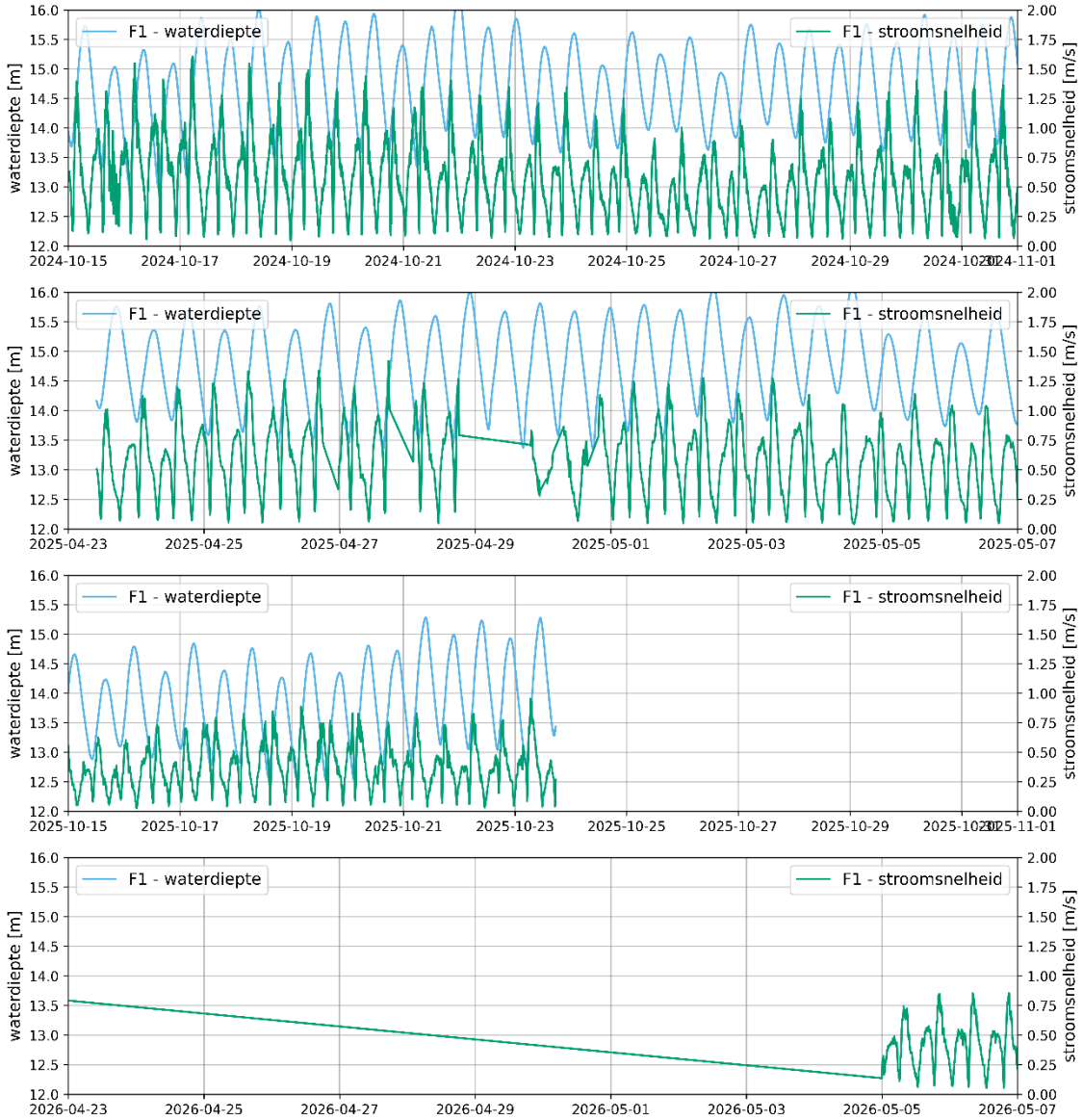


Figuur B-5: Tijdreeksen van de gemeten sedimentconcentraties (SSC ofwel SPM) bij de onderste OBS (0,43 m boven de bodem) op de frames bij (van boven naar beneden) Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2), Boontjes noord (F3) en Boontjes zuid (F4). Links worden de resultaten van de T0-meting (najaar 2024; zonder correctie) getoond en rechts van de T1-meting (voorjaar 2025). Merk op dat er geen onderste OBS-sensor op frame F1 aanwezig was tijdens de T0-meting en dat de schaal van de y-as verschilt (0-8000 mg/L voor T0 en 0-4000 mg/L voor T1), overeenkomstig met het verschil in kalibratiecoëfficiënten tussen de meetperiodes beschreven in Paragraaf 5.1.3.



Figuur B-6: Tijdreeksen van de gemeten sedimentconcentraties (SSC ofwel SPM) bij de onderste OBS (0,43 m boven de bodem) op de frames bij (van boven naar beneden) Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2), Boontjes noord (F3) en Boontjes zuid (F4). Links worden de resultaten van de T2-meting (najaar 2025) getoond en rechts van de T3-meting (voorjaar 2026).

B.5 Blauwe Slenk



Figuur B-7: Tijdreeksen voor waterdiepte (blauw, linker y-as) en stroomsnelheid (groen, rechter y-as) voor meetframe Blauwe Slenk (F1). Van boven naar beneden worden meetperiodes T0, T1, T2 en T3 getoond.

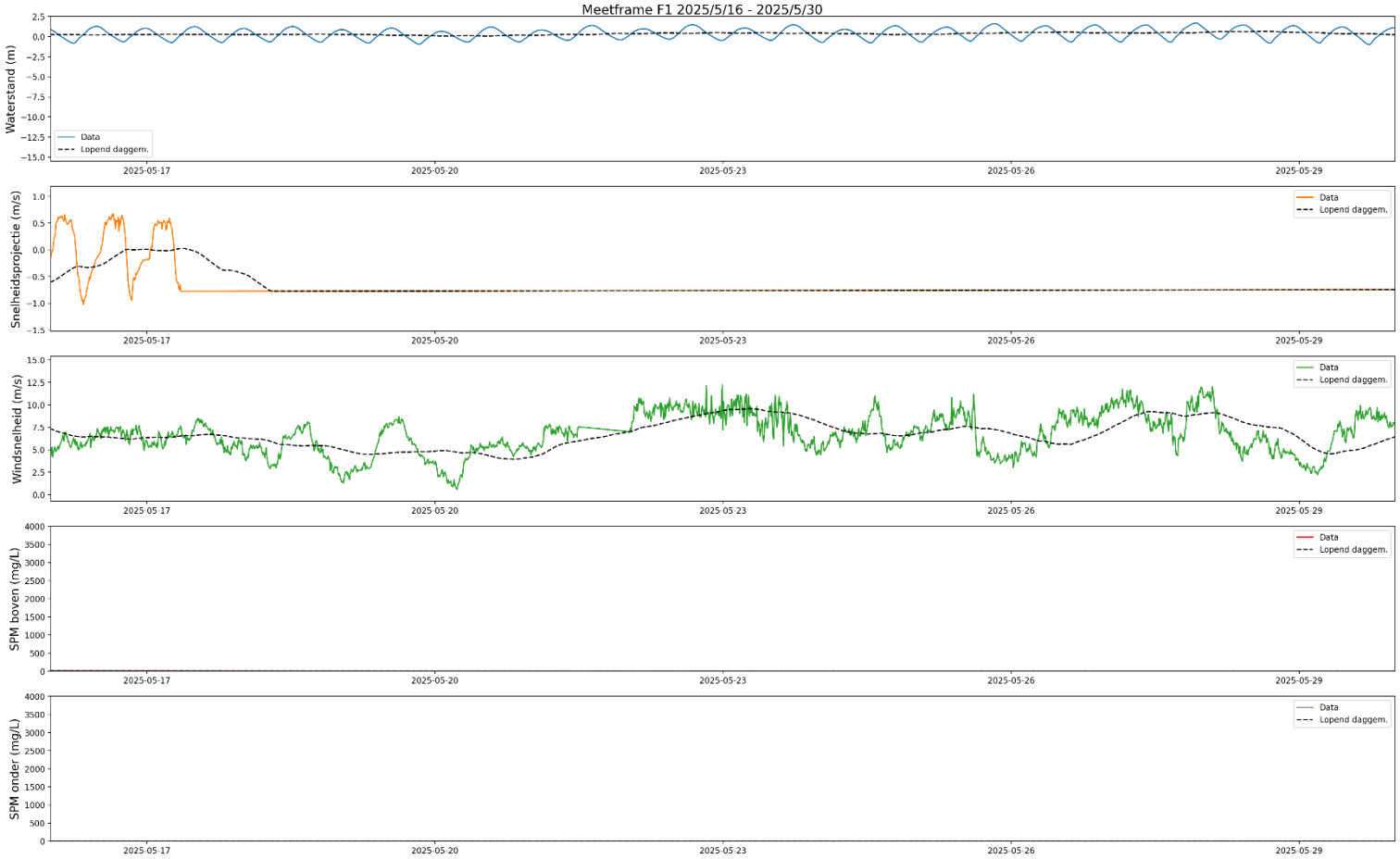
B.5.1 Voorjaar 2025



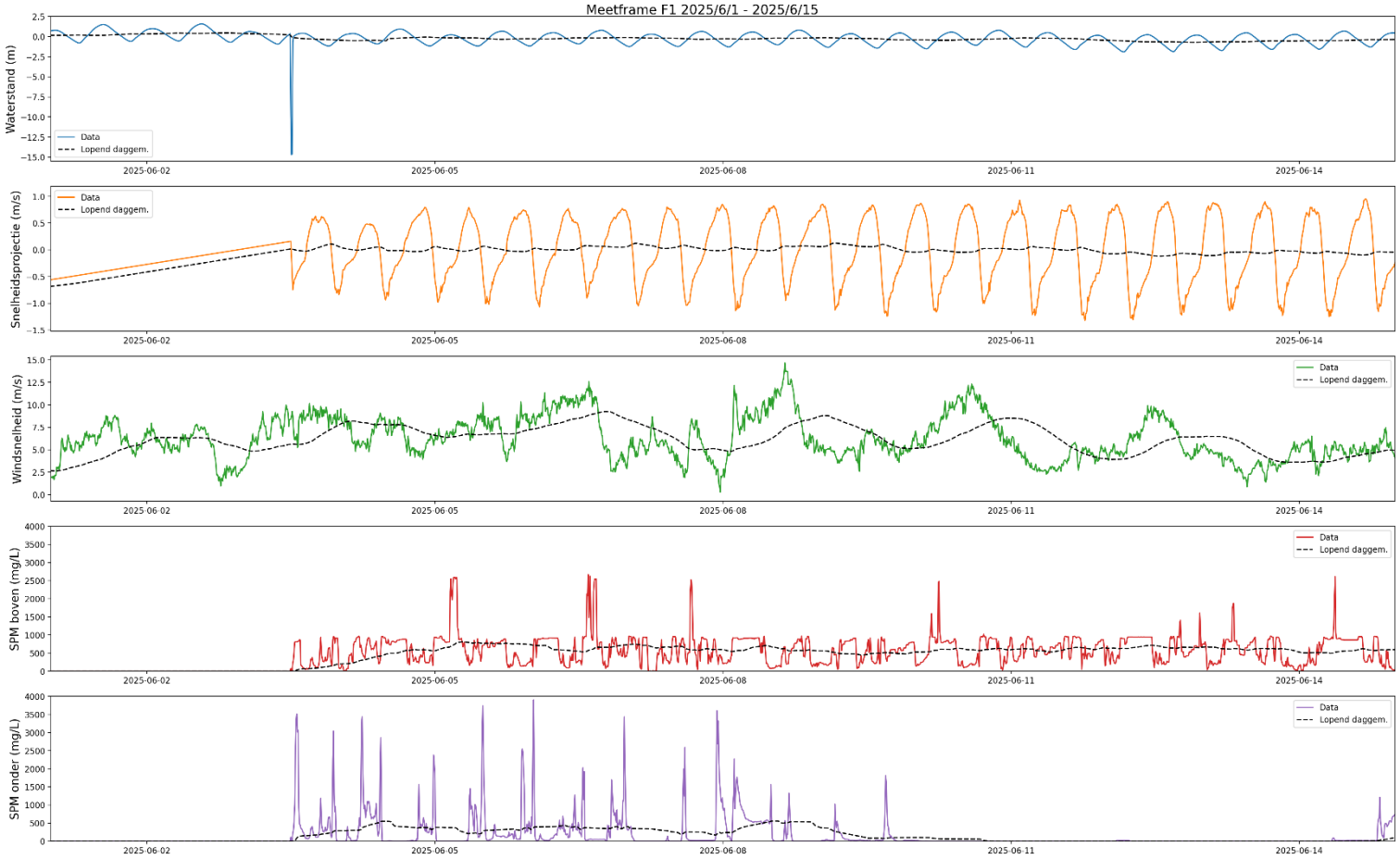
Figuur B-8: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Blauwe Slenk (F1) tussen 25 april en 30 april 2025 (T1-meetperiode).



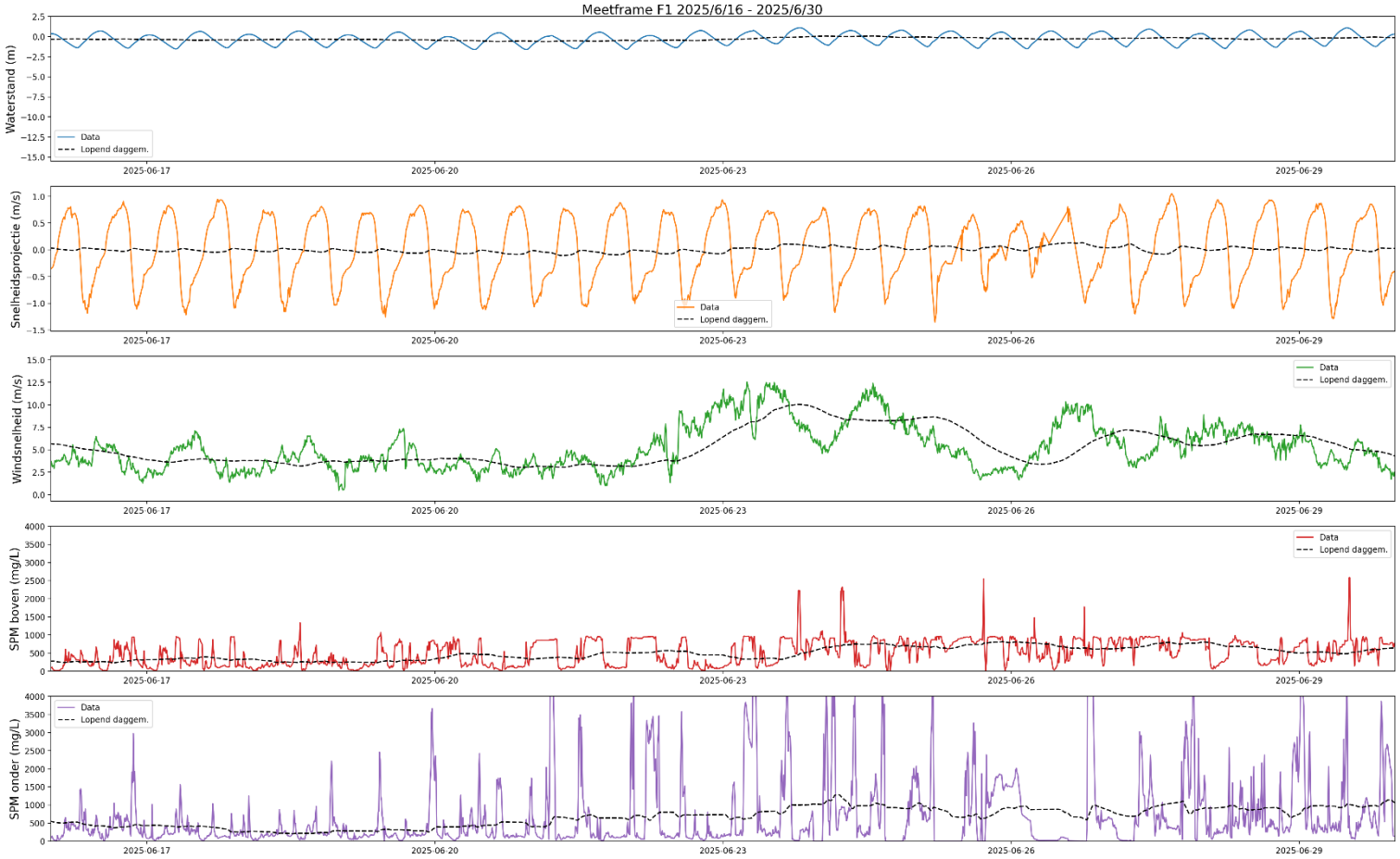
Figuur B-9: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Blauwe Slenk (F1) tussen 1 mei en 15 mei 2025 (T1-meetperiode).



Figuur B-10: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Blauwe Slenk (F1) tussen 15 mei en 30 mei 2025 (T1-meetperiode).



Figuur B-11: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Blauwe Slenk tussen 1 juni en 15 juni 2025 (T1-meetperiode).

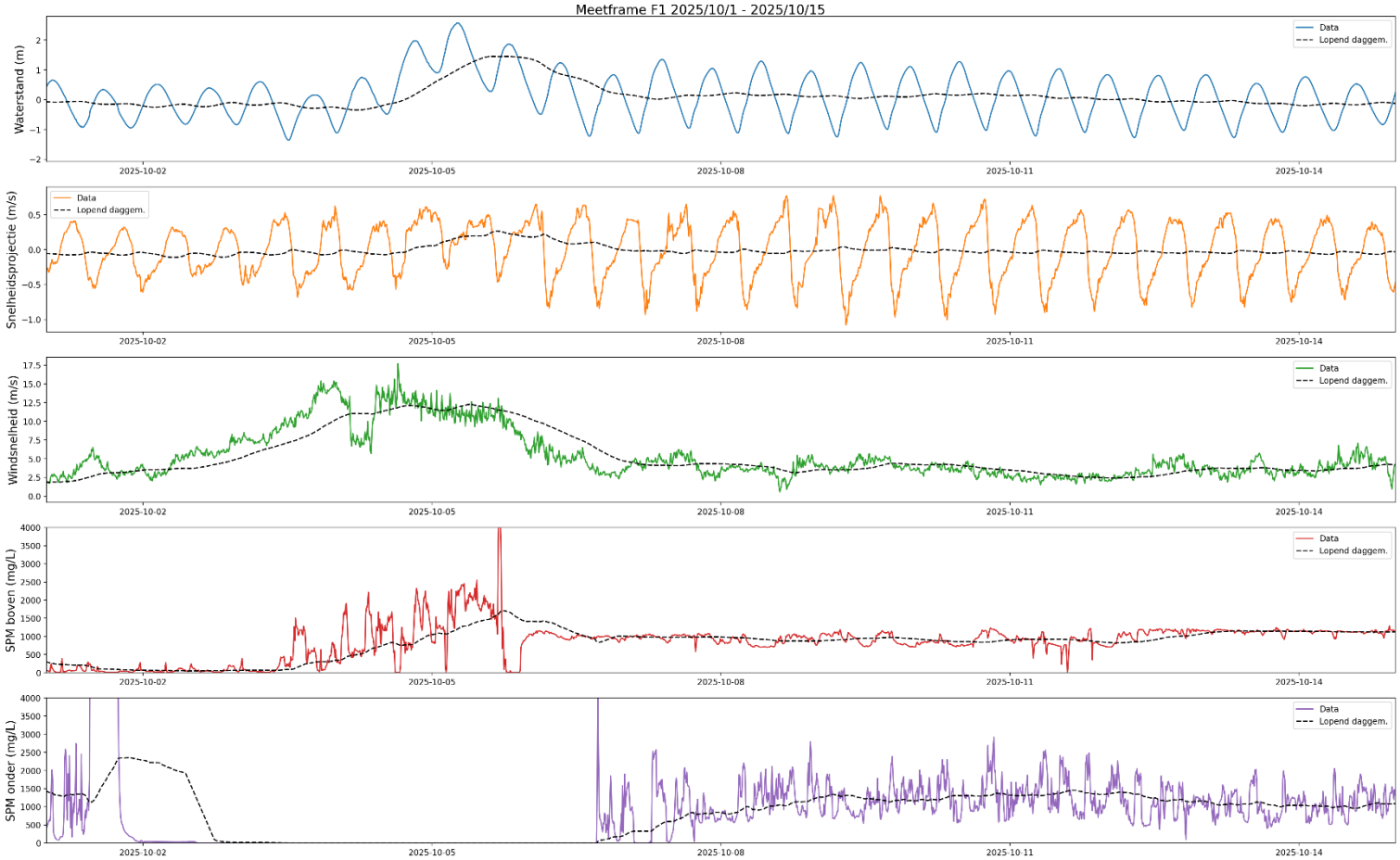


Figuur B-12: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Blauwe Slenk tussen 15 juni en 30 juni 2025 (T1-meetperiode).

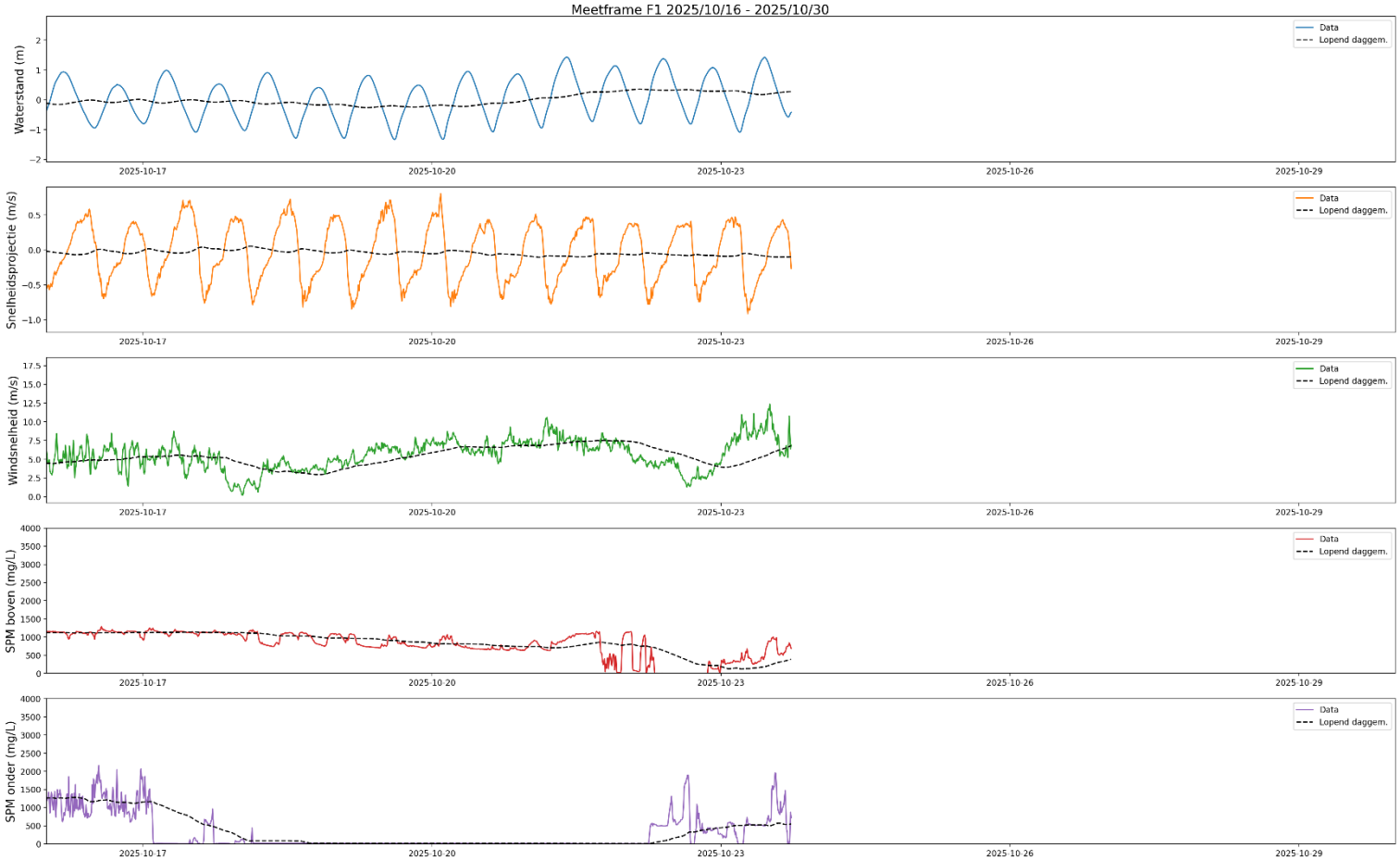
B.5.2 Najaar 2025



Figuur B-13: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Blauwe Slenk tussen 16 september en 30 september 2025 (T2-meetperiode).

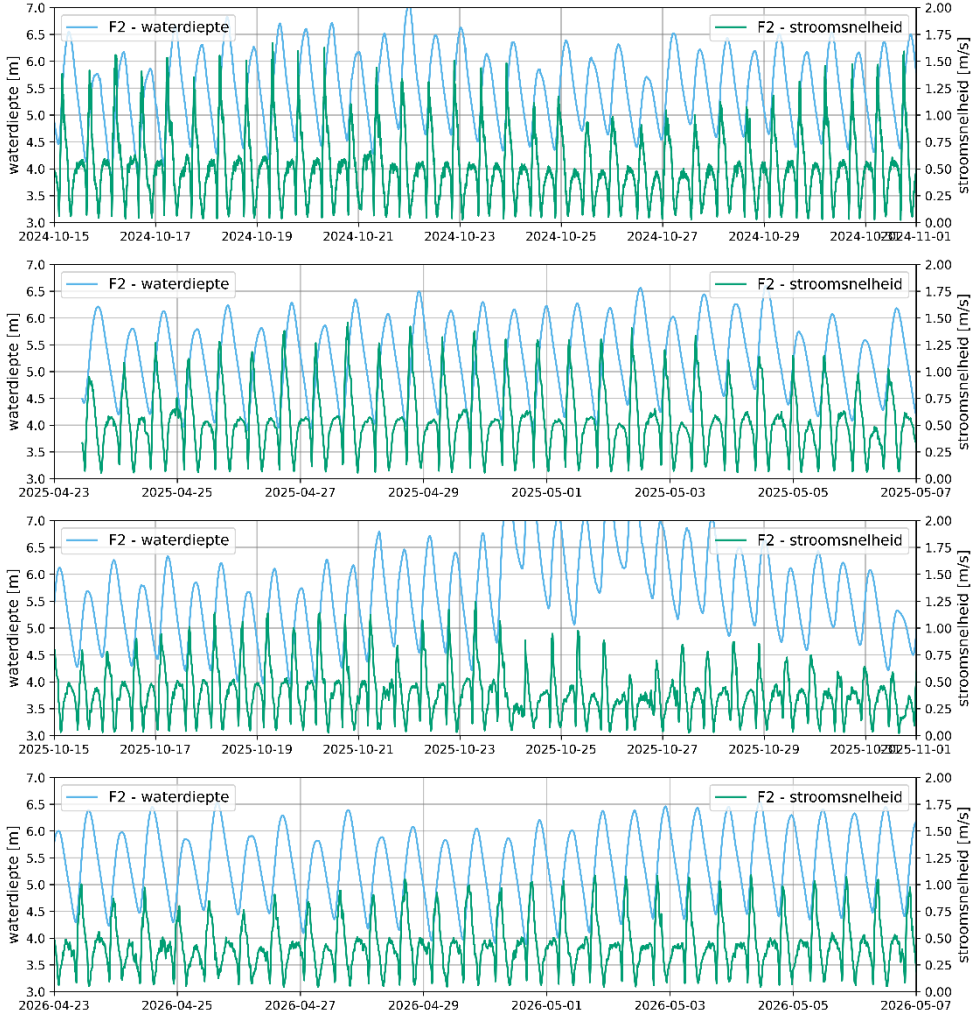


Figuur B-14: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Blauwe Slenk tussen 1 oktober en 15 oktober 2025 (T2-meetperiode).



Figuur B-15: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Blauwe Slenk tussen 15 oktober en 30 oktober 2025 (T2-meetperiode). Merk op dat er na 25 oktober geen data beschikbaar is voor dit meetframe in de T2-meetperiode.

B.6 Kimstergat

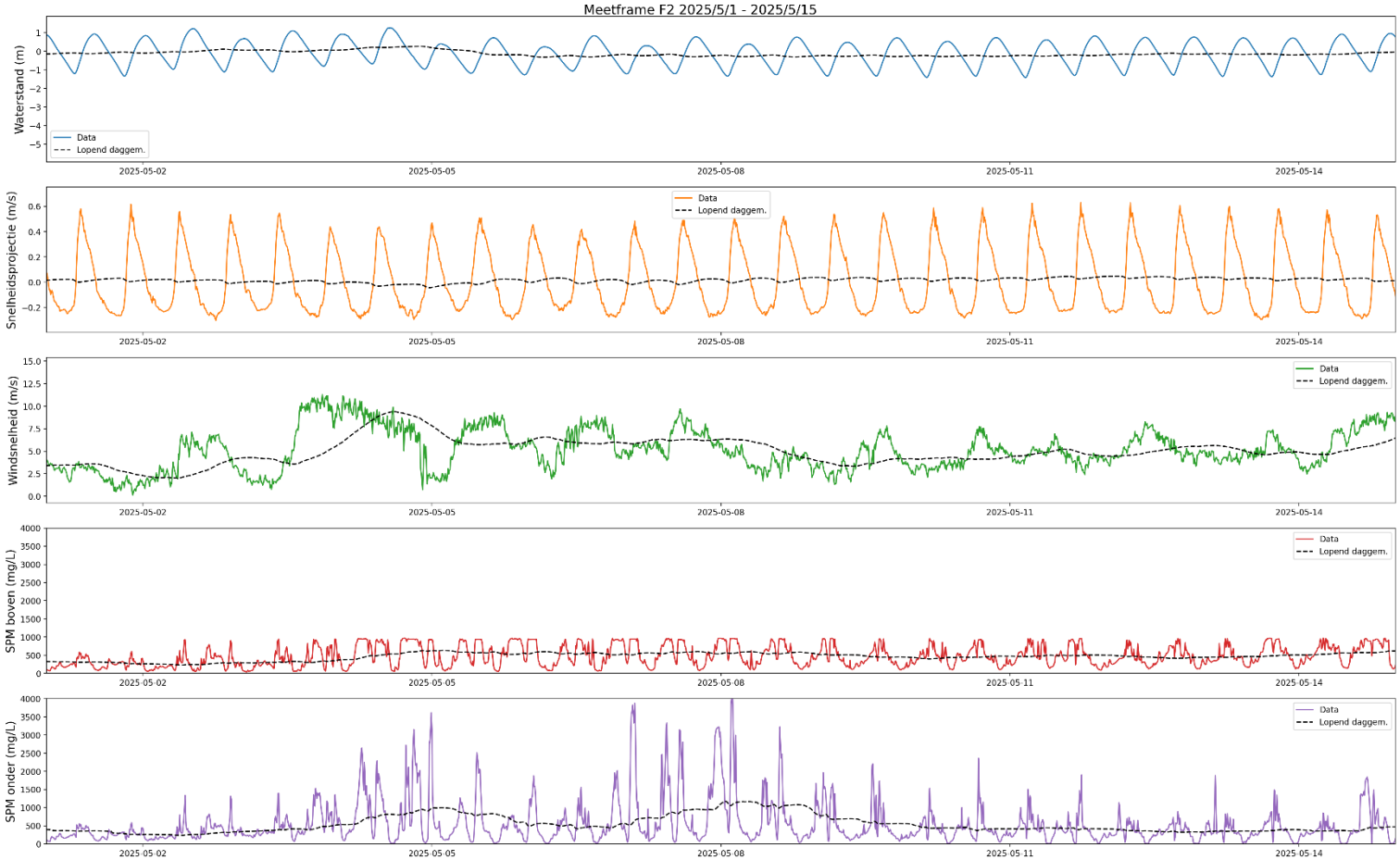


Figuur B-18: Tijdreeksen voor waterdiepte (blauw, linker y-as) en stroomsnelheid (groen, rechter y-as) voor meetframe Kimstergat (F2). Van boven naar beneden worden meetperiodes T0, T1, T2 en T3 getoond.

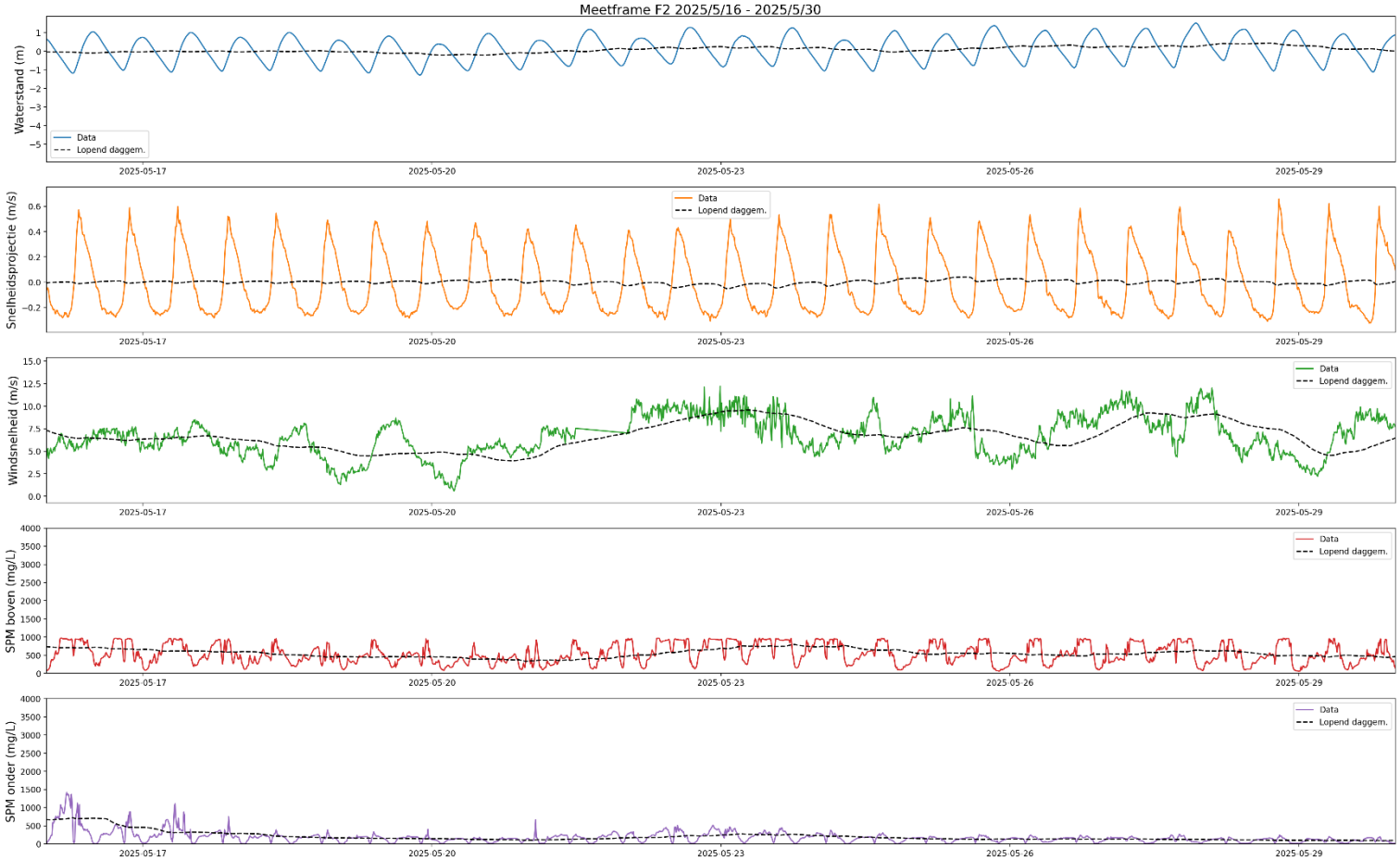
B.6.1 Voorjaar 2025



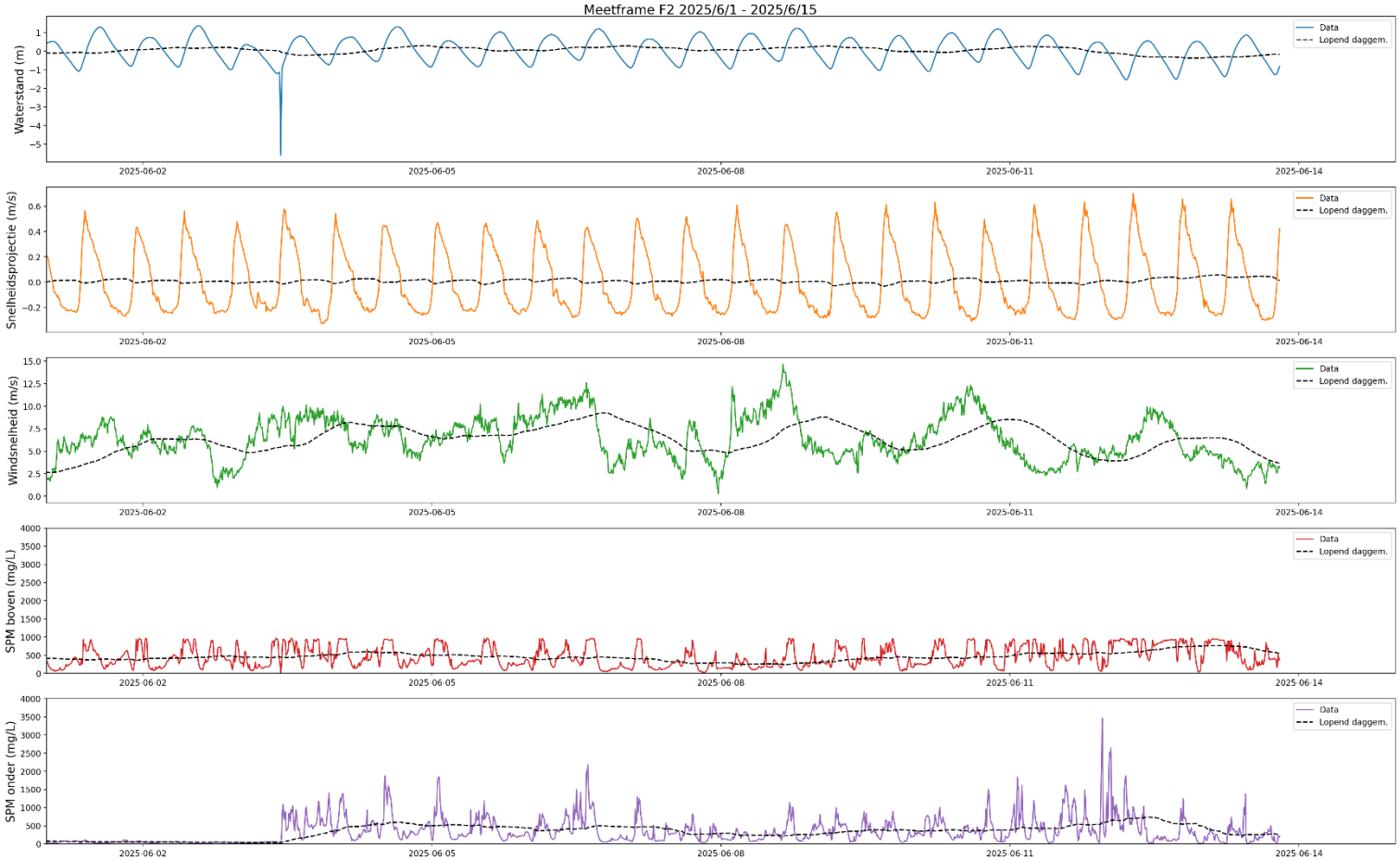
Figuur B-19: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 16 april en 30 april 2025 (T1-meetperiode).



Figuur B-20: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 1 mei en 15 mei 2025 (T1-meetperiode).

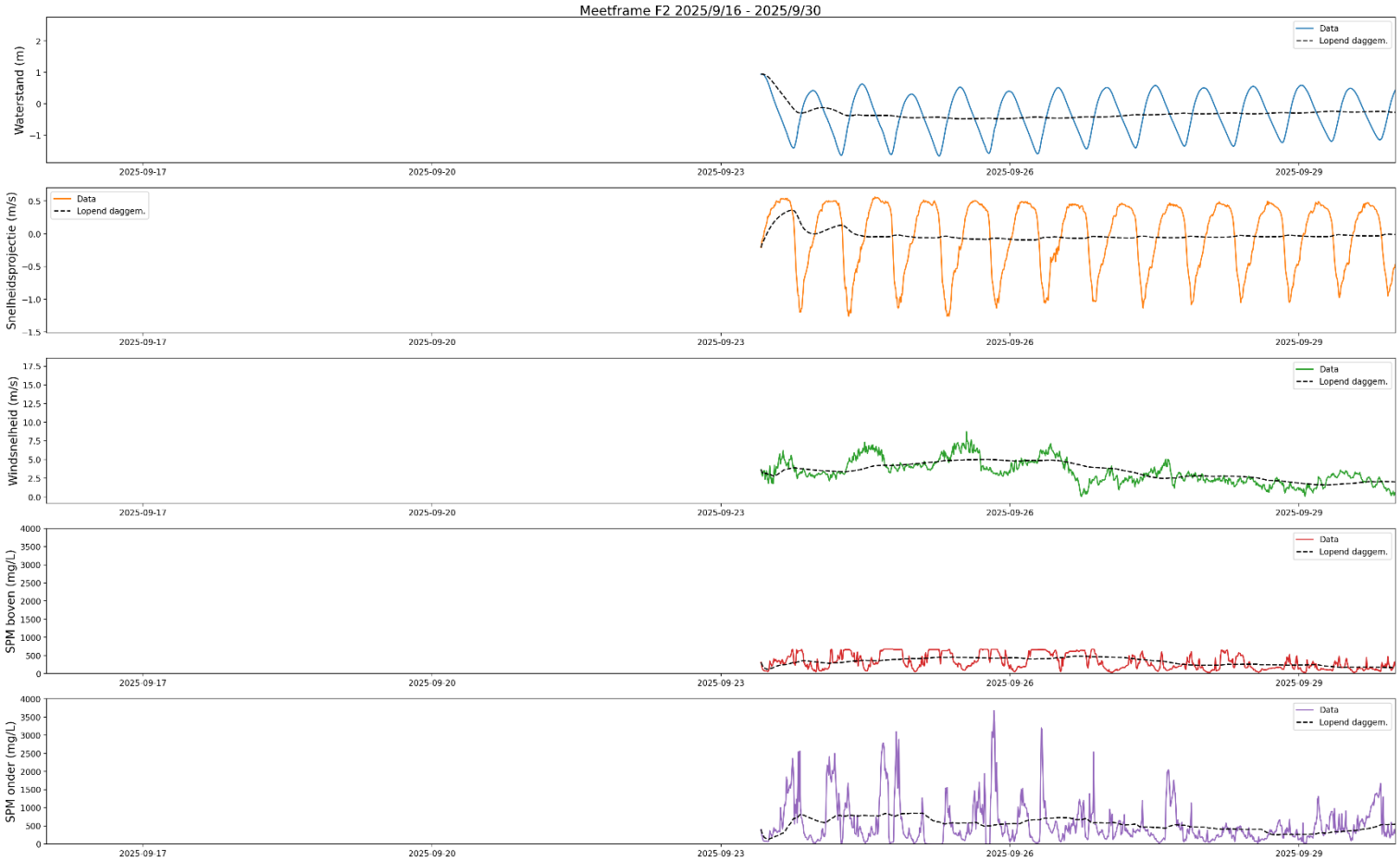


Figuur B-21: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 16 mei en 30 mei 2025 (T1-meetperiode).

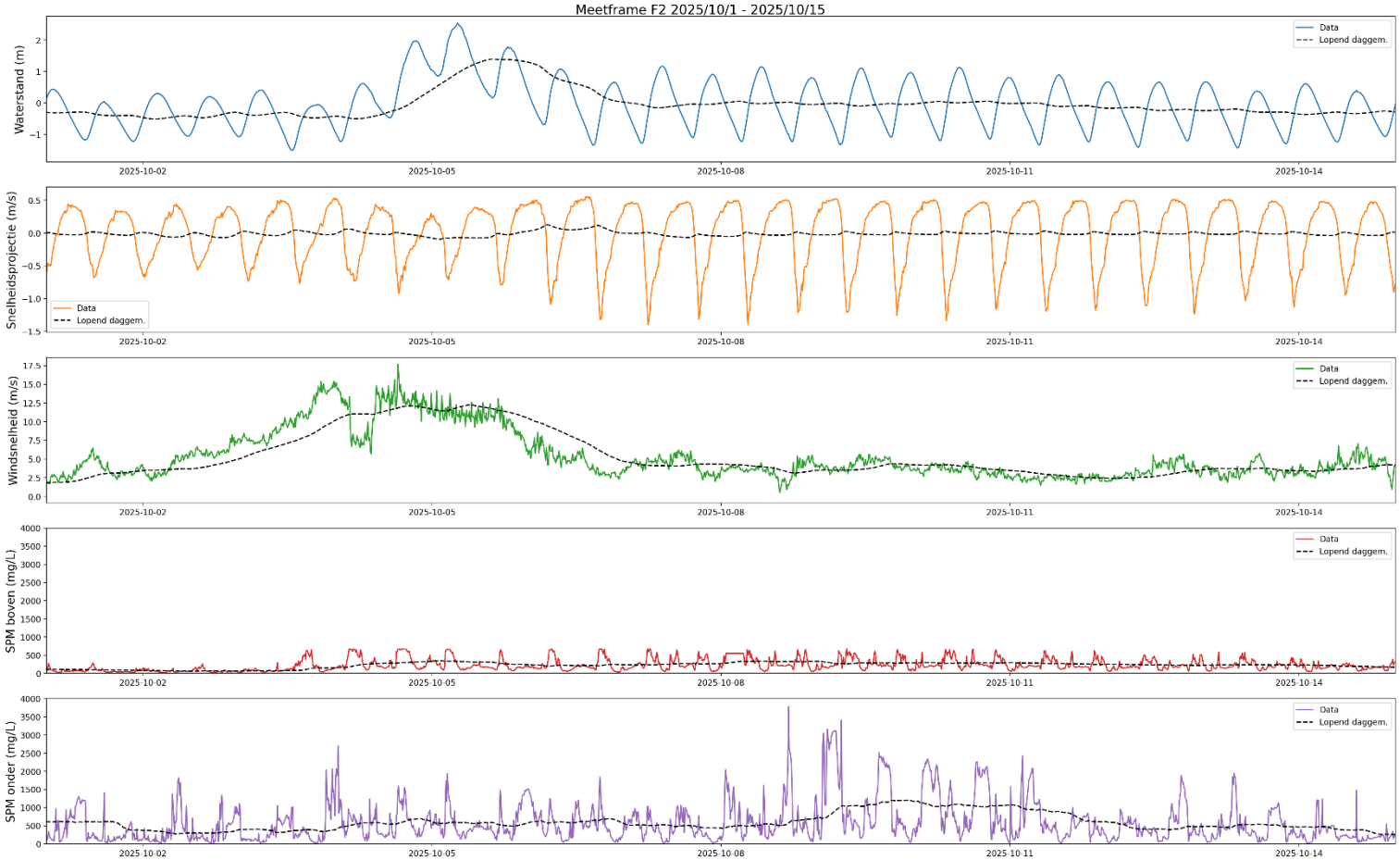


Figuur B-13: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 1 juni en 15 juni 2025 (T1-meetperiode).

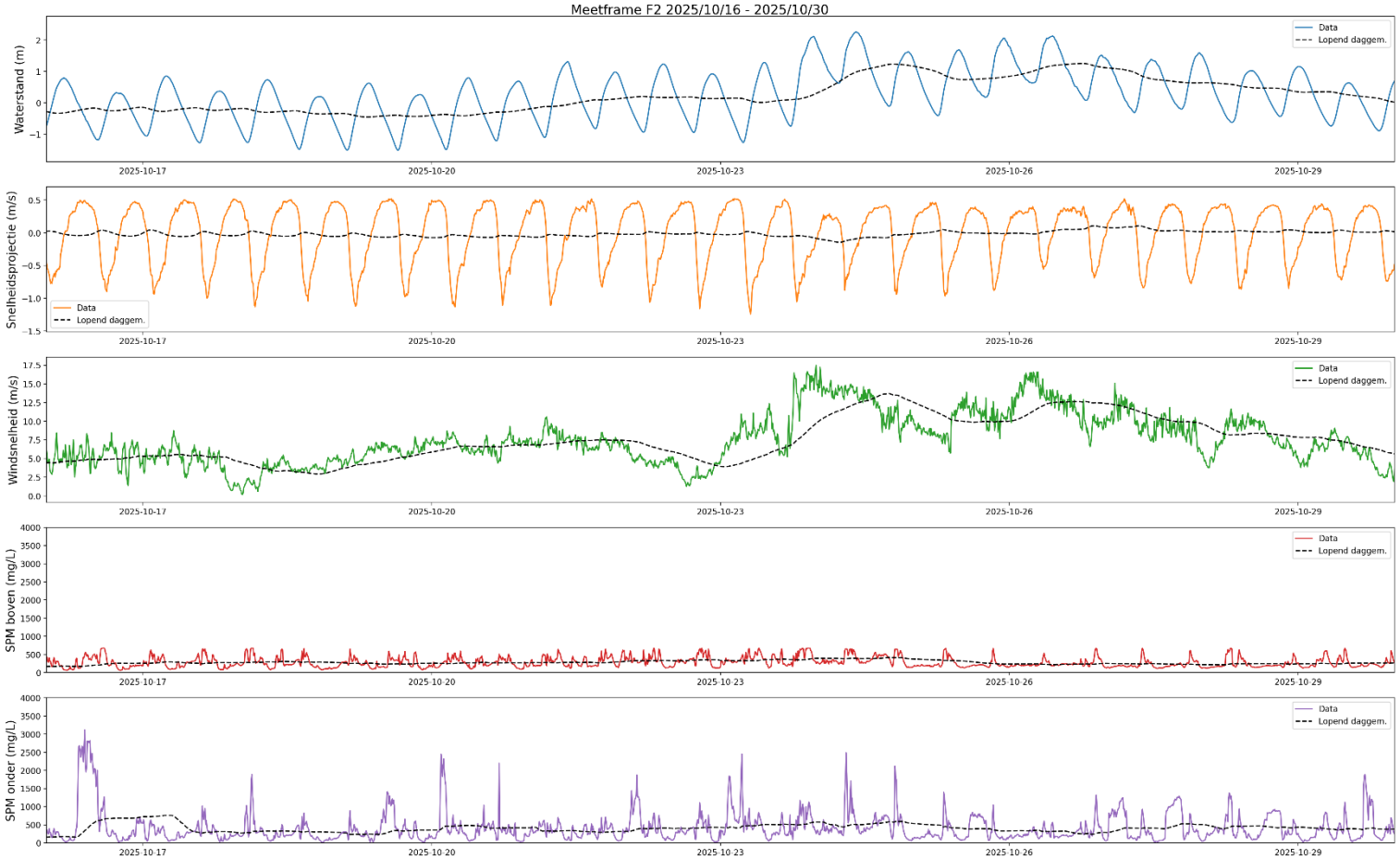
B.6.2 Najaar 2025



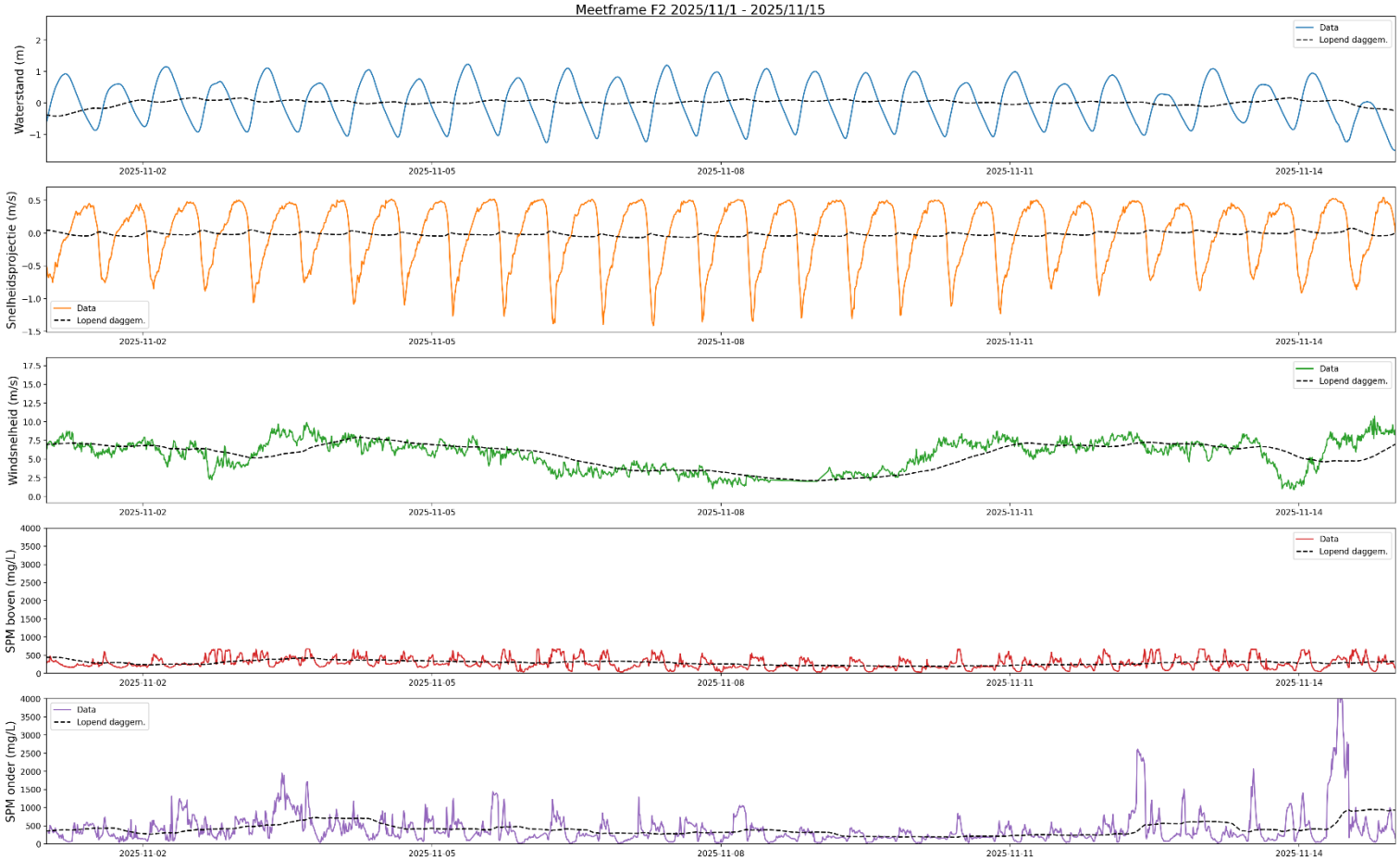
Figuur B-14: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 16 september en 30 september 2025 (T2-meetperiode).



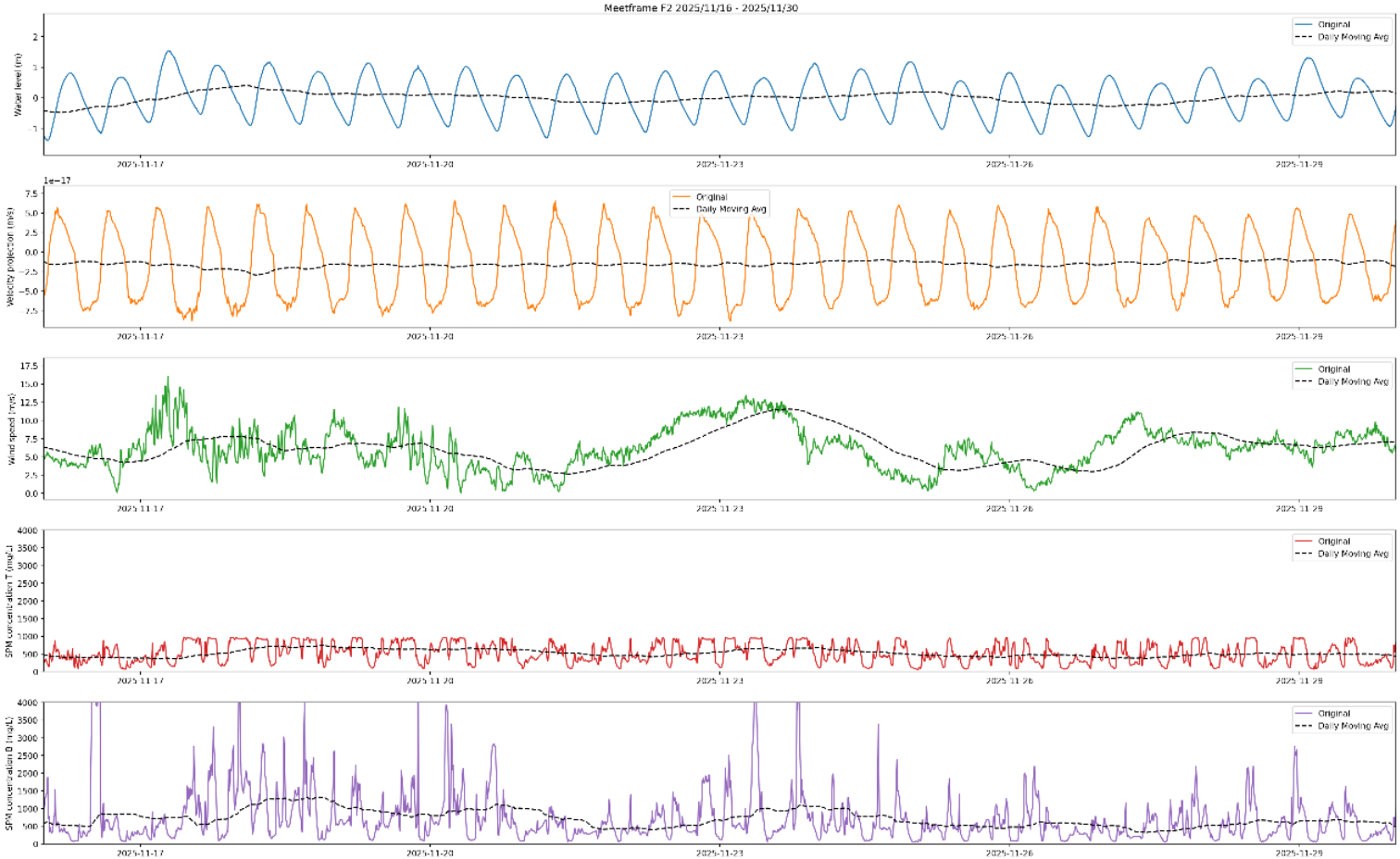
Figuur B-15: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 1 oktober en 15 oktober 2025 (T2-meetperiode).



Figuur B-16: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 16 oktober en 30 oktober 2025 (T2-meetperiode).



Figuur B-17: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 1 november en 15 november 2025 (T2-meetperiode).

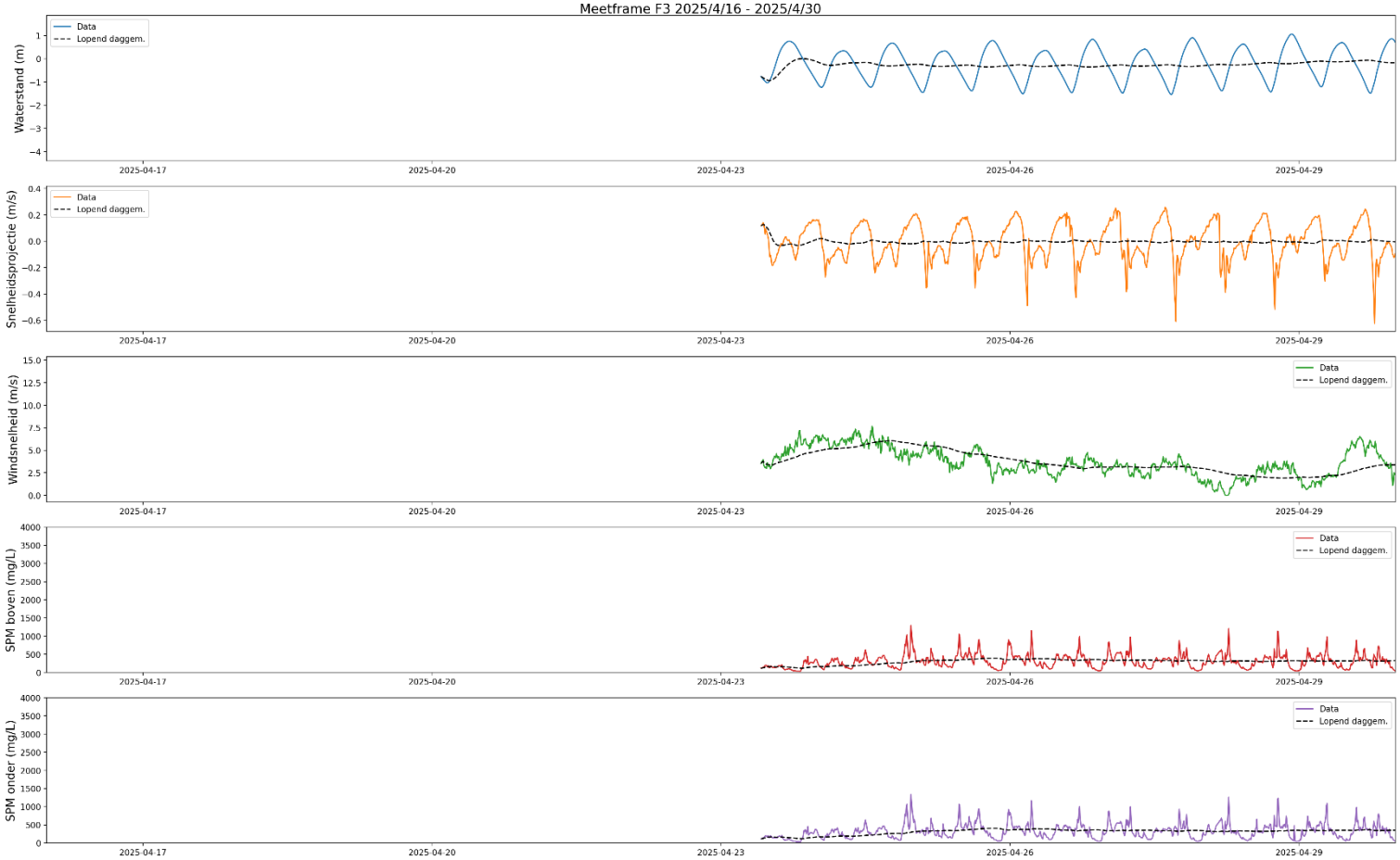


Figuur B-18: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Kimstergat tussen 16 november en 30 november 2025 (T2-meetperiode).

B.7 Boontjes Noord

Tijdreeksen voor waterdiepte en stroomsnelheid voor meetframe Boontjes Noord (F3) voor de verschillende meetperiodes zijn opgenomen in het hoofdrapport (Figuur 5-2).

B.7.1 Voorjaar 2025



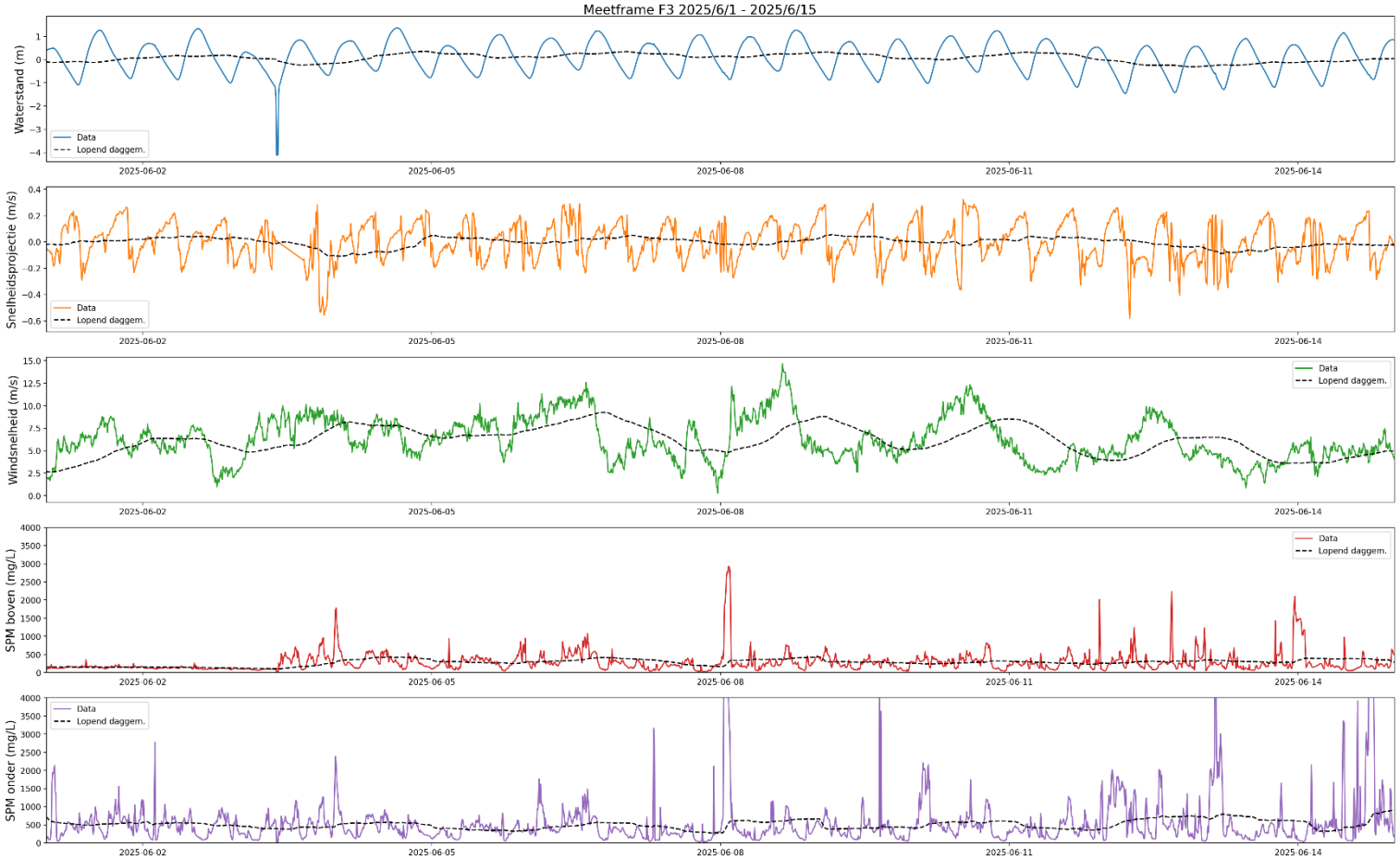
Figuur B-19: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 23 april en 30 april 2025 (T1-meetperiode).



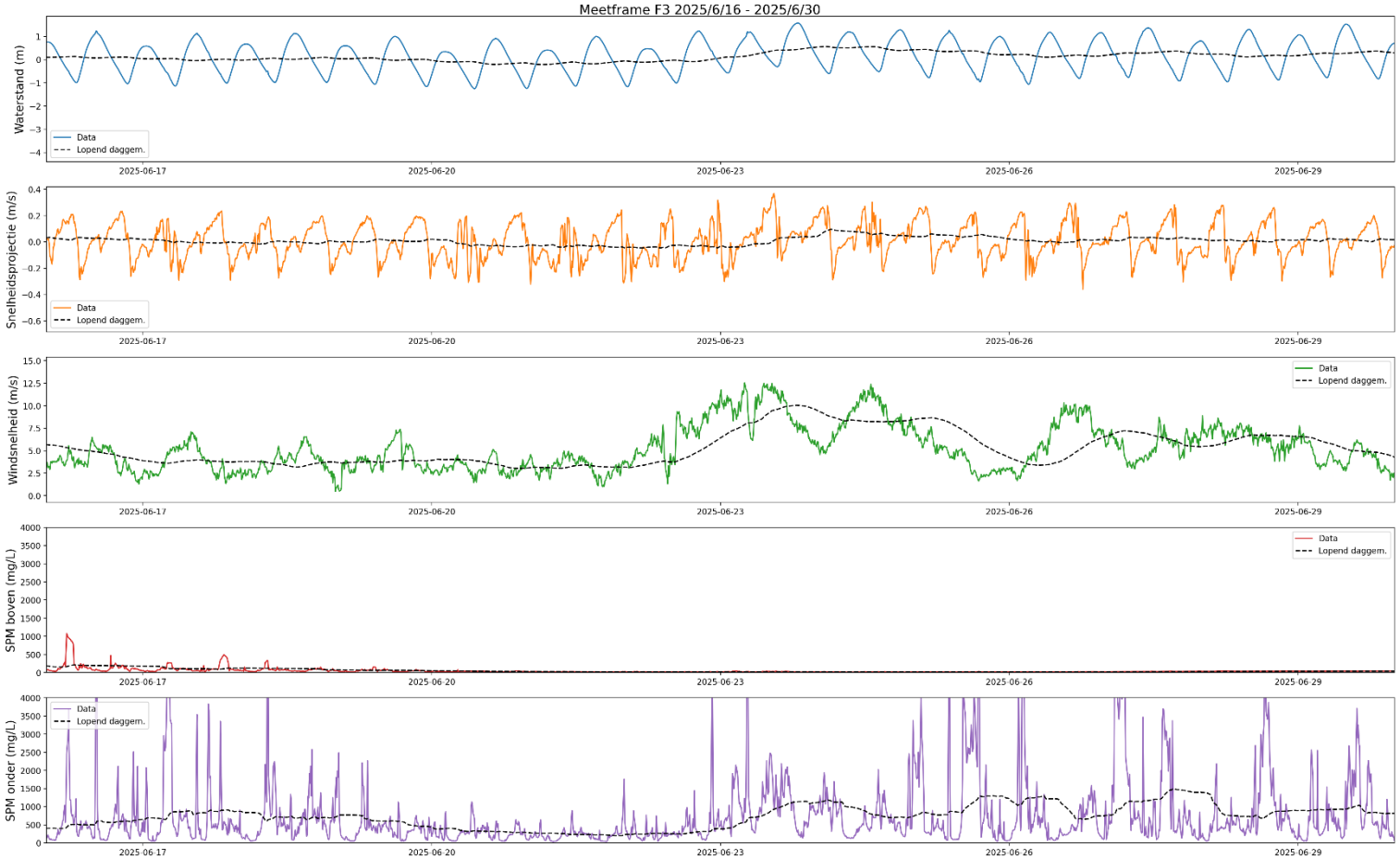
Figuur B-20: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 1 mei en 15 mei 2025 (T1-meetperiode).



Figuur B-21: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 16 mei en 30 mei 2025 (T1-meetperiode).

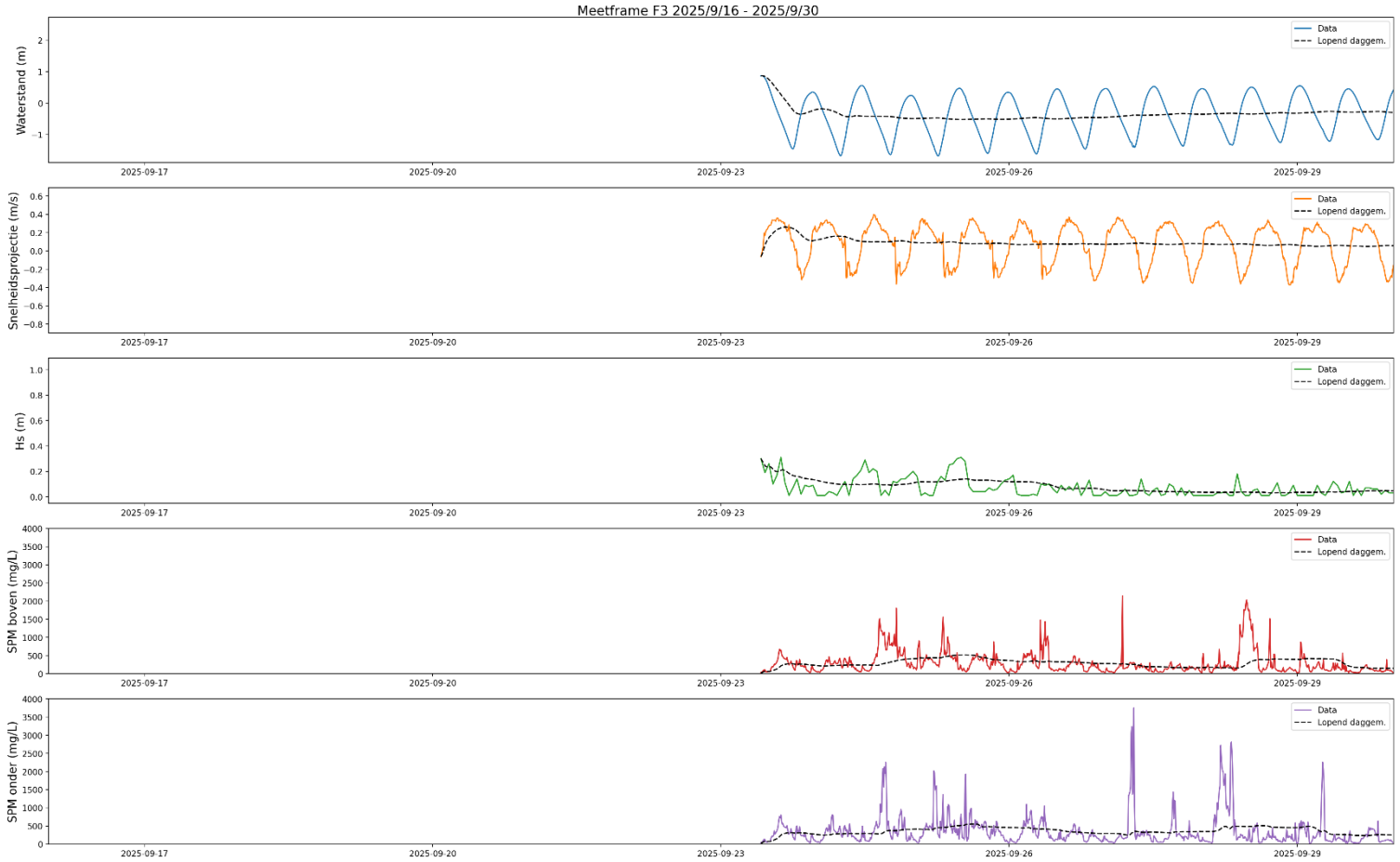


Figuur B-22: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 1 juni en 15 juni 2025 (T1-meetperiode).

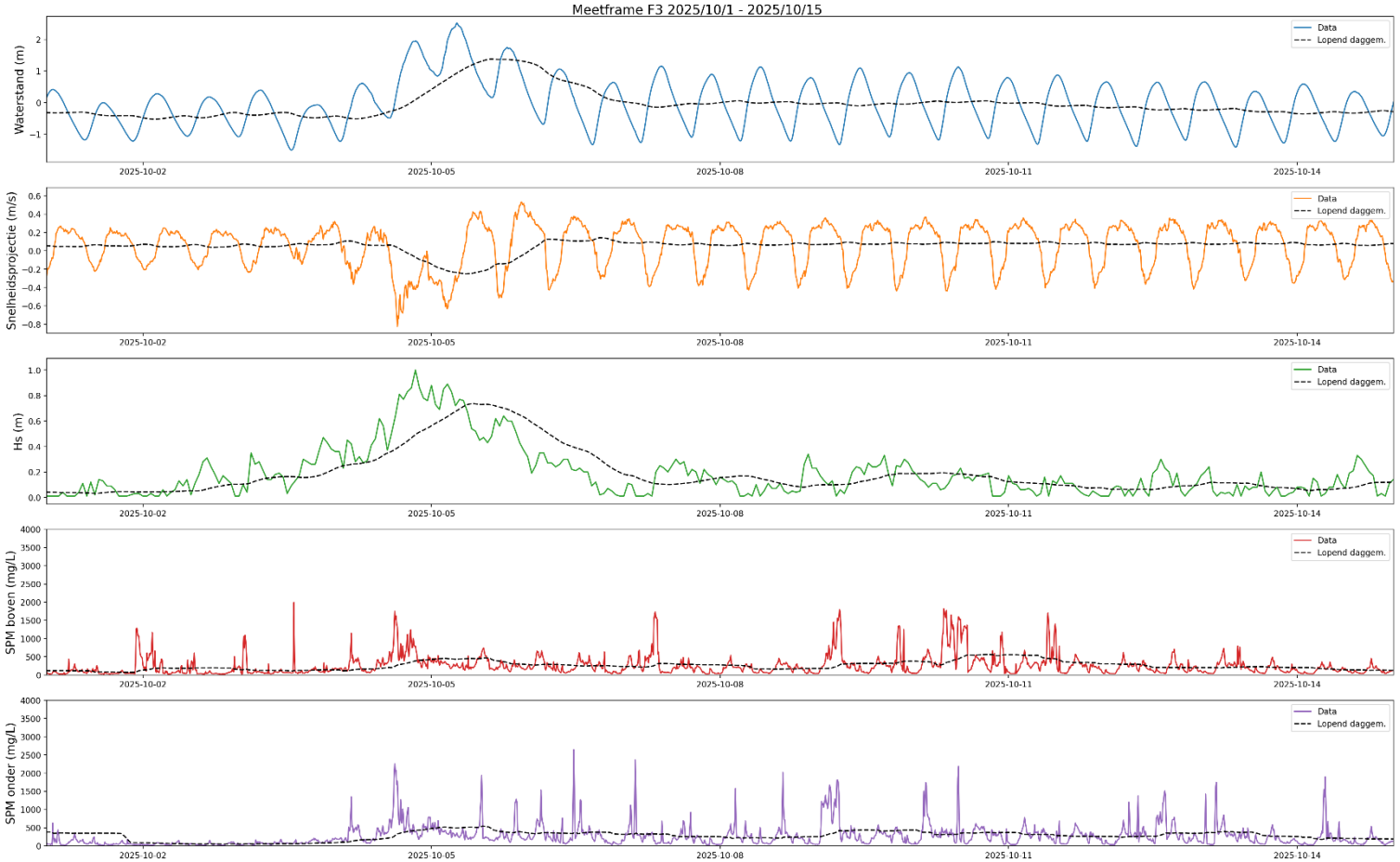


Figuur B-23: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 16 juni en 30 juni 2025 (T1-meetperiode).

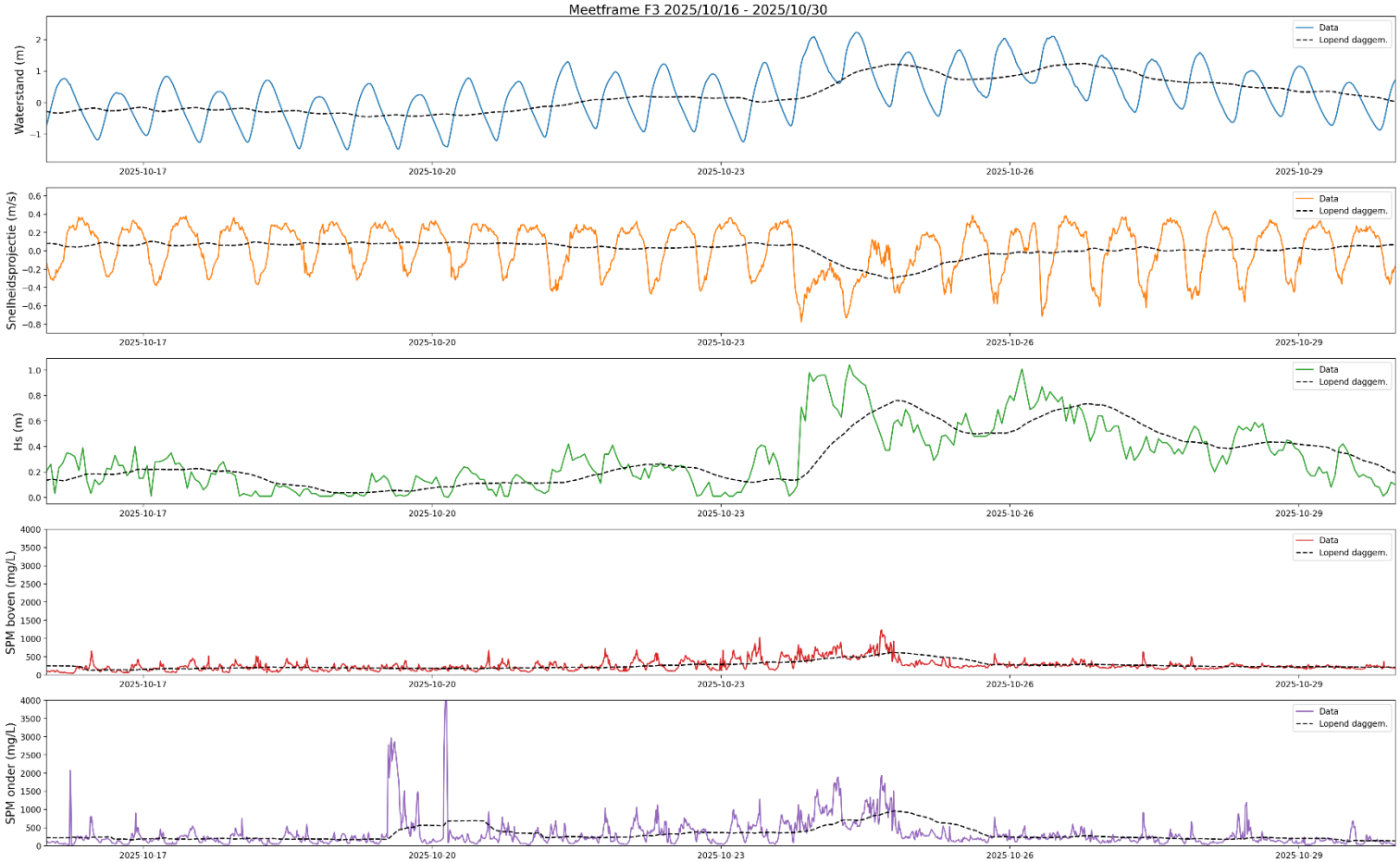
B.7.2 Najaar 2025



Figuur B-24: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 16 september en 30 september 2025 (T2-meetperiode).



Figuur B-25: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 1 oktober en 15 oktober 2025 (T2-meetperiode).



Figuur B-26: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 16 oktober en 30 oktober 2025 (T2-meetperiode).

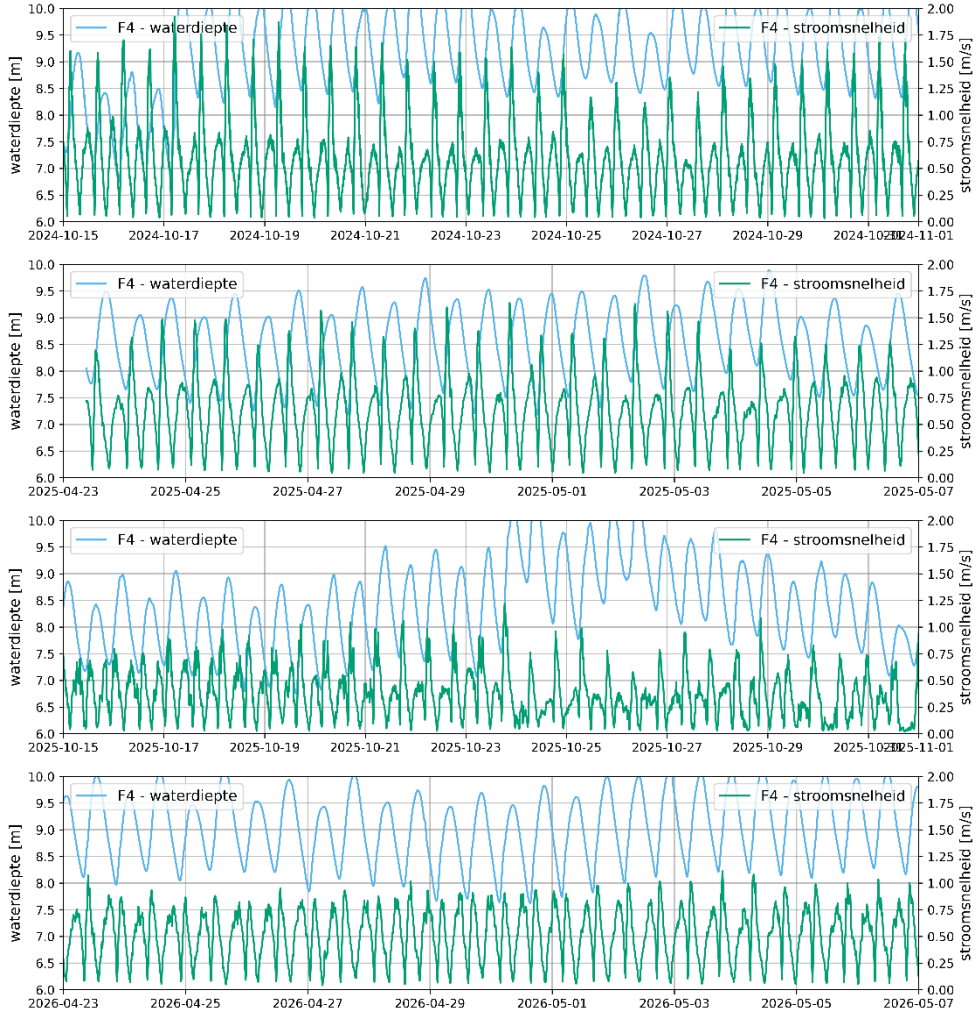


Figuur B-27: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 1 november en 15 november 2025 (T2-meetperiode).



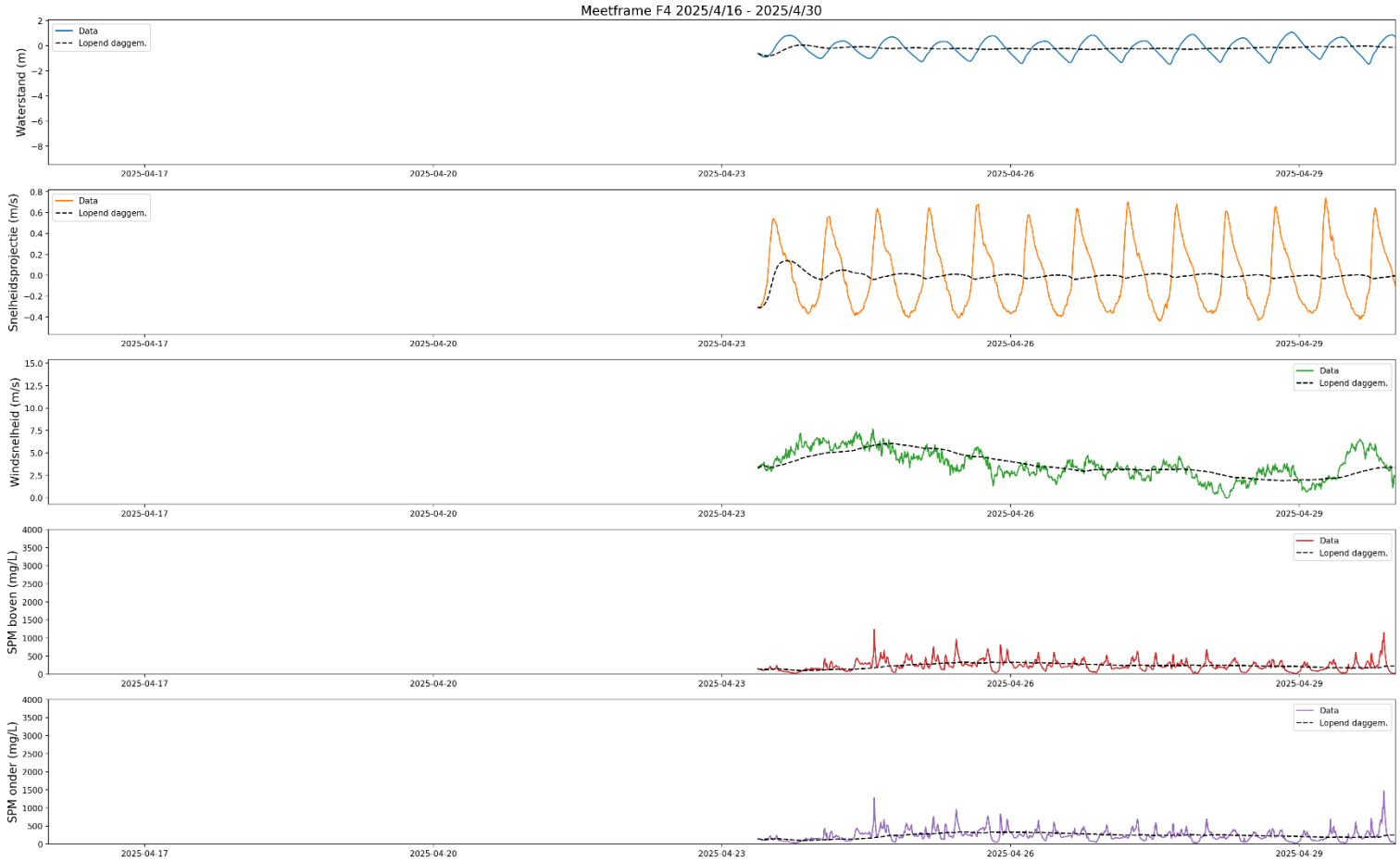
Figuur B-28: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Noord tussen 16 november en 30 november 2025 (T2-meetperiode).

B.8 Boontjes Zuid

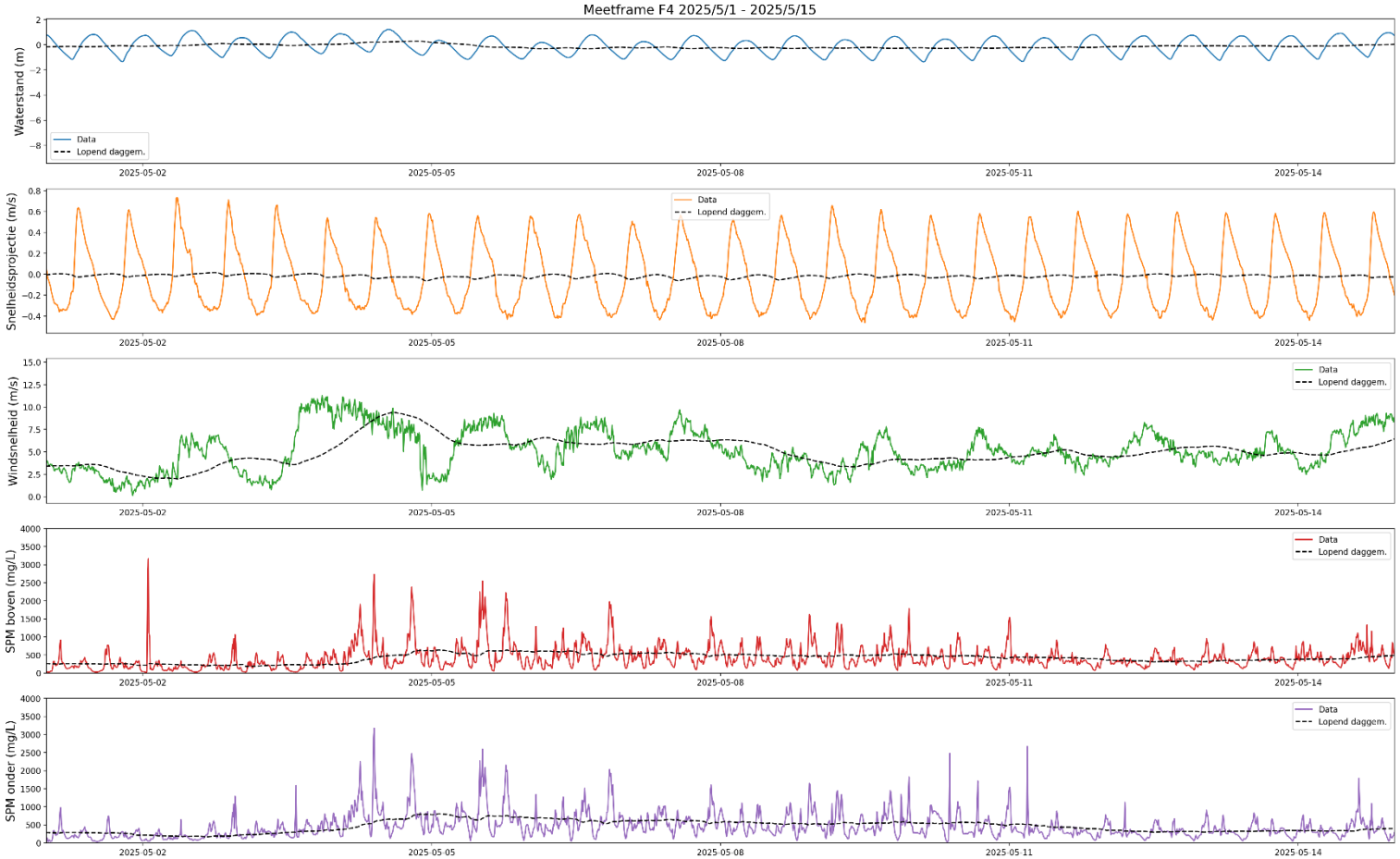


Figuur B-29: Tijdreeksen voor waterdiepte (blauw, linker y-as) en stroomsnelheid (groen, rechter y-as) voor meetframe Boontjes Zuid (F4). Van boven naar beneden worden meetperiodes T0, T1, T2 en T3 getoond.

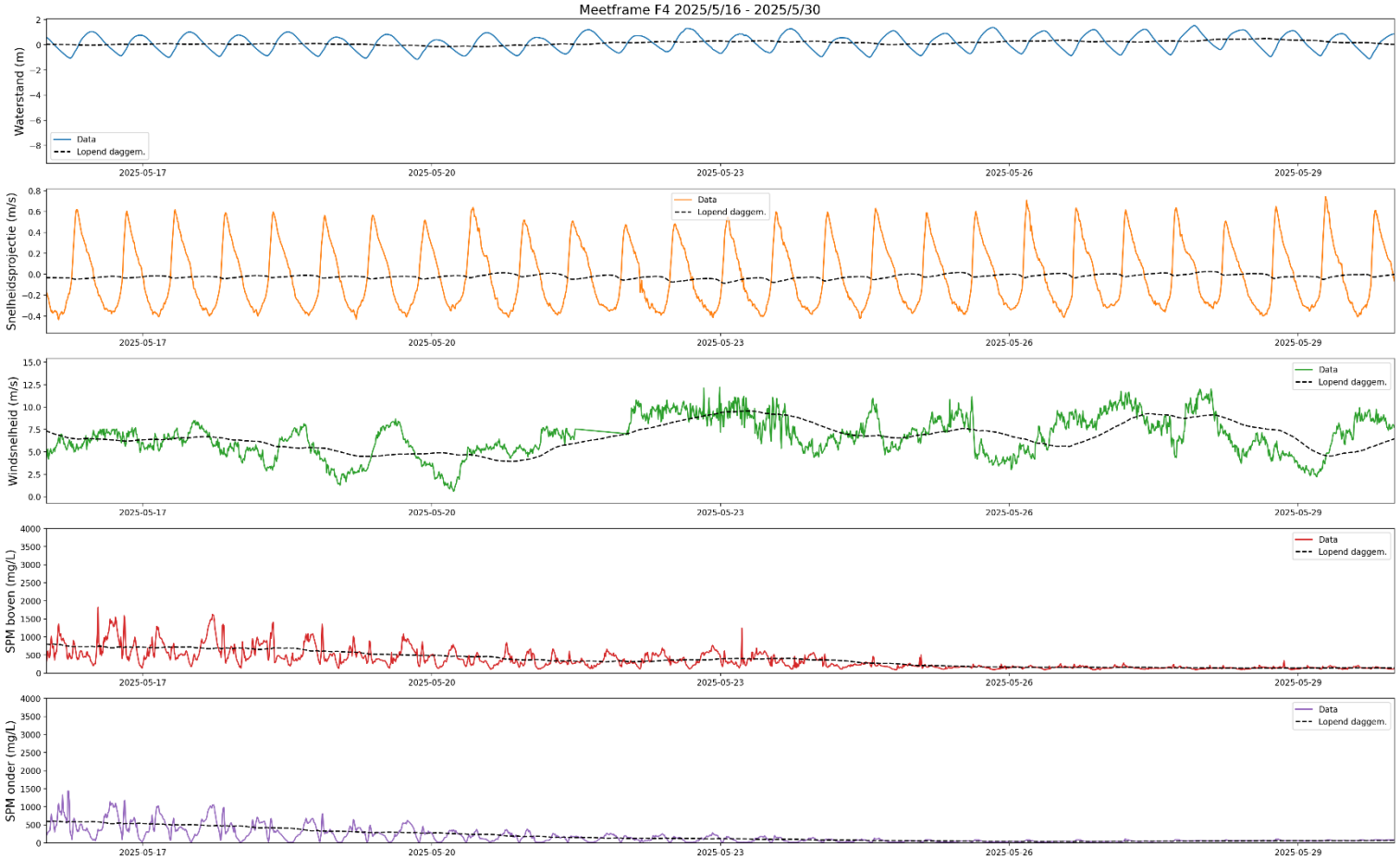
B.8.1 Voorjaar 2025



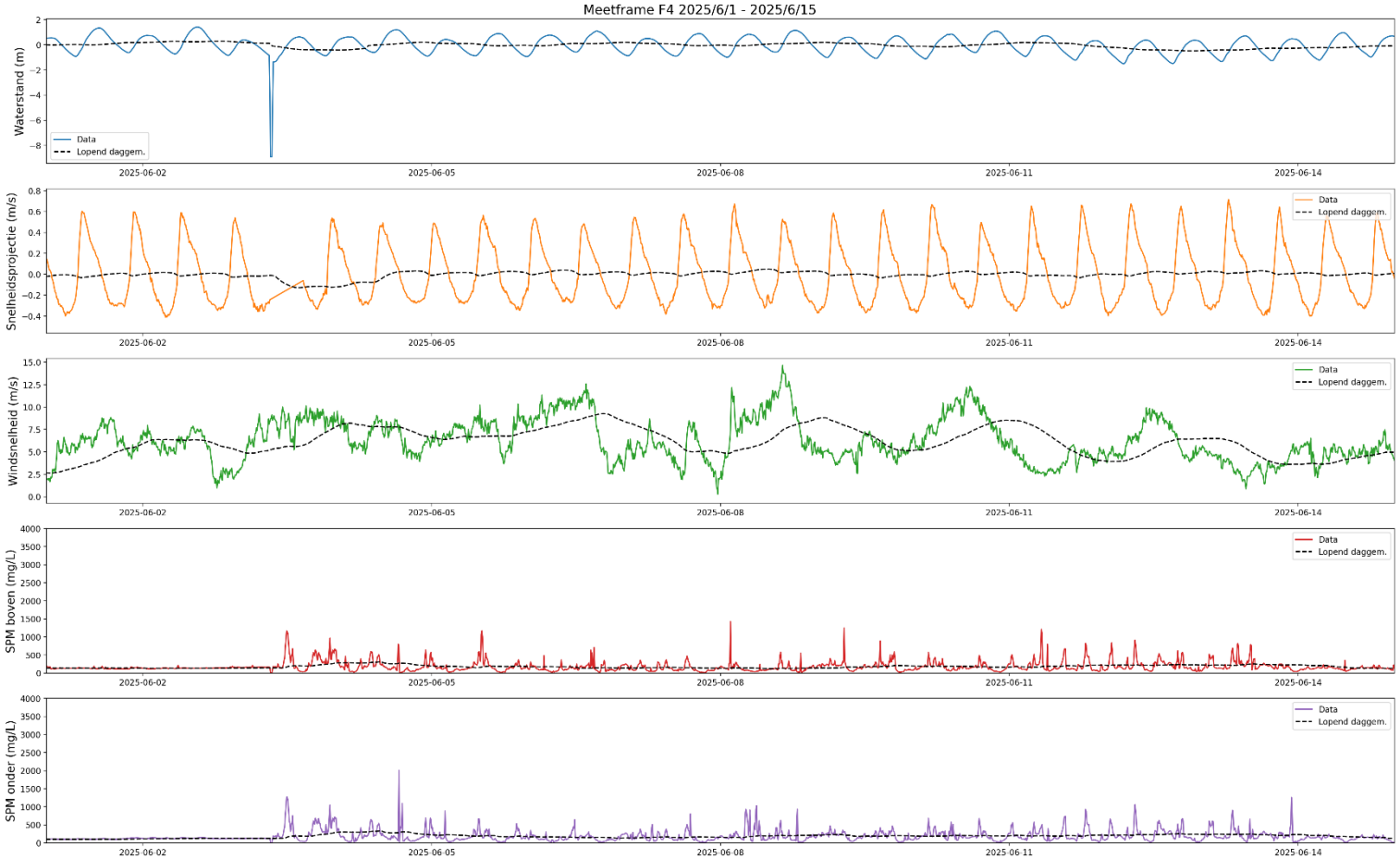
Figuur B-30: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 23 april en 30 april 2025 (T1-meetperiode).



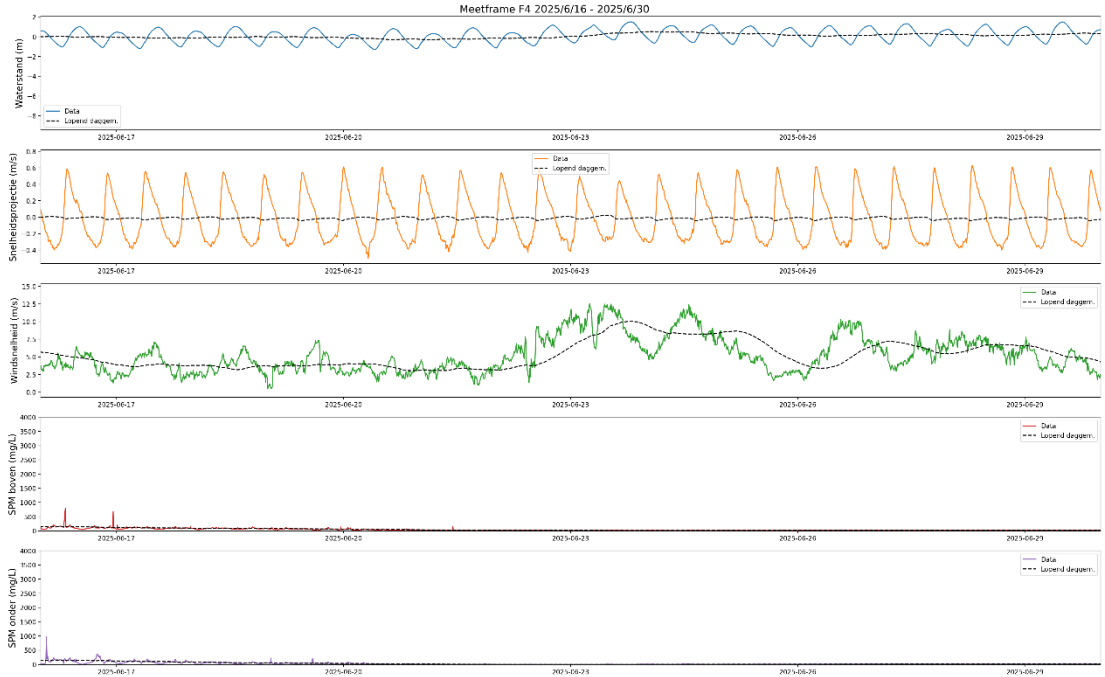
Figuur B-31: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 1 mei en 15 mei 2025 (T1-meetperiode).



Figuur B-32: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 16 mei en 30 mei 2025 (T1-meetperiode).

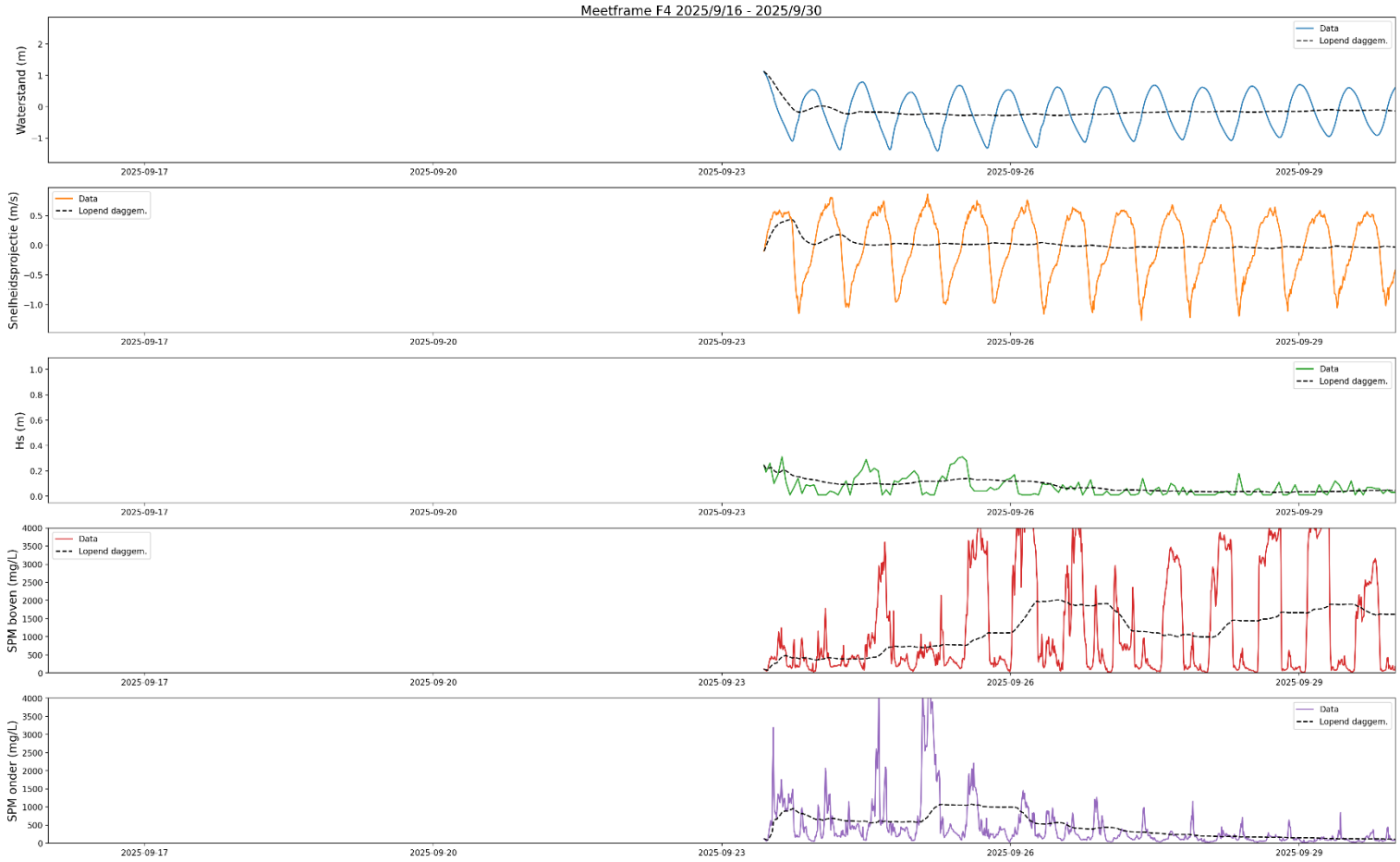


Figuur B-33: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 1 juni en 15 juni 2025 (T1-meetperiode).



Figuur B-34: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), windsnelheid (m/s), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 16 juni en 30 juni 2025 (T1-meetperiode).

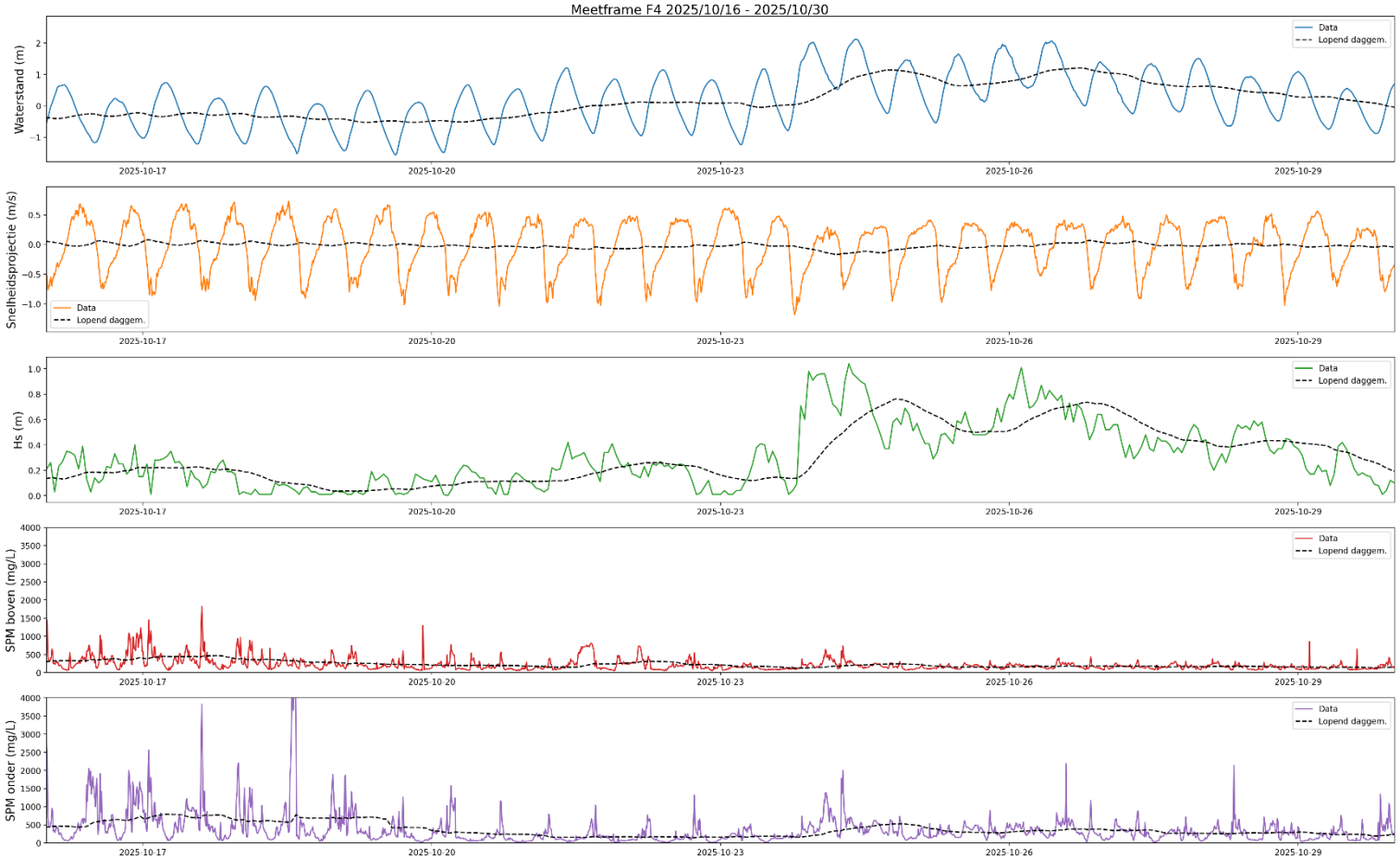
B.8.2 Najaar 2025



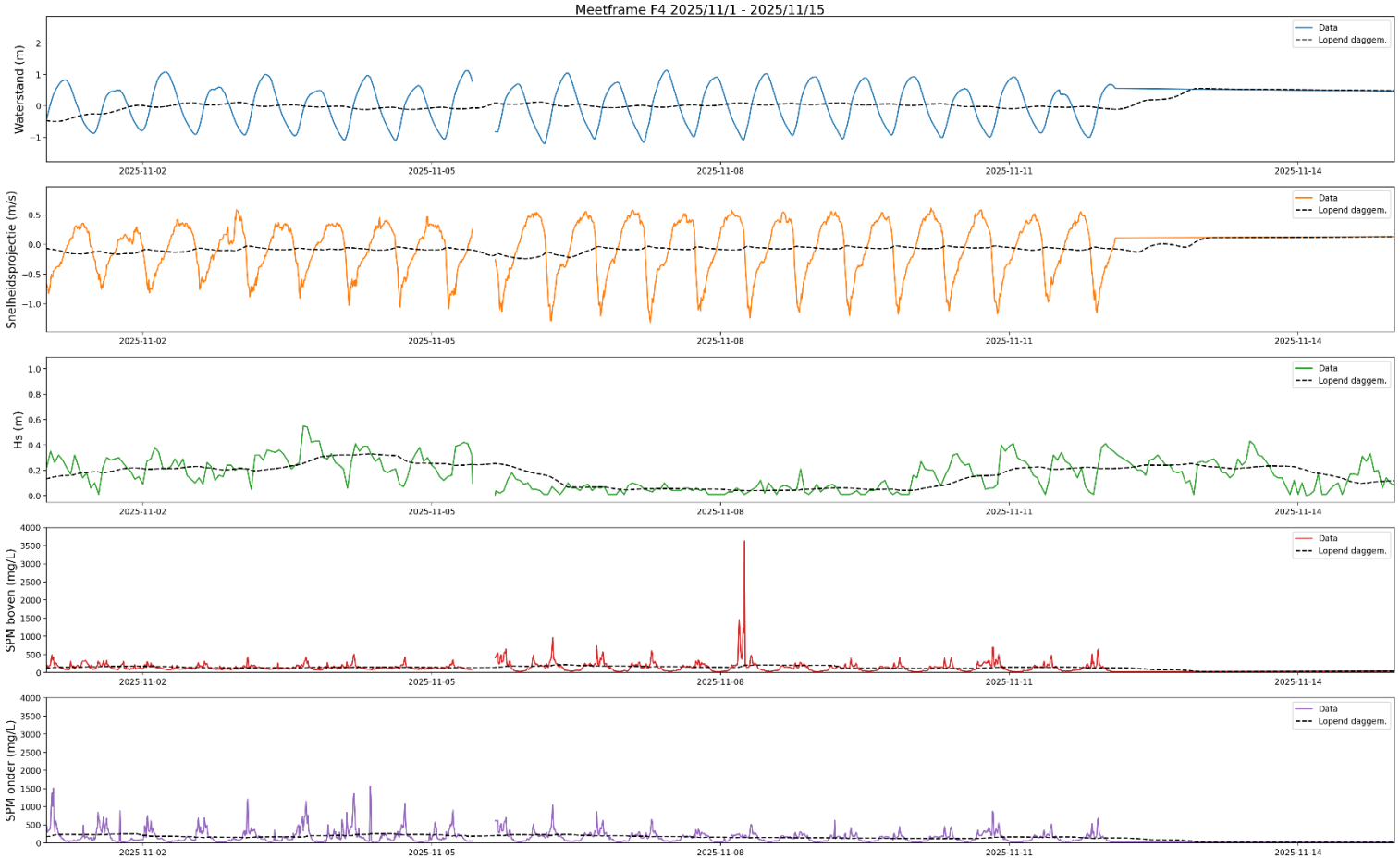
Figuur B-35: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 16 september en 30 september 2025 (T2-meetperiode).



Figuur B-36: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 1 oktober en 15 oktober 2025 (T2-meetperiode).



Figuur B-37: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 16 oktober en 30 oktober 2025 (T2-meetperiode).



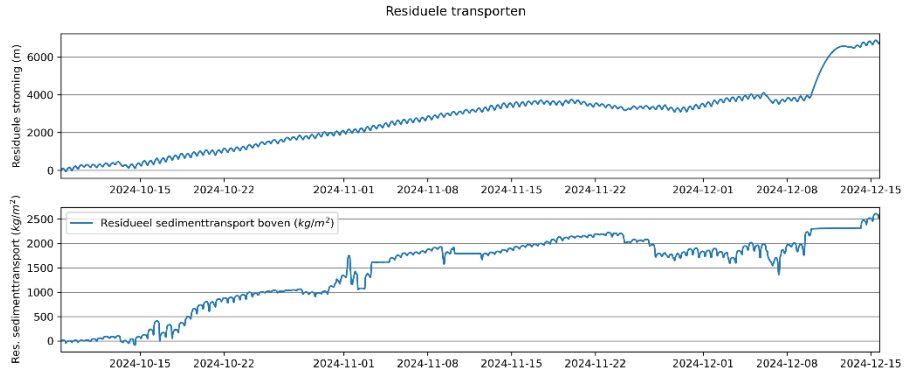
Figuur B-38: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 1 november en 15 november 2025 (T2-meetperiode).



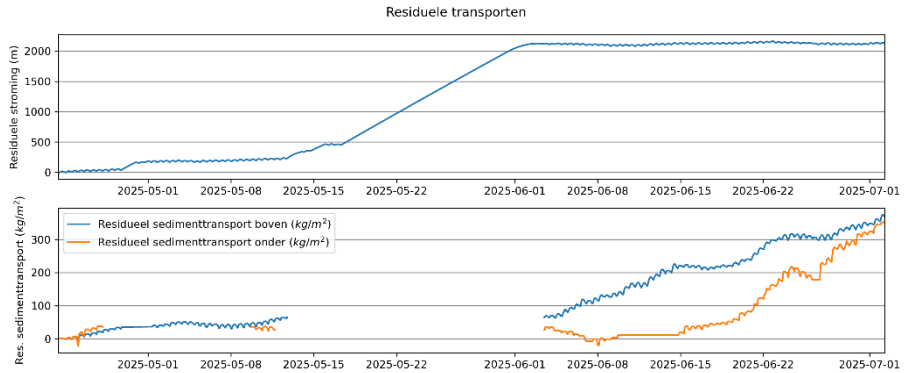
Figuur B-39: Tijdreeksen waterstand (m), stroomsnelheid (m/s), golfhoogte (m), SPM boven (mg/L) en SPM onder (mg/L) voor meetlocatie Boontjes Zuid tussen 16 november en 30 november 2025 (T2-meetperiode).

B.9 Residuele debieten en sedimenttransporten

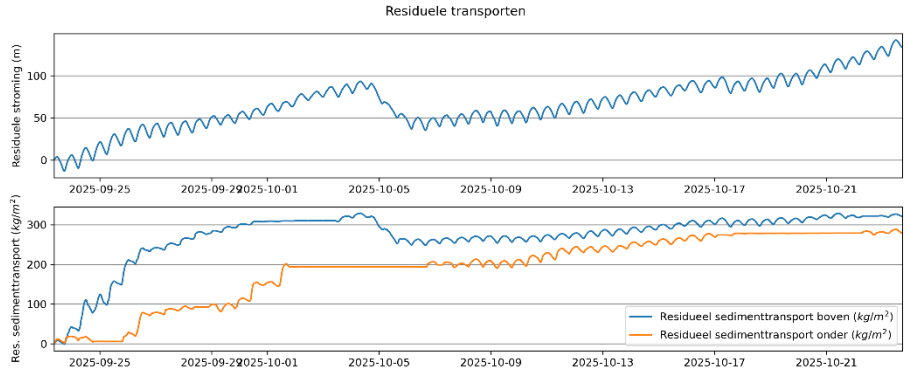
T0 - F1 – Blauwe Slenk



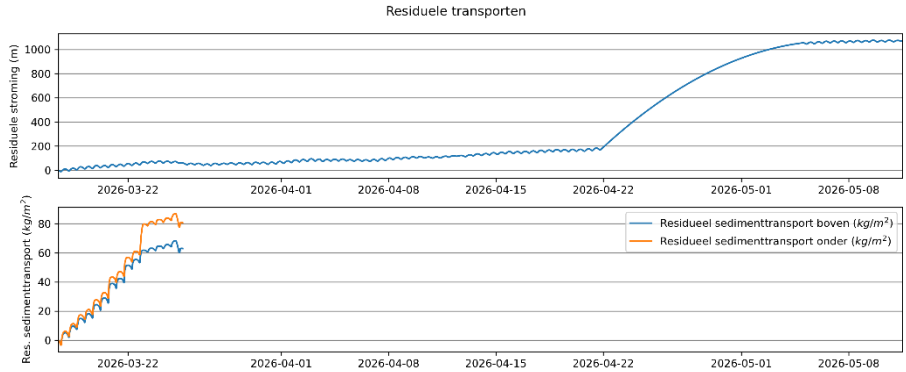
T1 - F1 – Blauwe Slenk



T2 - F1 – Blauwe Slenk

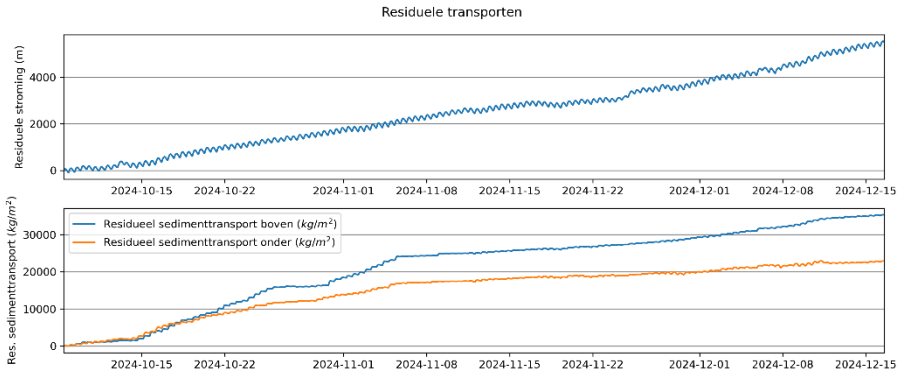


T3 - F1 – Blauwe Slenk

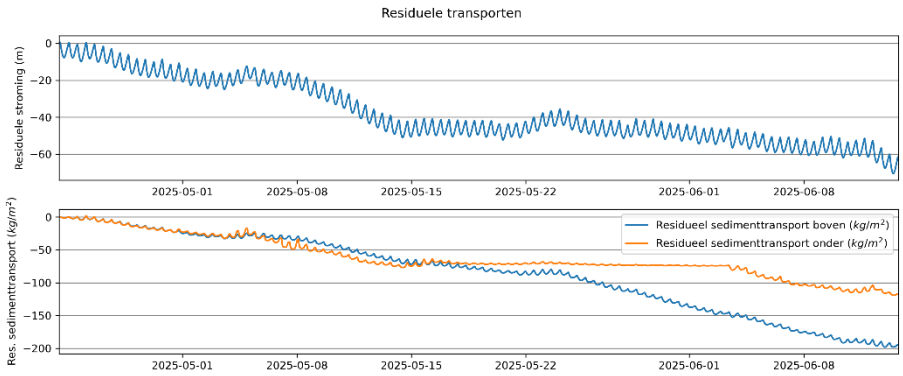


Figuur B-40: Residuele transporten bij meetframe Blauwe Slenk (F1) tijdens de T0-, T1-, T2- en T3-metingen (resp. najaar 2024, voorjaar 2025, najaar 2025 en voorjaar 2026). Per meting is het bovenste paneel steeds het residuele debiet (water), het onderste paneel het residuele sedimenttransport, waarbij de vloedrichting is gedefinieerd als positieve waarde. Merk op dat het onderste paneel voor sedimenttransport slechts enkele dagen bevat, doordat de vork waarop de ADV- en OBS-sensor gemonteerd zaten verbogen was.

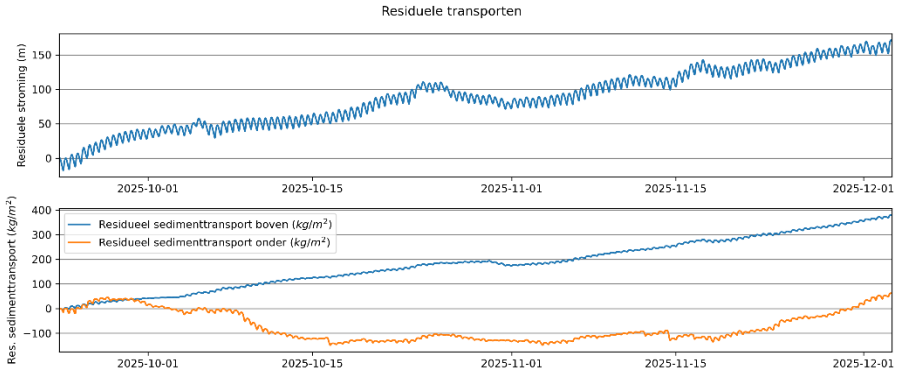
T0 - F2 – Kimstergat



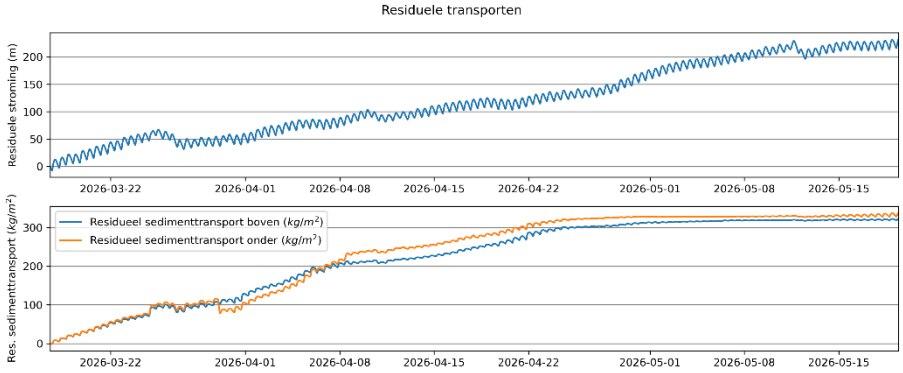
T1 - F2 – Kimstergat



T2 - F2 – Kimstergat



T3 - F2 – Kimstergat

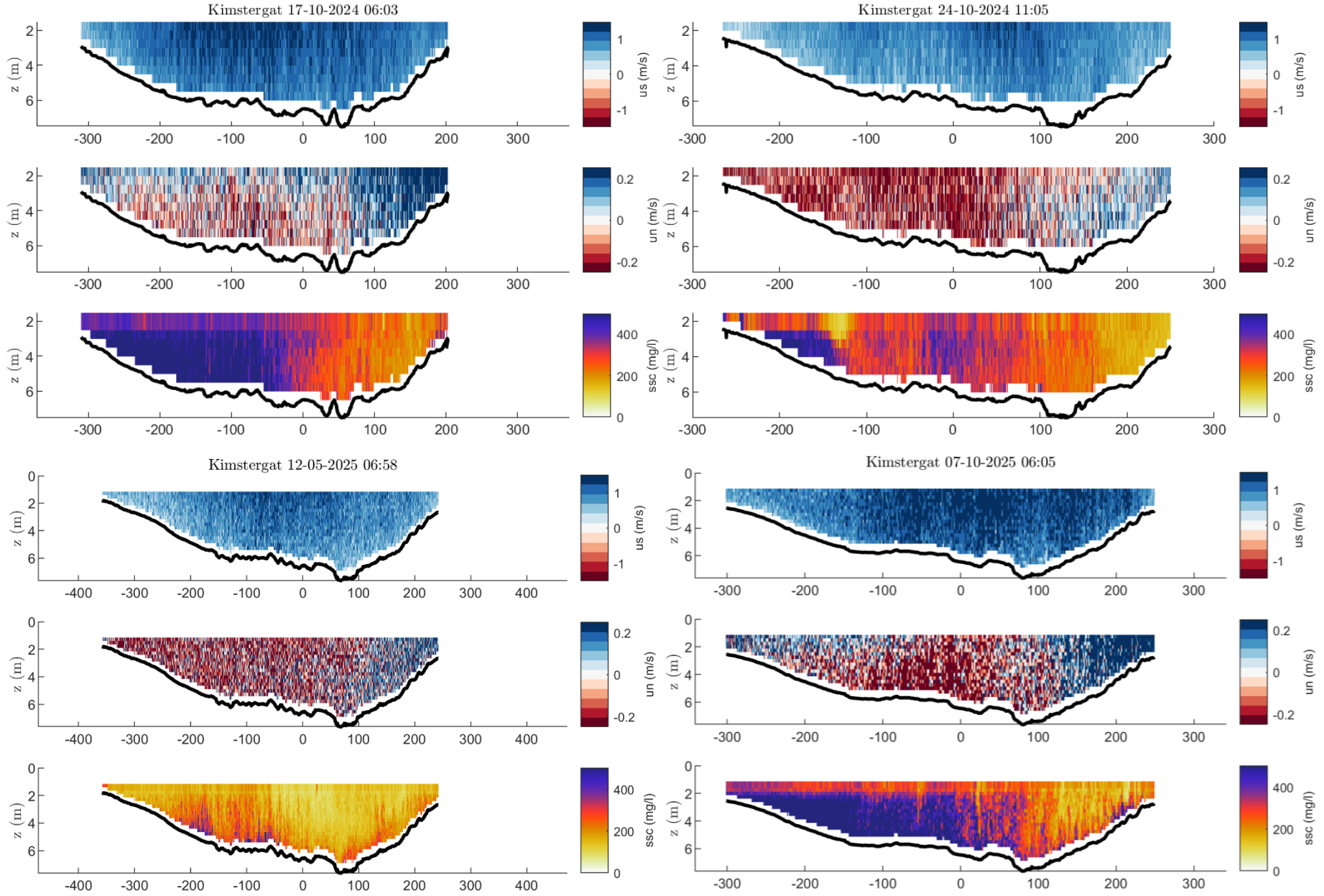


Figuur B-41: Residuele transporten bij meetframe Kimstergat (F2) tijdens de T0-, T1-, T2- en T3-metingen (resp. najaar 2024, voorjaar 2025, najaar 2025 en voorjaar 2026). Per meting is het bovenste paneel steeds het residuele debiet (water), het onderste paneel het residuele sedimenttransport, waarbij de vloedrichting is gedefinieerd als positieve waarde.

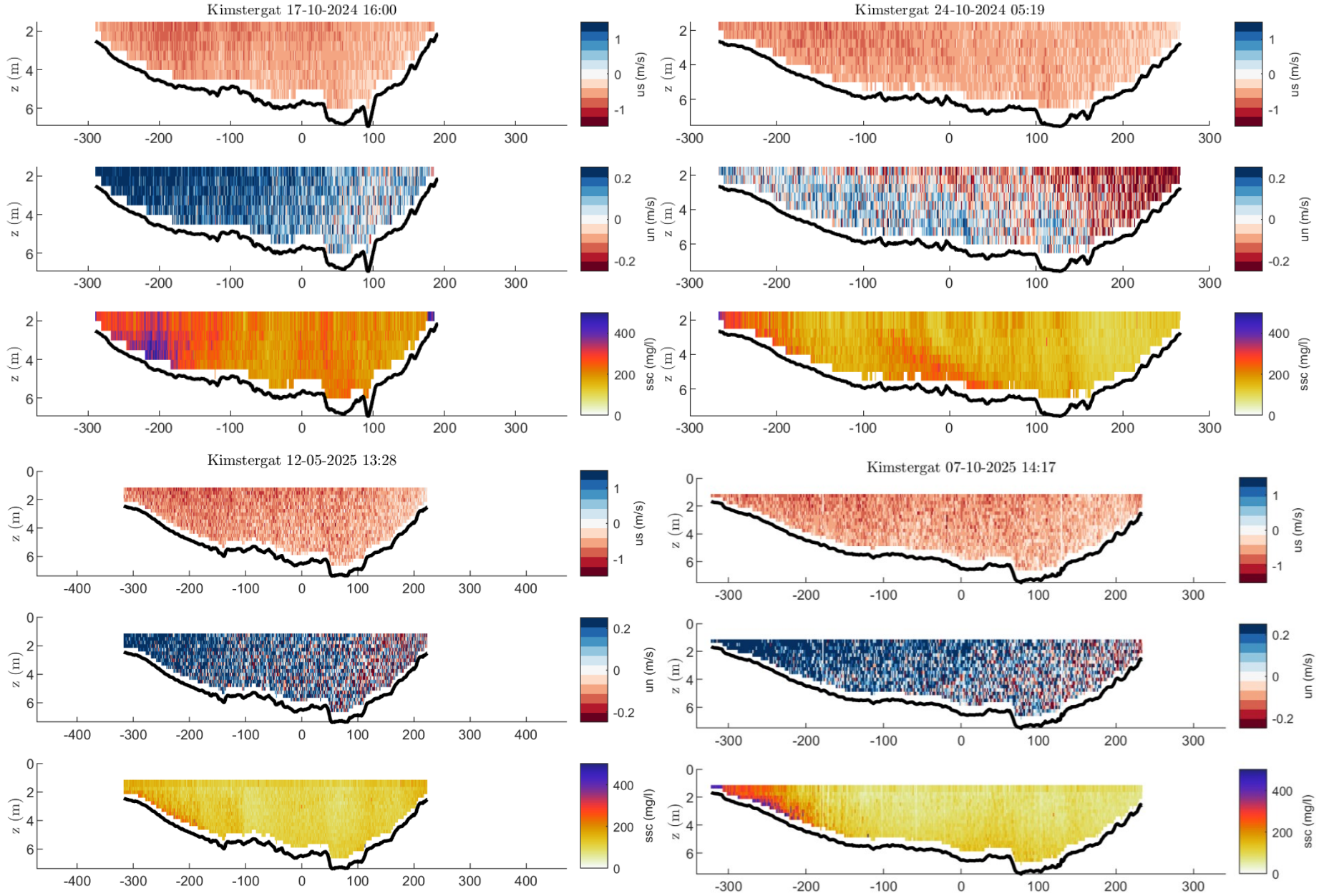
C Varende metingen

Tabel C-1: Getijvolumes en sedimenttransporten van de varende metingen (afkomstig uit nabewerking door Rijkswaterstaat-CIV), geclusterd per meetraai (alternatieve presentatie van de data uit Tabel 5-7). De grootste waardes tijdens de 13-uursmeting zijn dikgedrukt, wat de netto richting aangeeft (blauwe achtergrond indien het verschil tussen vloed- en ebtransport significant is). Voor duiding van de resultaten worden ook de getijfase (springtij/doodtij), het waterstandsverhang tussen Kornwerderzand en Harlingen en de windkracht en -richting getoond.

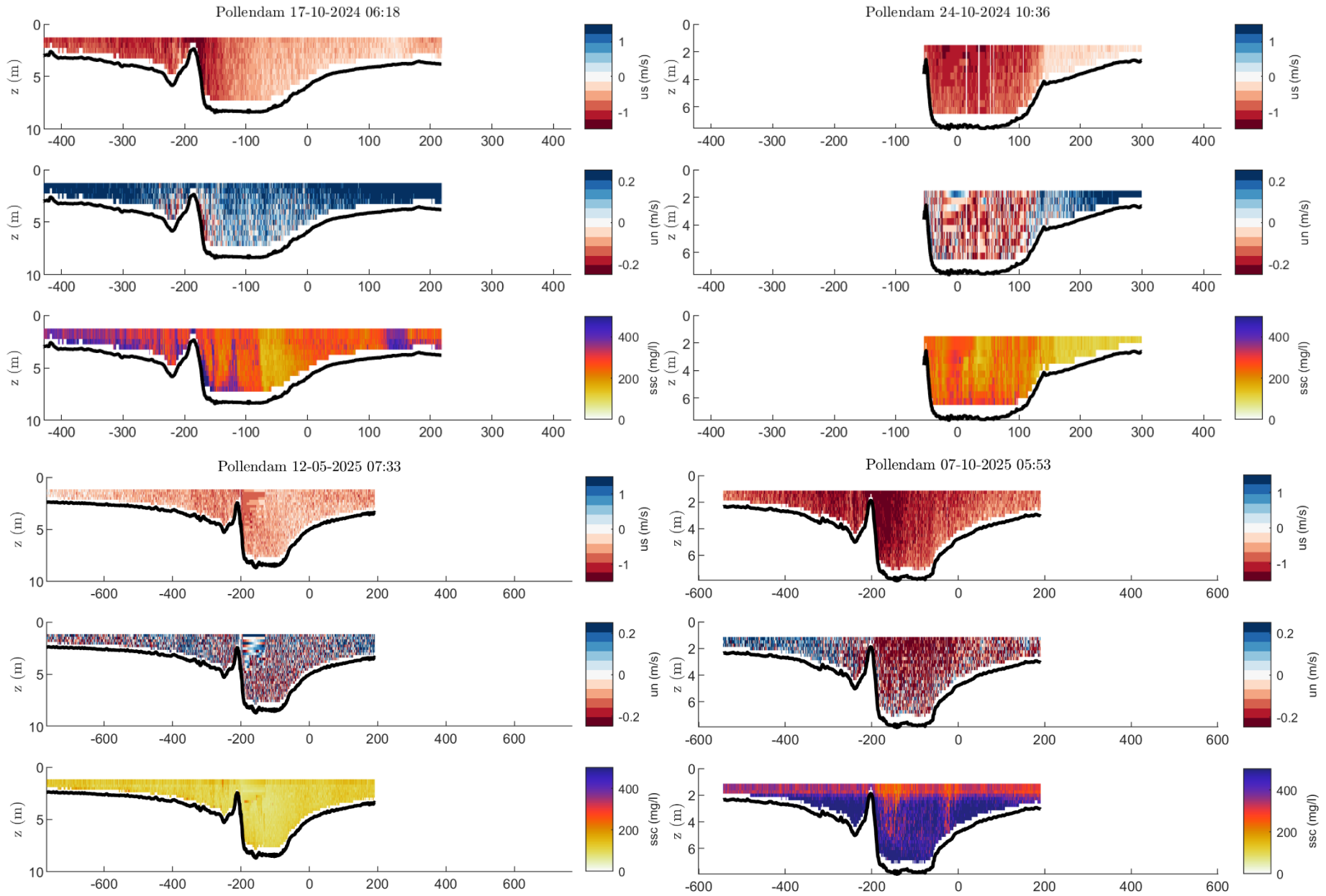
Meetraai	Datum	Getijfase	Verhang KWZ-Harlingen	Wind (Bft)	Getijvolumes		Sedimentfluxen	
					vloed (10^6 m³)	eb (10^6 m³)	vloed (10^6 kg)	eb (10^6 kg)
Kimstergat	17-10-24	Springtij	Positief	3 (Z)	**42,0**	30,0	**11,0**	4,8
	24-10-24	Doodtij	Negatief	3 (ZO)	26,0	**38,0**	**4,5**	4,4
	12-05-25	Overgang	Positief	3 (O)	26,6	**35,1**	3,1	**5,0**
	07-10-25	Springtij	Positief	3 (ZW)	**40,8**	32,2	**9,0**	3,3
	01-04-26	Overgang	Positief	3 (Z)	**33,3**	27,7	**7,2**	3,6
Pollendam –Boontjes noord	17-10-24	Springtij	Positief	3 (Z)	26,0	**33,0**	**11,0**	5,6
	24-10-24	Doodtij	Negatief	3 (ZO)	15,0	**43,0**	3,8	**4,7**
	12-05-25	Overgang	Positief	3 (O)	**24,6**	19,7	3,1	**4,5**
	07-10-25	Springtij	Positief	3 (ZW)	**33,2**	26,4	3,0	**9,5**
	01-04-26	Overgang	Positief	3 (Z)	18,4	**24,5**	**7,6**	3,7
Boontjes midden	18-10-24	Springtij	Positief	2 (NNW)	**9,4**	9,0	**1,8**	1,0
	25-10-24	Doodtij	Negatief	2 (ZO)	7,3	**14,0**	1,0	**1,3**
	13-05-25	Overgang	Positief	3 (ONO)	**8,3**	7,3	**1,2**	1,1
	08-10-25	Springtij	Positief	3 (W)	**9,9**	9,1	0,7	**1,8**
	02-04-26	Overgang	Positief	5 (NNW)	7,5	**7,9**	**1,2**	0,8
Boontjes zuid	18-10-24	Springtij	Positief	2 (NNW)	**43,0**	42,0	**6,9**	3,9
	25-10-24	Doodtij	Negatief	2 (ZO)	31,0	**46,0**	2,9	**3,2**
	13-05-25	Overgang	Positief	3 (ONO)	**36,9**	35,8	**4,8**	4,5
	08-10-25	Springtij	Positief	3 (W)	**40,0**	38,9	2,9	**7,0**
	02-04-26	Overgang	Positief	5 (NNW)	41,2	**41,9**	**7,5**	5,4



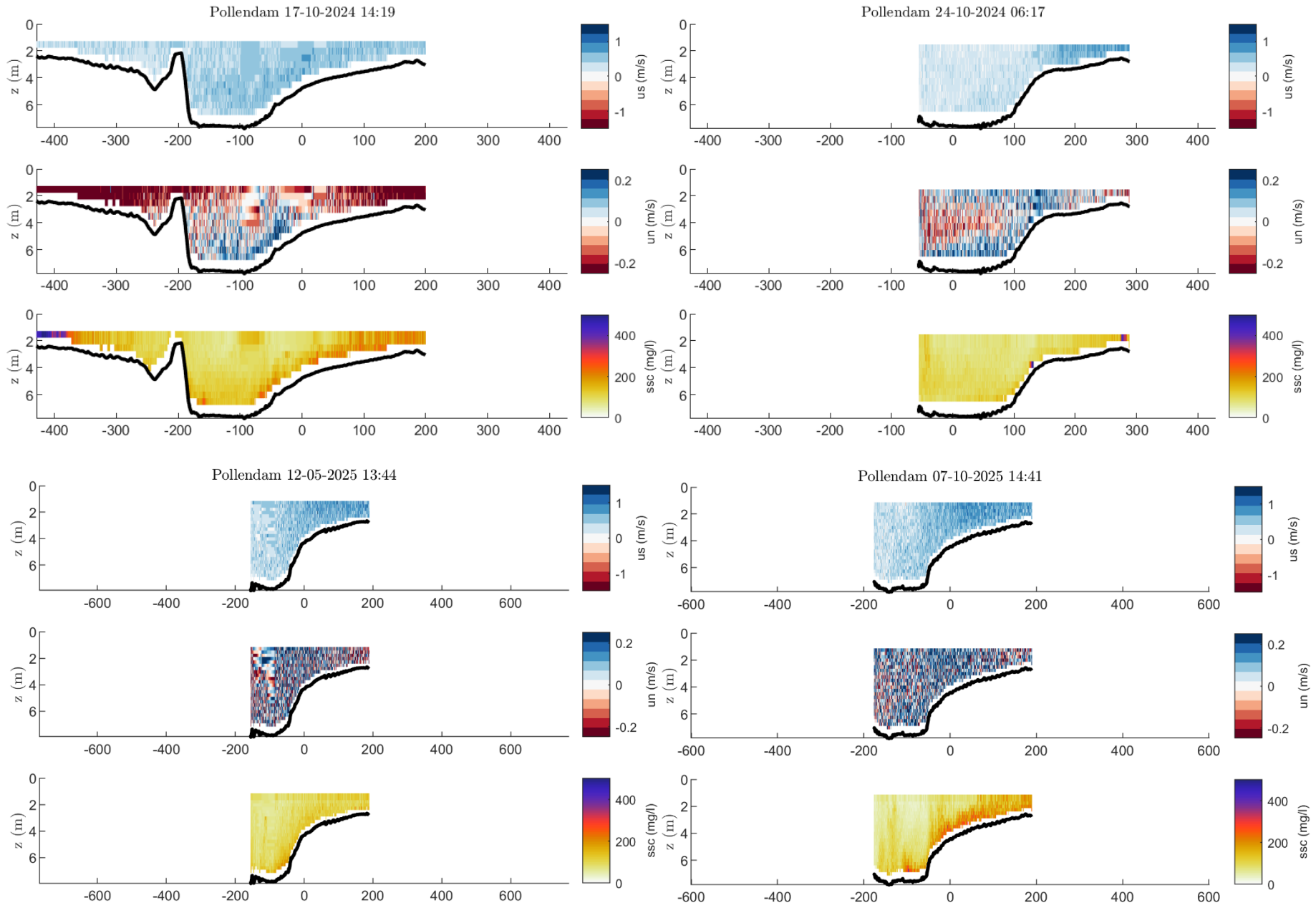
Figuur C-1: 13-uursmetingen in het Kimstergat tijdens piek vloed (linksboven T0-meting 17-10-2024, rechtsboven T0-meting 24-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



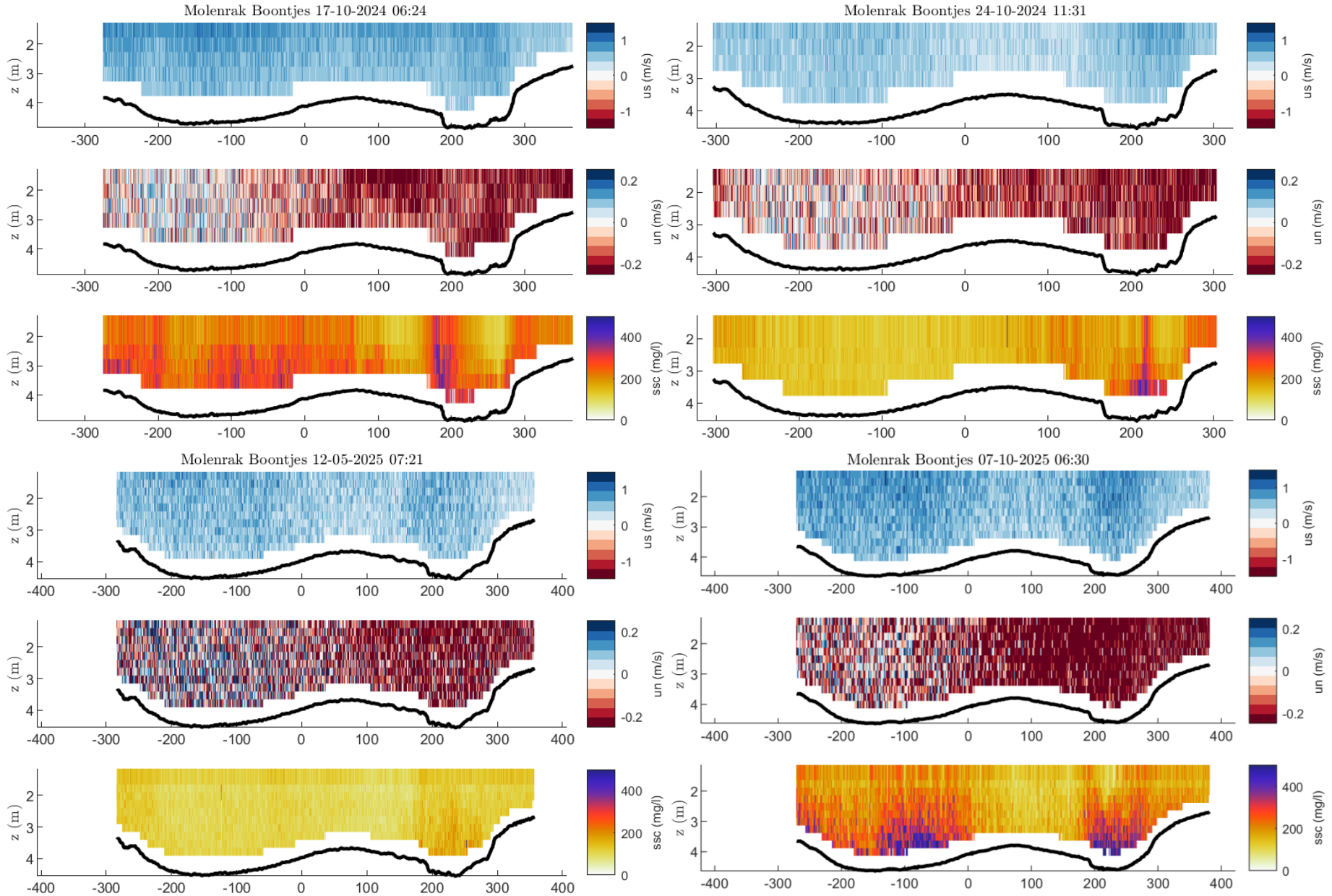
Figuur C-2: 13-uursmetingen in het Kimstergat tijdens piek eb (linksboven T0-meting 17-10-2024, rechtsboven T0-meting 24-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



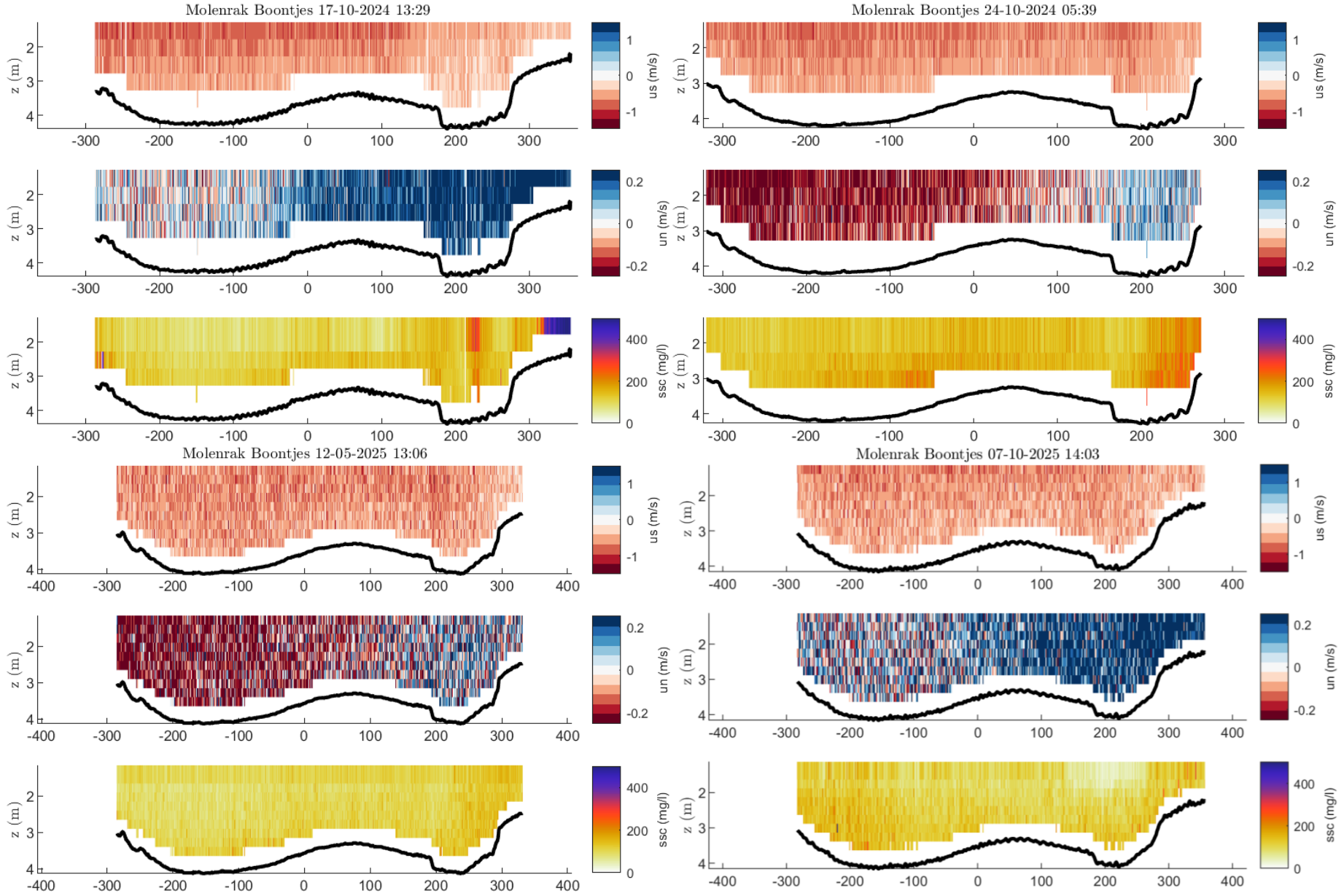
Figuur C-3: 13-uursmetingen in de Geul langs Pollendam tijdens piek vloed (linksboven T0-meting 17-10-2024, rechtsboven T0-meting 24-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



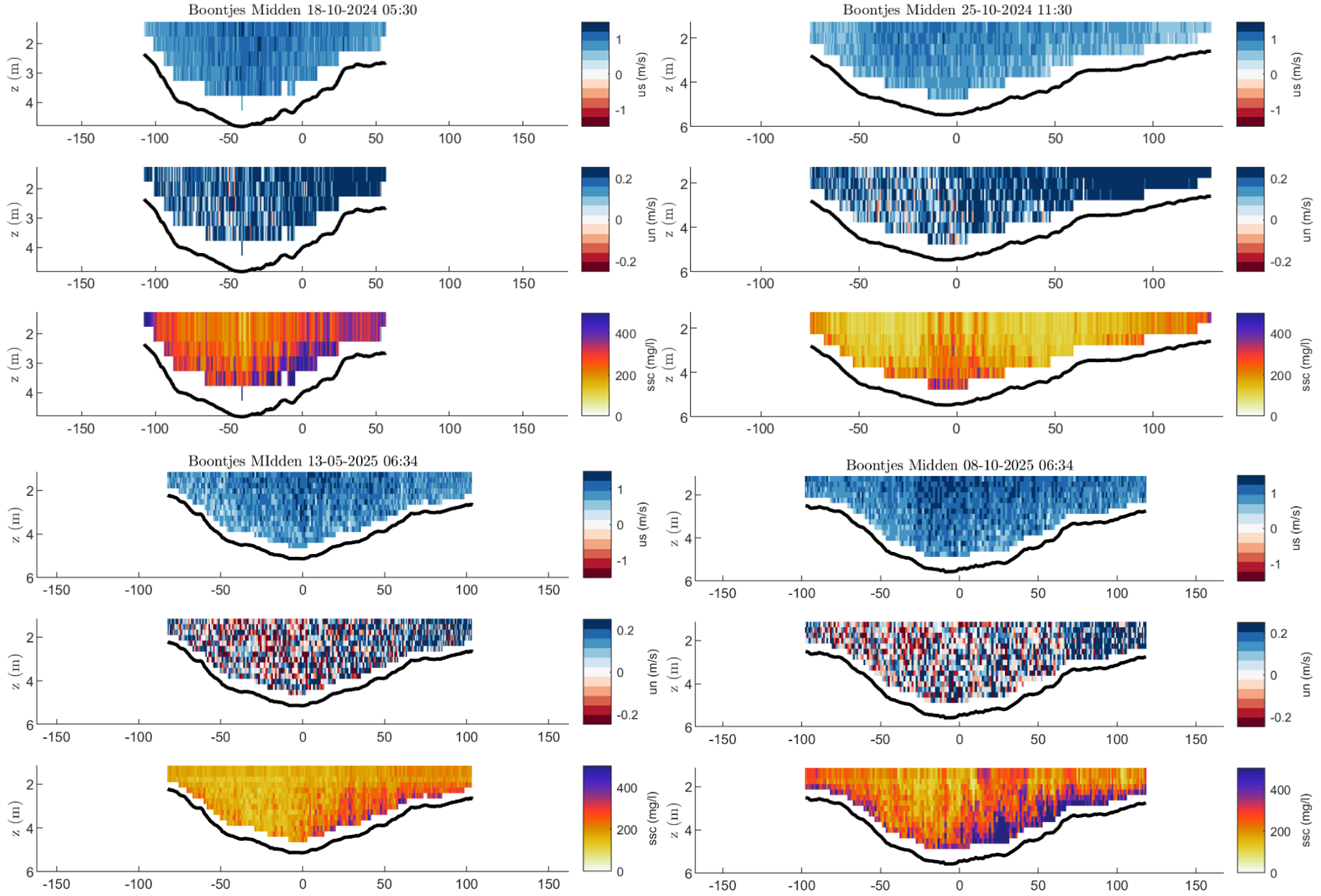
Figuur C-4: 13-uursmetingen in de Geul langs Pollendam tijdens piek eb (linksboven T0-meting 17-10-2024, rechtsboven T0-meting 24-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



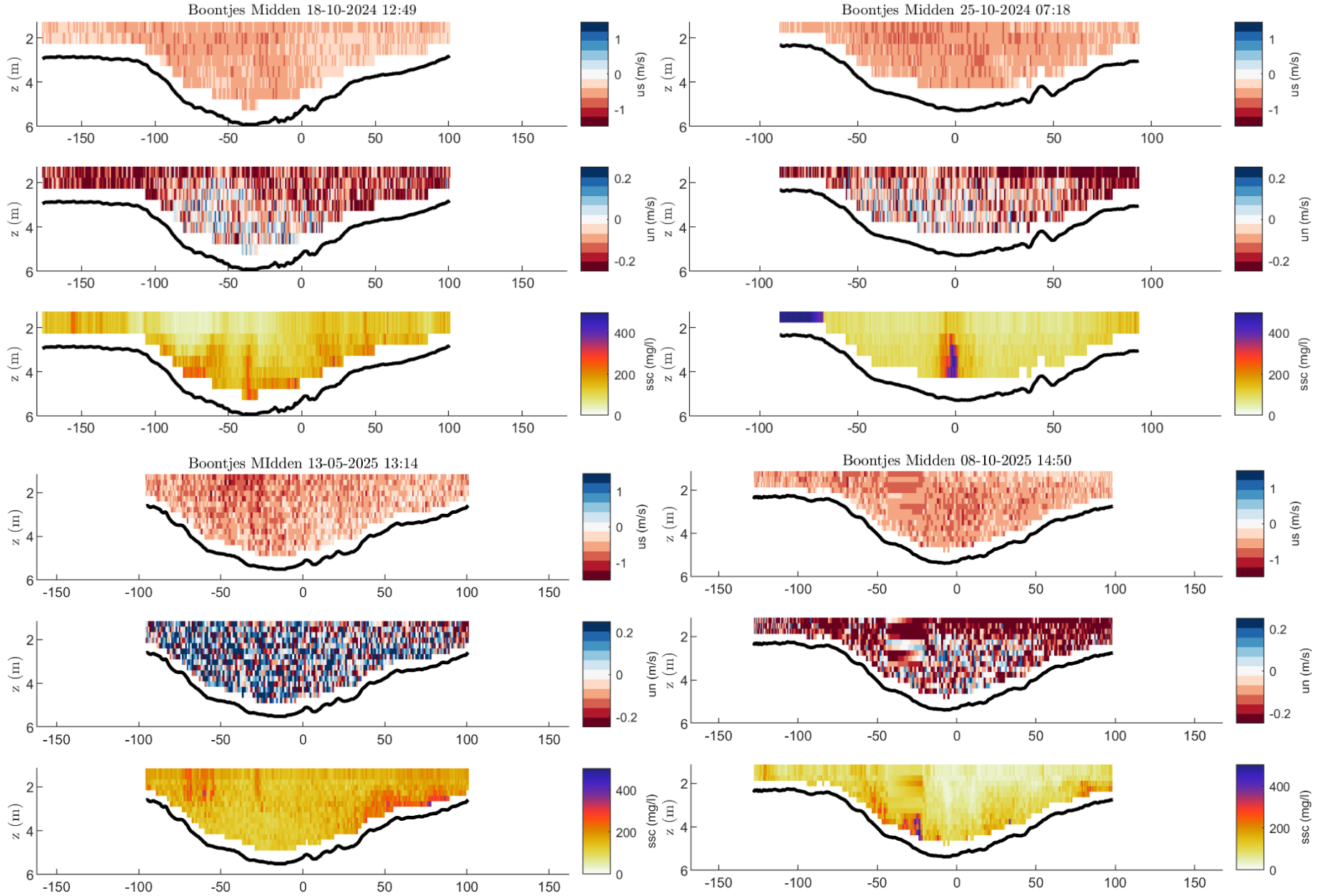
Figuur C-5: 13-uursmetingen op raai Molenrak – Boontjes Noord tijdens piek vloed (linksboven T0-meting 17-10-2024, rechtsboven T0-meting 24-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



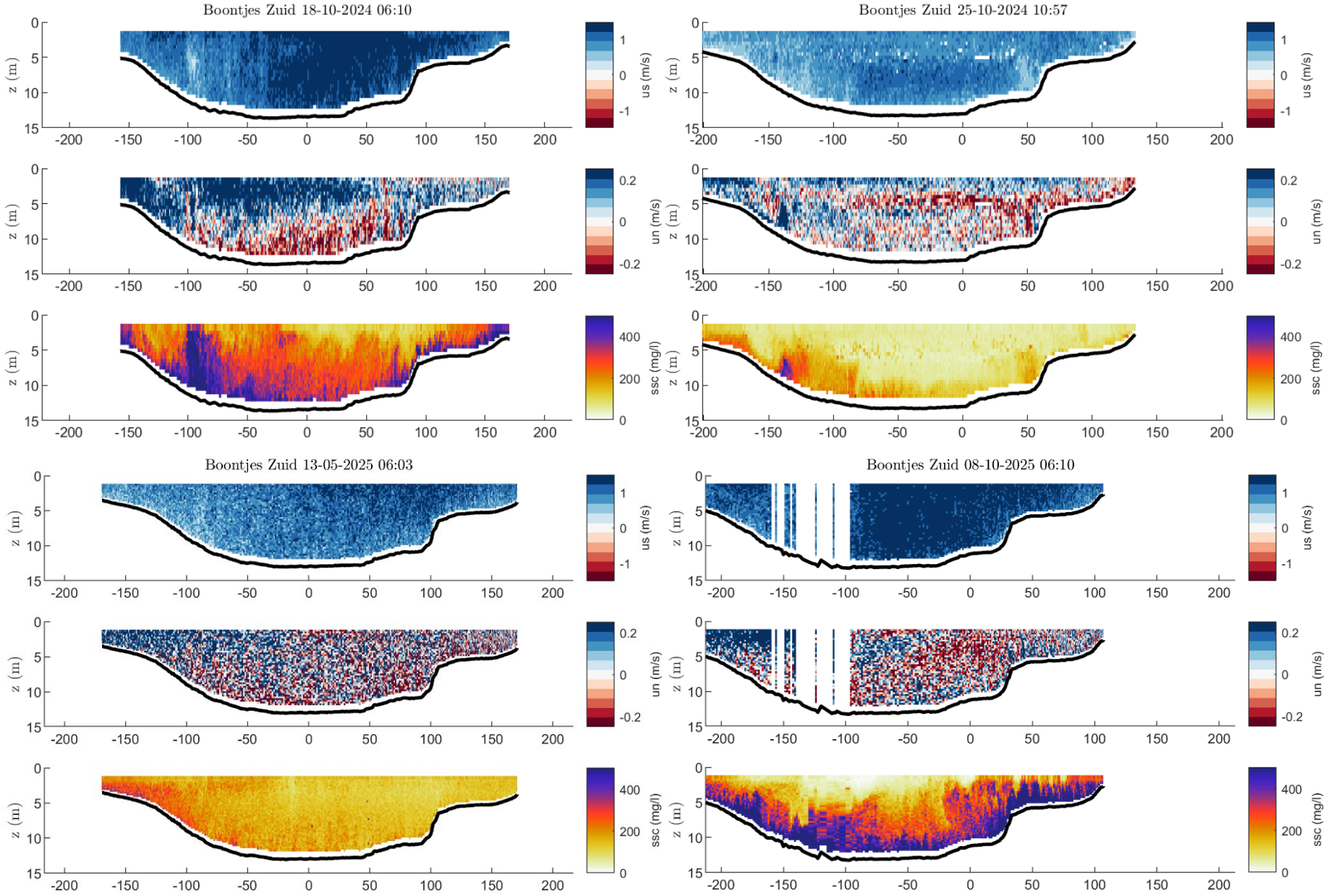
Figuur C-6: 13-uursmetingen op raai Molenrak – Boontjes Noord tijdens piek eb (linksboven T0-meting 17-10-2024, rechtsboven T0-meting 24-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



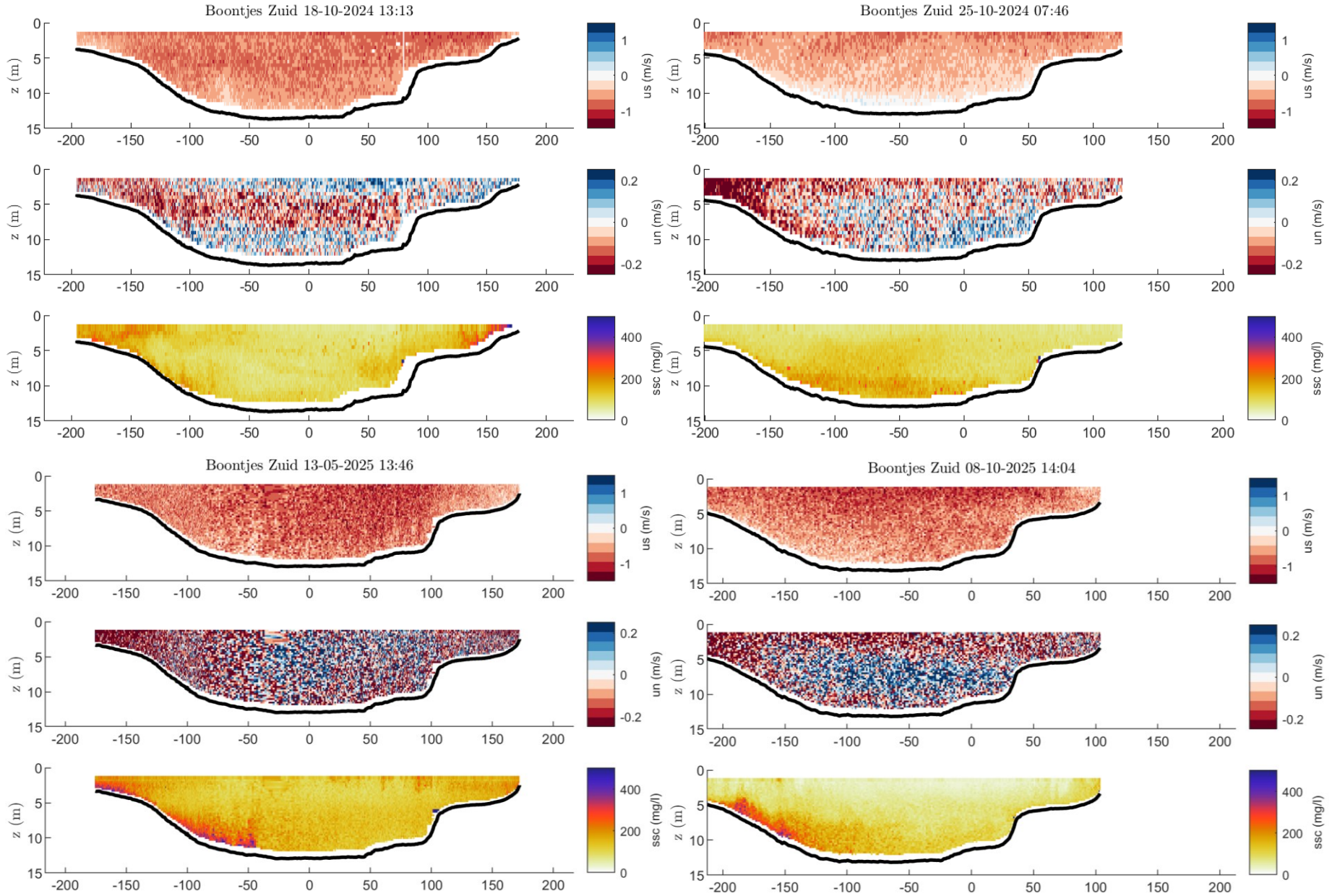
Figuur C-7: 13-uursmetingen op raai Boontjes Midden tijdens piek vloed (linksboven T0-meting 18-10-2024, rechtsboven T0-meting 25-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



Figuur C-8: 13-uursmetingen op raai Boontjes Midden tijdens piek eb (linksboven T0-meting 18-10-2024, rechtsboven T0-meting 25-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



Figuur C-9: 13-uursmetingen op raai Boontjes Zuid tijdens piek vloed (linksboven T0-meting 18-10-2024, rechtsboven T0-meting 25-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.



Figuur C-10: 13-uursmetingen op raai Boontjes Zuid tijdens piek eb (linksboven T0-meting 18-10-2024, rechtsboven T0-meting 25-10-2024, linksonder T1-meting, rechtsonder T2-meting). 'us' is de stroomsnelheid in langsrichting, 'un' is de stroomsnelheid in dwarsrichting en 'ssc' is de sedimentconcentratie in de waterkolom.

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