

Analyse van T0-meting bij pilot verondieping vaarweg Boontjes



Analyse van T0-meting bij pilot verondieping vaarweg Boontjes

Auteur(s)

Bob Smits

Roy van Weerdenburg

Qilong Bi

Analyse van T0-meting bij pilot verondieping vaarweg Boontjes

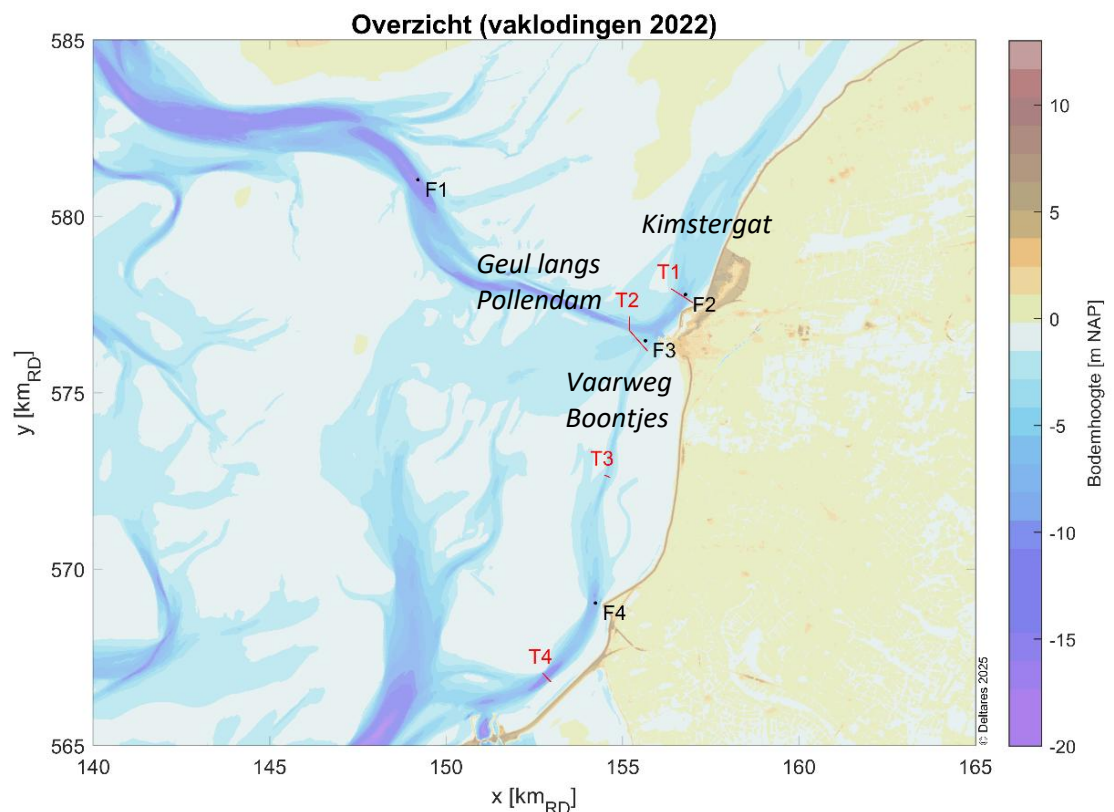
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Freek Brils
Referenties	WVH07
Trefwoorden	Monitoring, pilot, baggervolume, getijvoortplanting, resuspensie, sedimentatie

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	07-10-2025
Projectnummer	11211571-006
Document ID	11211571-006-ZKS-0002
Pagina's	113
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)		
	Bob Smits Roy van Weerdenburg Qilong Bi	

Samenvatting

In de vaarweg Boontjes wordt een pilot uitgevoerd om de baggervolumes, en daarmee de impact van baggeren en verspreiden op natuurwaarden, te verminderen door de onderhoudsdiepte te verkleinen. Om de effecten van de pilot te monitoren wordt een meetcampagne uitgevoerd in het interessegebied in en rondom vaargeul Boontjes en het Kimstergat (zie Figuur 1-1). De meetcampagne omvat een T0-meting (voorafgaand aan de uitvoering van de pilot) en vervolgmetingen tijdens de uitvoering van de pilot. Dit rapport beschrijft de eerste analyse van de T0-meetresultaten om het systeembegrip te vergroten, aan de hand van hypothesen over de dynamiek van stroming en sedimenttransport in de omgeving van de vaargeul Boontjes. Hiermee kunnen in een later stadium de effecten van de pilot worden gekwantificeerd.



Figuur 1-1: Interessegebied met naamgeving van belangrijkste geulen en locaties van meetframes (F1-F4, zwarte stippen) en raaien voor varende metingen (T1-T4, rode lijnen) voor de T0-metingen.

De eerste analyse van de T0-meting heeft een aantal nuttige inzichten opgeleverd over de systeemwerking:

- Getijuitwisseling en stroomsnelheden:
 - Er zijn geen kenmerken van een hydrodynamisch wantij in de Boontjes gevonden, aangezien de vloedstroming door de gehele vaargeul Boontjes netto noordwaarts gericht is en de ebstroming vanuit het Kimstergat zich verdeelt over de Boontjes en de Geul langs Pollendam.
 - Gemeten sedimentconcentraties in het Kimstergat en de zuidelijke Boontjes waren tijdens vloed aanmerkelijk hoger dan tijdens eb. In combinatie met vloeddominante

stroomsnelheden duidt dit op netto landwaarts sedimenttransport (in noordelijke richting).

- Stroomsnelheden en vloeddominantie nemen sterk af tussen de zuidelijke Boontjes (omgeving F4) en de noordelijke Boontjes (omgeving F3), waardoor ook de transportcapaciteit afneemt in noordelijke richting en aanslibbing in het noordelijke deel van de vaargeul kan ontstaan.
- Wind en golven spelen vooral een grote rol voor sedimentconcentraties bij hoge windsnelheden op ondiepe locaties. Bij noordwestenwind treden de hoogste sedimentconcentraties in de vaarweg Boontjes op. In het Kimstergat lijkt door de oriëntatie en ligging vooral het verschil tussen noordenwind en zuidenwind een rol te spelen: bij noordenwind treden hogere sedimentconcentraties op met als gevolg daarvan grotere (bruto) sedimenttransporten tijdens zowel eb als vloed.
- Residuele stroming en sedimenttransporten zijn op de meeste meetpunten in de vloedrichting, behalve in de noordelijke Boontjes. De windrichting blijkt een belangrijke rol te spelen voor de richting van de residuele 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.
- Stratificatie (gelaagdheid in de waterkolom) wordt af en toe aangetroffen in de vaarweg Boontjes en in de Geul langs Pollendam. In de noordelijke Boontjes nemen sedimentconcentraties af bij toenemend zoutgehalte (d.w.z. een negatieve correlatie van zoutgehalte met sedimentconcentratie). De samenhang tussen het spuidebiet bij Kornwerderzand en sedimentconcentraties (met hogere sedimentconcentraties voor grotere spuidebieten) is in de Blauwe Slenk verrassend sterker dan op het dichterbij gelegen meetpunt Boontjes zuid. Een mogelijke gravitatiecirculatie¹ in de Boontjes, aangedreven door de zoetwaterspui bij Kornwerderzand, kan niet worden bevestigd op basis van de meetframes, maar hiervoor zijn wel aanwijzingen in de snelheidsprofielen van de varende metingen bij meetraai Boontjes zuid.

Het voorliggende rapport beschrijft een eerste, beperkte analyse van de T0-meetdata. Dit levert direct een paar verbeterde inzichten op over de waterbeweging en sedimentdynamiek van de vaargeul Boontjes. In een later stadium kunnen de resultaten van deze analyse worden gebruikt om het effect van de pilot te duiden en mogelijk ook om het vaargeulonderhoud te optimaliseren.

Er is daarnaast nog veel potentie voor vervolganalyse van de T0-meetdata om beter inzicht te krijgen in sturende processen voor sedimentatie in de vaargeul en het verband met baggeren en verspreiden in en rond de Boontjes. Hiervoor wordt ook een aantal aanbevelingen gedaan:

- Verticale profielen van sedimentconcentratie van de CTD-OBS sensor uit de varende metingen;
- Verticale stromingsprofielen uit de ADCP-sensor van de meetframes om inzichten te krijgen in eventuele 3D-stromingspatronen;
- Circulatiepatronen in dwarsrichting van de geul uit de varende metingen om meer inzicht te krijgen in geul-plaat uitwisseling;
- Variaties in gemeten sedimentconcentraties op korte tijdschaal (uren tot dagen) en vergelijking met (mogelijk) sturende processen; en
- Een vergelijking van gemeten sedimentconcentraties met bagger- en verspreidingsgegevens van de Boontjes en de haven van Harlingen zou waardevolle inzichten kunnen geven voor het belang van verspreiden ten opzichte van de achtergrondconcentratie.

¹ Gravitatiecirculatie (ofwel *estuarine circulation*) is een 3D-circulatiepatroon dat veroorzaakt wordt door dichtheidsverschillen, waarbij een lokaal troebelheidsmaximum kan ontstaan.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Pilot verondieping vaarweg Boontjes	8
1.2	Eerdere studies vaarweg Boontjes en omgeving	8
1.3	Doelstelling	9
1.4	Conceptueel systeembegrip voorafgaand aan de pilot	9
2	Methode	13
2.1	Beschikbare data en gegevens voor de T0-meetcampagne	13
2.1.1	Meetframes	13
2.1.2	Varende metingen	15
2.1.3	Profielmetingen	16
2.1.4	Bodembemonstering	17
2.1.5	Kalibratie van troebelheidssensoren	17
2.1.6	Aanvullende data	18
2.2	Hypotheses	18
3	Waterbeweging en sedimentconcentraties	19
3.1	Gemeten stroomsnelheden	19
3.2	Gemeten troebelheid en analyse sedimentconcentraties	22
3.3	Samenhang waterstanden en stroomsnelheden met SPM	24
3.4	Bevindingen	25
4	Invloed van wind en golven	27
4.1	Analyse golfcondities	27
4.2	Samenhang wind met golven	28
4.3	Samenhang wind met SPM en sedimenttransport	29
4.4	Samenhang golven met SPM	33
4.5	Bevindingen	34
5	Residuele stroming en sedimenttransport	36
5.1	Residuele stroming en sedimenttransporten	36
5.1.1	Meetframes	36
5.1.2	Varende metingen	39
5.2	Invloed van wind op netto sedimenttransport	39
5.3	Bevindingen	42
6	Stratificatie en gravitatiecirculatie	43
6.1	Verticale profielen zoutgehalte en SPM	43

6.2	Sturende processen	50
6.3	Bevindingen	52
7	Bodemsamenstelling	53
8	Discussie	56
8.1	Methode en interpretatie	56
8.2	Reflectie op hypothesen en conceptueel systeembegrip	56
8.3	Analyse vervolgmetingen	59
9	Conclusie	60
9.1	Bevindingen analyse T0-meting	60
9.2	Aanbevelingen	61
	Literatuur	64
A	Conceptueel model ontwikkeling kombergingsgebied Vlie	65
B	Statistiek	67
B.1	Basisstatistieken per parameter	67
B.2	Correlaties van parameters met SPM	68
B.2.1	Waterstanden en stroomsnelheden	68
B.2.2	Wind en golven	69
B.2.3	Stratificatie en gravitatiecirculatie	69
B.2.4	Bevindingen	70
C	Aanvullende resultaten stroomsnelheid	71
C.1	Samenhang stroomsnelheid en SPM	71
C.2	Stroomsnelheid en SPM	77
D	Aanvullende resultaten wind en golven	79
D.1	Samenhang windsnelheid en golfhoogte	79
D.2	Samenhang wind en SPM	82
D.3	Samenhang golven en SPM	88
E	Aanvullende resultaten stratificatie en gravitatiecirculatie	91
E.1	Verticale profielen zoutgehalte en SPM	91
E.2	Samenhang zoutgehalte en spuidebiet Kornwerderzand	95
E.3	Samenhang zoutgehalte, sedimenttransport en SPM	99
E.4	Samenhang spuidebiet Kornwerderzand, sedimenttransport en SPM	103
F	Varende metingen	105
G	SPM-metingen tijdens verspreiding baggerspecie	109

1 Inleiding

1.1 Pilot verondieping vaarweg Boontjes

Bij de vaarweg Boontjes wordt een pilot uitgevoerd om de baggervolumes, 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-3,30m. De maximale onderhoudsdiepte wordt daarmee ook aangepast en verschuift van NAP-4,30m naar NAP -3,80m. De geulbreedte blijft om nautische redenen gehandhaafd op 100 m.

Om het systeembegrip te vergroten en de effecten van de pilot te kunnen beoordelen worden tussen oktober 2024 en mei 2026 verschillende meetcampagnes uitgevoerd in het interessegebied in en rondom vaargeul Boontjes en het Kimstergat. De meetcampagne omvat een T0-meting (voor uitvoering van de pilot) en vervolgmetingen tijdens de uitvoering van de pilot. In 2025 is de analyse van de T0-meting tussen oktober 2024 en december 2024 uitgevoerd en advies gegeven over de opzet van de vervolgmetingen. Dit wordt in het voorliggende rapport beschreven.

De tijdlijn voor de besluitvorming rond de vaarweg Boontjes is van groot belang voor het verloop van dit project. 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 (T0-meting en vervolgmetingen gedurende de looptijd van de pilot) goed en tijdig beschikbaar zijn. Dit rapport levert daartoe een belangrijke bijdrage.

1.2 Eerdere studies vaarweg Boontjes en omgeving

Dit werk bouwt voort op eerdere B&O Wadden deelprojecten over de vaargeul Boontjes in 2021 en 2022, 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 voorspellingen te doen. De meetcampagne kan dus een waardevolle toevoeging zijn om de verkregen inzichten en prognoses te verbeteren.

In andere B&O Wadden deelprojecten is de 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 voort zal zetten, 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 (zie samenvatting in Paragraaf 1.4 en figuren in Bijlage A). 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.

Tot slot 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.

1.3 Doelstelling

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

Met de T0-meetcampagne, uitgevoerd in oktober – november van 2024, wil Rijkswaterstaat inzicht krijgen in de ontwikkeling van de morfologie, hydrodynamiek, sedimenttransport en troebelheid in en rond vaargeul Boontjes voorafgaand aan de pilot verondieping Boontjes. De meetdata van deze T0-meting is in dit rapport op een rij gezet, met als doel om de volgende parameters te analyseren: bodemligging, bodemsamenstelling, stroomsnelheden, debieten, golfhoogten, saliniteit en temperatuur, sedimentconcentraties/troebelheid, in en rond de vaargeul Boontjes voor de start van de pilot. Hoewel het gaat om een relatief korte meetreeks hoopt Rijkswaterstaat hiermee, samen met bestaande inzichten, extra informatie te en te verzamelen over de T0 en tevens het lokale systeembegrip van dit deelgebied te vergroten. Op basis van de eerste metingen en analyses kunnen mogelijk ook aanbevelingen voortvloeien die tot verbeteringen kunnen leiden van de hierop nog volgende meetcampagnes.

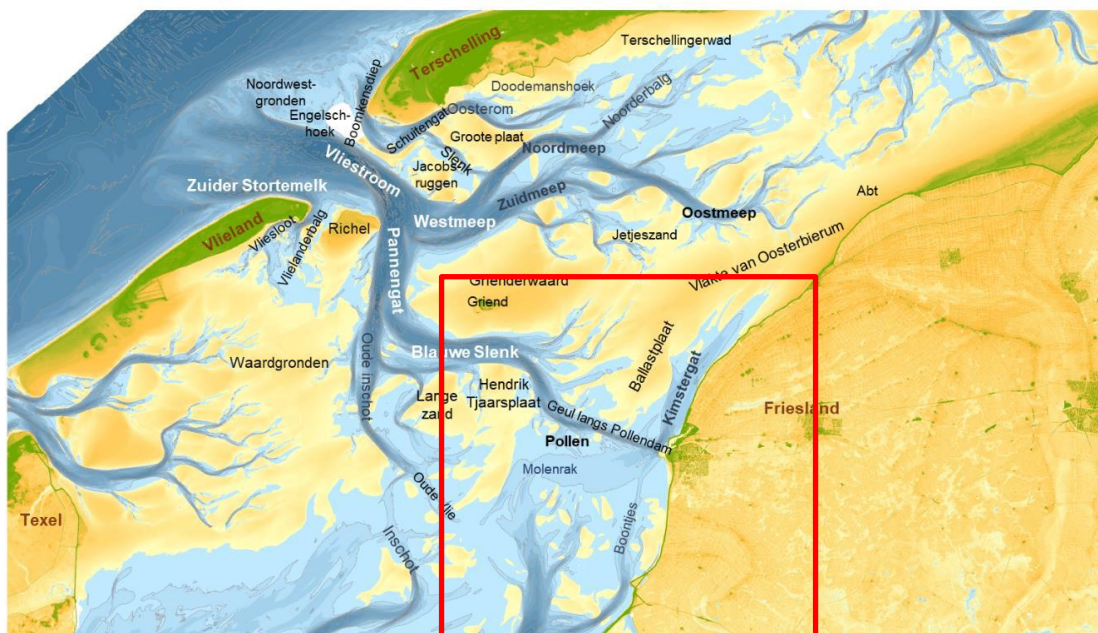
De volgende meetcampagnes worden uitgevoerd in: mei 2025, oktober 2025 en mei 2026. Daarnaast worden bodemonmonsters verzameld voor inzichten in het voorkomende bodemleven en sedimentsamenstelling. Analyse van deze metingen en vergelijking met de nulmeting worden naar verwachting in de loop van 2026 opgesteld.

1.4 Conceptueel systeembegrip voorafgaand aan de pilot

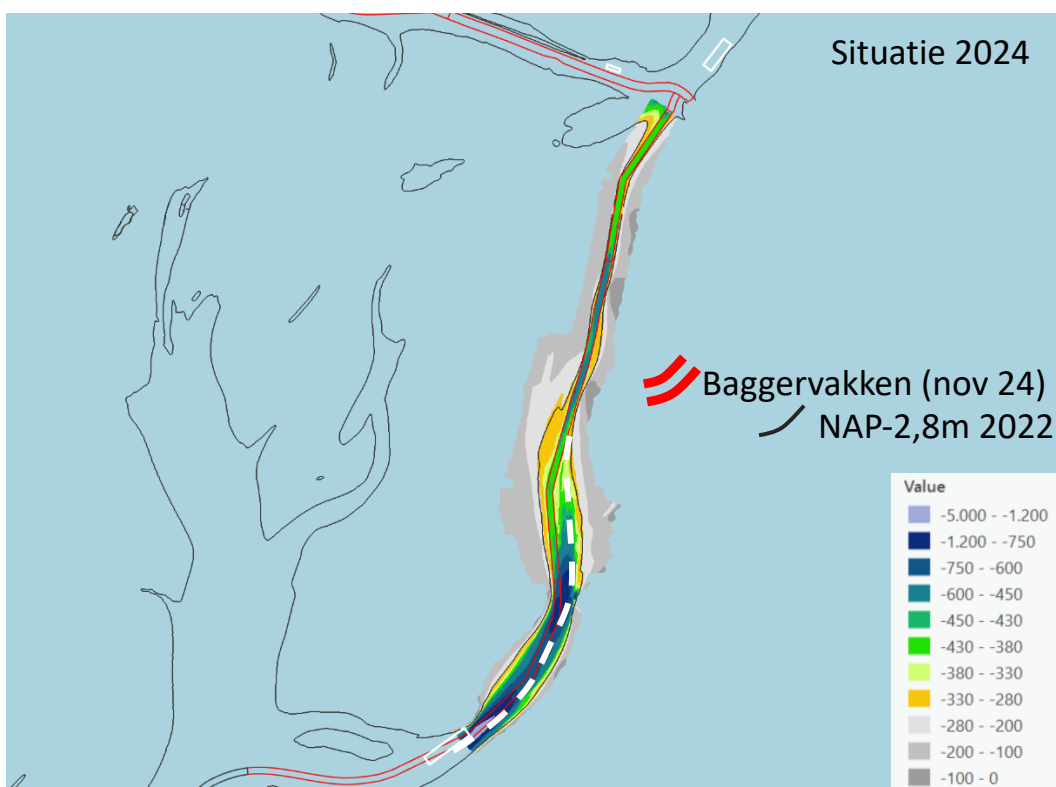
In een eerdere studie van Deltares (Smits et al., 2022) is op basis van data-analyse en een numerieke modelresultaten een synthese gemaakt van de systeemwerking van de vaarweg Boontjes op meso-schaal en de toename van het baggerbezwaar. De belangrijkste aspecten uit die synthese worden hieronder kort samengevat als context voor de analyse. Dit betreft dus de situatie voorafgaand aan de pilot.

Grootschalige morfologische ontwikkeling: het gebied rond de vaargeul Boontjes wordt nog steeds in belangrijke mate beïnvloed door de gevolgen van de afsluiting van de Zuiderzee, waardoor o.a.:

- grootschalige sedimentatie ('verlanding') plaatsvindt (zie Figuur A-1 en Figuur A-2), aangezien netto sedimentimport groter is dan de huidige zeespiegelstijging en bodemdaling;
- daardoor zijn grote gedeelten subgetijdengebied opgehoogd naar intergetijdengebied, met als gevolg een smallere geul en afname van het getijdebiet; en
- het Marsdiep zich uitbreidt in noordoostelijke richting, waardoor het wantij steeds verder opschuift.
- Uit recente bodempeilingen blijkt een interessante morfologische ontwikkeling rond de zuidelijke Boontjes plaats te vinden. De hoofdgeul vanuit het Marsdiep (Texelstroom) breidt licht noordwaarts uit en vormt hierbij een nieuwe vloed-schaar, oostelijk van de huidige vaarweg (zie Figuur 1-2).



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



Figuur 1-2: Recente bodempeilingen van Boontjes waarin zichtbaar wordt dat de nieuwe vloedschaar zich ten oosten van de betonde vaarweg Boontjes in noordwaartse richting ontwikkeld. Met de witte stippellijn is een mogelijke alternatieve vaarroute aangegeven.

Getijvoortplanting en stromingspatronen:

- De huidige ligging van het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie, dat voorheen in het drempelgebied van de Boontjes lag, is onduidelijk, mede doordat normaliter over het wantij geen geulen lopen. Nog altijd lijkt de getijvulling van de Boontjes zowel vanuit het Marsdiep als vanuit het Vlie afkomstig.
- De getijvulling van het Kimstergat vindt grotendeels plaats vanuit het Vlie via de Geul langs de Pollendam en daarnaast via het Molenrak, waarbij de uitwisseling met de Boontjes dus beperkt lijkt. Als gevolg hiervan lijkt het Kimstergat zich (morfologisch) ook meer te oriënteren op de Geul langs de Pollendam.

Wind & golven:

- Windgolven spelen een rol via resuspensie van bodemslib 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.
- De verwachting is dat het slib, na resuspensie door golven, in de geul terechtkomt door dwarsstroming (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).

Gravitatiecirculatie:

- De combinatie van getijdewerking en de zoetwaterspui vanuit Kornwerderzand leidt 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 *Estuarine Turbidity Maximum* (ETM of troebelheidsmaximum) in de Boontjes ontstaan. Bij afwezigheid van deze zoetwaterspui is het transport uniform over de gehele verticaal (tijdens vloed noordwaarts en tijdens eb zuidwaarts).
- Een retourstroming van verspreiding van gebaggerd materiaal vanuit het Kimstergat kon met het model niet bevestigd worden, al zou de korte gesimuleerde periode daar van invloed op kunnen zijn geweest. Het is goed hierbij te realiseren dat het baggerbezwaar uit de haven van Harlingen, tevens verspreid in het Kimstergat, veel groter is dan dat van de Boontjes (factor 4-5).

Bodemsamenstelling:

- als gevolg van de grootschalige morfologische ontwikkelingen en de onderhoudsbaggerwerkzaamheden is het bodemslibgehalte toegenomen;
- in het voorjaar en in de zomermaanden is er een slappere bodemlaag van 20- 50 cm dik aanwezig in de noordelijke Boontjes, mogelijk betreft dit fluid mud;
- seizoensgedreven flocculatie door algengroei kan mogelijk een oorzaak zijn van fluid mudvorming; en
- ook de scheepvaart (waaronder de baggerschepen) kunnen door agitatie van bodemslib hebben bijgedragen aan de vorming van fluid mud.

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 van het gemiddelde getijdebiet (ondanks hogere pieksnelheden);
- toegenomen sedimentaanvoer naar de vaargeul; en
- mogelijk ook afname van golfgedreven resuspensie in de vaargeul.

Vaargeuldimensies:

- bij een verdere verdieping van de vaargeul is de verwachting dan ook dat het baggerbezwaar verder toe zal nemen door verdere afname van golfgedreven resuspensie en mogelijk een verdere toename van sedimentaanvoer naar de vaargeul; en
- de verwachting is dat een ondiepere vaargeul dichterbij de evenwichtsdoorsnede van de Boontjes ligt en dat het baggerbezwaar bij een kleinere onderhoudsdiepte dus zal afnemen.

2 Methode

In dit hoofdstuk worden de beschikbare data en gegevens toegelicht (Paragraaf 2.1). Daarna worden in Paragraaf 2.2 hypothesen uit eerdere studies beschreven, die richting geven aan de data analyse.

2.1 Beschikbare data en gegevens voor de T0-meetcampagne

De T0-meetcampagne in en rondom vaarweg Boontjes omvat de volgende onderdelen:

- Er zijn vier meetframes geplaatst in de periode van medio oktober tot medio december 2024, met instrumenten om stroomsnelheden en de troebelheid van het water te meten;
- Er zijn varende 13-uursmetingen uitgevoerd om de stroming en sedimentconcentraties langs vier raaien te meten. De vier raaien zijn één keer bij springtij en één keer bij doodtij gemeten;
- Tijdens het uitvoeren van de varende 13-uursmetingen zijn diepteprofielen van temperatuur, geleidbaarheid en troebelheid gemeten. Uit de geleidbaarheid kan de saliniteit worden afgeleid, en uit de troebelheid de sedimentconcentratie;
- Er zijn sedimentmonsters genomen van de bodem van de vaarweg Boontjes en het Kimstergat, waarvoor de samenstelling van het sediment is bepaald.

2.1.1 Meetframes

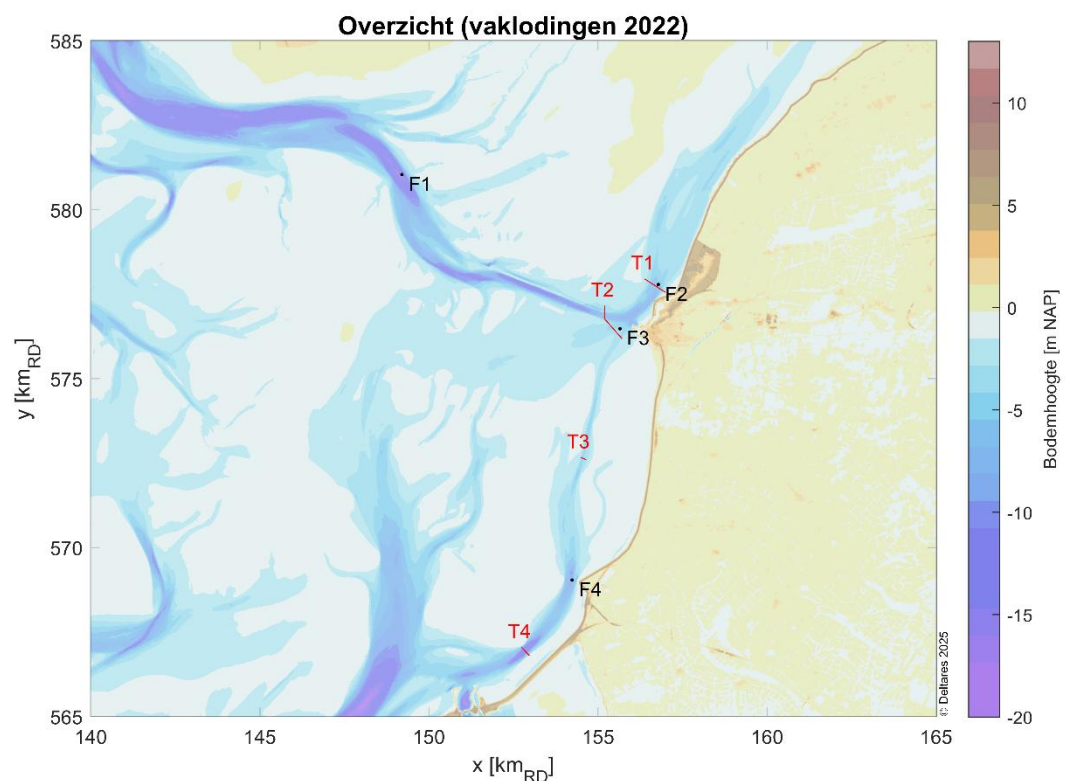
De locaties van de vier meetframes F1, F2, F3 en F4 zijn weergegeven in Figuur 2-1 en opgenomen in Tabel 2-1. Frame F1 ligt in de Blauwe Slenk, waar de lokale bodemhoogte ongeveer -14.6 m NAP is. Deze locatie ligt een stukje bij de Boontjes vandaan en fungeert als referentiemeting, om de stroming en het sedimenttransport vanaf het Vlie richting de Boontjes te bepalen. F2 ligt in het Kimstergat, ten noorden van Harlingen. De lokale bodemhoogte is hier ongeveer -5.9 m NAP. F3 ligt in het noordelijke uiteinde van de Boontjes, waar de Boontjes en het Molenrak ten zuiden van de havenopening van Harlingen en de Geul langs de Pollendam bij elkaar komen. De lokale bodemhoogte is hier ongeveer -4.1 m NAP. Locatie F4 ligt aan de zuidkant van de Boontjes, ten hoogte van Zurich. Uit de meetdata voor locatie F4 blijkt dat het meetframe aan het begin van de meetcampagne, op 17 oktober, is verschoven van de locatie waar het frame was geplaatst naar een dieper deel van de geul. De lokale bodemhoogte is hier ongeveer -8.5 m NAP. Door nautische restricties konden er tijdens de T0-meetcampagne geen meetframes geplaatst worden in het smalle deel van de vaarweg Boontjes tussen locaties F3 en F4.

De meetframes zijn uitgezet op 8 oktober 2024. Op 12 november is er onderhoud aan de frames uitgevoerd, zodat er gedurende een paar uur geen metingen werden uitgevoerd. De frames zijn opgehaald op 16 december.

De vier meetframes zijn identiek ingericht met instrumenten. Op elk frame zijn een ADCP-, een ADV-, twee OBS-sensoren en een CTD-sensor gemonteerd. De ADCP zit bovenop het frame (druksensor 0,65 m boven de bodem) en meet 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. Met de ADCP is elke 30 seconden een snelheidsprofiel gemeten. De ADV 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. Deze frequentie is normaal gesproken hoog genoeg om golfparameters af te leiden uit het door de ADV gemeten druksignaal of de stroomsnelheden.

Echter, doordat de frames relatief diep staan, en de golven in de Waddenzee erg kort zijn, bereiken fluctuaties in de waterdruk en stroomsnelheden door golven de druksensor niet altijd. Vooral op locaties F1 zorgt dit ervoor dat er geen betrouwbaar golfsignaal beschikbaar is. Op de andere locaties is er geen betrouwbaar golfsignaal beschikbaar in het geval van korte golven. De ADV-metingen worden vooral gebruikt als maat voor de stroomsnelheid bij de bodem.

Aan de ADV zijn per frame twee OBS-sensoren gekoppeld (type OBS-3+). 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. De troebelheid die met de OBS-sensoren wordt gemeten kan worden omgezet naar concentratie zwevende stof (SPM) door middel van kalibratie. Dit wordt later in dit hoofdstuk toegelicht. Tot slot is er een CTD gemonteerd op alle frames, die eens per 10 minuten een meting doet van 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.



Figuur 2-1: Locaties van meetframes (F1-F4, zwarte stippen) en raaien voor varende metingen (T1-T4, rode lijnen) voor de T0-metingen.

Tabel 2-1: Coördinaten van de vier locaties waar meetframes zijn uitgezet. De bodemhoogte is bepaalde 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

2.1.2 Varende metingen

De raaien waarlangs de 13-uurs varende metingen zijn uitgevoerd zijn weergegeven met rode lijnen in Figuur 2-1, en de coördinaten van de begin- (, midden-) en eindpunten van die raaien zijn opgenomen in Tabel 2-2. Raai T1 ligt in het Kimstergat, net ten zuiden van waar het Kimstergat uitwaaiert in twee ondiepere geulen. Raai T2 loopt door de Geul langs de Pollendam, het Molenrak, en het noordelijke uiteinde van de Boontjes. Deze raai bestaat uit twee delen, met een knik tussen de Geul langs de Pollendam en het Molenrak. De gemeten data kan worden opgeknipt in twee delen, het deel ten noorden en het deel ten zuiden van het knikpunt, omdat het eigenlijk twee verschillende geulsystemen zijn die worden ingemeten, maar die vanuit praktische overwegingen aan elkaar gekoppeld zijn. Raai T3 ligt halverwege de Boontjes, en Raai T4 ligt in het zuidelijke uiteinde van de Boontjes, dichtbij Kornwerderzand.

Er zijn 13-uurs metingen uitgevoerd op de vier raaien bij doodtij en bij springtij. Op raaien T1 en T2 is dit gedaan op 17 oktober (springtij) en op 24 oktober (doodtij) 2024. Op raaien T3 en T4 is dit gedaan op 18 oktober (springtij) en 25 oktober (doodtij) 2024. Per 13-uurs meting op de raaien T1 en T2 is ongeveer twee keer per 45 minuten een meting langs de raaien uitgevoerd (d.w.z. één keer heen en weer per 45 minuten). De raaien T3 en T4 liggen iets verder uit elkaar, zodat er meer vaartijd nodig is tussen de raaien. Daarom is op de raaien T3 en T4 per 13-uurs meting ongeveer twee keer per uur een meting langs de raaien uitgevoerd.

Bij de varende metingen wordt gebruik gemaakt van een ADCP die naast het meetschip vanaf de waterkolom naar beneden gericht is. Hiermee wordt een profiel van de stroomsnelheid gemeten tussen de onderkant van de ADCP en de bodem. Net als voor de ADCP-sensoren die op de meetframes gemonteerd zijn is bij het uitvoeren van de varende metingen een laagdikte van 0,5 m gebruikt. Door de insteekdiepte van de ADCP en de *blanking distance* worden de stroomsnelheden in de bovenste 1,27 m van de waterkolom niet gemeten. De gemeten stroomsnelheden bij de bodem zijn onbetrouwbaar door zogenaamde *side lobe effects* van de akoestische bundels van de ADCP. Daarom is de data die in de onderste 6% van de waterkolom is gemeten tijdens de verwerking verwijderd. De gemeten stroomsnelheden zijn opgeslagen als stroomsnelheden in x- en y-richting, maar in de verwerking van de data ook omgezet naar stroomsnelheden loodrecht op en in de richting van de raai, representatief voor respectievelijk de langs- en dwarsrichting van de geulen.

De akoestische *backscatter* van de ADCP is een maat voor de hoeveelheid zwevende stof (SPM) die in de waterkolom aanwezig is. Als er meer deeltjes (bijv. zandkorrels en slibvlokken) in de waterkolom aanwezig zijn is er namelijk een sterkere reflectie van het akoestische signaal dan wanneer er weinig deeltjes in de waterkolom aanwezig zijn. Door kalibratie kan daarom uit de ADCP-data de concentratie zwevende stof worden geschat, en in combinatie met de snelheidsmetingen geeft dit een schatting van het suspensieve sedimenttransport.

Voor de varende metingen is de (akoestische) ADCP *backscatter* beschikbaar als maat voor de sedimentconcentraties. Voor de framemetingen zijn sedimentconcentraties afgeleid van de (optische) OBS. Belangrijk verschil tussen deze sensoren is dat kleine deeltjes, zoals slibvlokken, een optisch signaal sterker verstrooien dan een akoestisch signaal. Voor grote deeltjes, zoals zandkorrels, is dit andersom. Daarom wijkt de kalibratiecurve voor de ADCP af van die van de OBS. Dit verklaart mogelijk verschillende zwevend stofgehalten op basis van de verschillende meetinstrumenten.

Door gebrek aan een specifieke kalibratie van de ADCP-sensoren die op de frames gemonteerd zaten en vanwege beperkingen in beschikbare tijd en budget, is voor de framemetingen geen zwevend stofgehalten bepaald uit de ADCP *backscatter*. Het ruwe *backscatter* signaal kan wel gebruikt worden voor een kwalitatieve inschatting van variaties in de concentraties zwevende stof in de tijd.

Tabel 2-2: 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]
T1	Kimstergat	156380	577950			157000	577550
T2	Pollendam-Molenrak-Boontjes	155194	577157	155189	576776	155714	576178
T3	Boontjes midden	154480	572670			154650	572600
T4	Boontjes zuid	152740	567050			152970	566800

2.1.3 Profielmetingen

Tijdens het uitvoeren van de varende ADCP metingen zijn profielmetingen over de waterdiepte uitgevoerd, waarbij een CTD instrument en een OBS (type EXO) vanaf het meetschip naar de bodem zijn laten zakken, en weer opgehaald. Het CTD instrument meet de lokale diepte onder het wateroppervlak, de watertemperatuur en de elektrische geleidbaarheid. Uit de geleidbaarheid is in de verwerking van de meetdata door Rijkswaterstaat de chlorositeit bepaald. Ongeveer 55% van de saliniteit van zeewater komt van chloride-ionen. Een schatting van de saliniteit (in PSU) volgt daarom uit het vermenigvuldigen van de chlorositeit (in g/kg) met 1,81. Voor het gemak is bij deze omzetting uitgegaan van een constante dichtheid van zeewater van 1027 kg/m³. Uit de gemeten troebelheid is de concentratie suspensief sediment bepaald, gebruik makend van de beschikbare kalibratiegegevens. Die kalibratiegegevens worden later toegelicht.

Op elk van de vier raaien zijn 6 of 7 profielmetingen uitgevoerd gedurende het getij, zowel tijdens de metingen bij springtij op 17 en 18 oktober als bij de metingen bij doodtij op 24 en 25 oktober. De profielmetingen zijn in het midden van de geul uitgevoerd. Op de raai Pollendam-Molenrak-Boontjes zijn de profielmetingen in de geul langs de Pollendam uitgevoerd.

2.1.4 Bodembemonstering

Tijdens de bodembemonstering zijn op 45 locaties bodemonsters verzameld, door subsamples te nemen van boxcore monsters die in het kader van een ander project werden verzameld. De bemonstering is uitgevoerd op 15 januari 2025. De 45 monsterlocaties liggen verspreid in de Boontjes en het Kimstergat. Voor elk van de bodemonsters 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).

2.1.5 Kalibratie van troebelheidssensoren

Tijdens de varende 13-uurs metingen en de profielmetingen zijn op verschillende momenten en op verschillende locaties kalibratiemonsters genomen om de conversie van troebelheid (eenheid NTU) naar concentraties zwevende stof (ook wel 'Suspended Particulate Matter' genaamd afgekort tot SPM, eenheid mg/L, of g/L = kg/m³) te bepalen. Hiervoor is een OBS (type EXO) gebruikt. Vanaf het meetschip worden 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 beiden tegen elkaar uit te zetten is een conversiefactor van troebelheid (in NTU) naar concentratie zwevende stof (in mg/L) van 3,54 bepaald voor de T0-meetcampagne. Deze conversiefactor wordt voor de OBS-metingen op de verschillende frames gebruikt.

De concentraties zwevende stof uit de opgepompte watermonsters zijn daarnaast gebruikt om de akoestische *backscatter* van de varende ADCP metingen te converteren naar SPM. De watermonsters zijn immers verzameld tijdens het uitvoeren van de varende ADCP metingen.

De ruwe data (d.w.z. het analoge signaal) uit de OBS-metingen op de verschillende meetframes is met behulp van de kalibratiecertificaten van de instrumenten omgezet naar een troebelheid in NTU. Vervolgens is de conversiefactor van 3,54 gebruikt om de concentratie zwevende stof (SPM, in mg/L) te bepalen. De conversiefactor van 3,54 voor de T0-meetcampagne is hoger dan verwacht. Voor de kalibratie van troebelheidsmetingen bij de meetpalen Holwerd en Dantziggat (Bi et al., 2024) is een vergelijkbare procedure toegepast met meer watermonsters, en was de conversiefactor niet hoger 1,9 (mg/L)/NTU. Het toepassen van de conversiefactor van 3,54 (mg/L)/NTU zorgt voor hoge SPM waarden in de gemeten tijdreeksen, met pieken tot wel 8000 mg/L op locaties F2 (Kimstergat) en F4 (Boontjes-Zuricheroord). Het is op dit moment nog niet duidelijk waarom de conversiefactor voor de T0-meetcampagne zoveel hoger is dan bij eerdere meetcampagnes, en hoe betrouwbaar de hoge concentraties zijn. Daarom zijn de resultaten die in Hoofdstuk 3 zijn beschreven voor wat betreft sedimentconcentraties en -transporten vooral kwalitatief (bijv. variaties in ruimte en tijd) in plaats van kwantitatief (bijv. getransporteerde massa). Bij opvolging van de T0-meetcampagne zal meer aandacht besteed worden aan de kalibratie van de troebelheidssensoren, zodat alsnog een kwantitatieve analyse van de data uitgevoerd kan worden.

Dat de kalibratiefactor voor de conversie van troebelheid naar sedimentconcentratie (SPM) afwijkt kan enerzijds liggen aan de troebelheid die met de OBS (type EXO) is gemeten, en anderzijds aan de bepaling van de SPM in watermonsters. Als dat laatste het geval is dan werkt dit door in de kalibratie van de (akoestische) ADCP backscatter naar SPM, omdat hiervoor dezelfde watermonsters zijn gebruikt als voor de kalibratie van de optische sensoren. Om die reden is de kwantitatieve waarde van de SPM uit de ADCP backscatter op dit moment nog onduidelijk.

2.1.6 Aanvullende data

Bij de analyse van de T0-data zijn de volgende aanvullende datasets gebruikt:

- Bodempeilingen van de westelijke Waddenzee en de vaargeul Boontjes, in de vorm van vaklodingen en beheerlodingen die door Rijkswaterstaat zijn uitgevoerd.
- De meteorologische metingen bij KNMI-station Stavoren zijn gebruikt voor tijdreeksen van de windsnelheid en windrichting gedurende de meetperiode. De data is geleverd door het CIV op aanvraag via Servicedesk Data en heeft een resolutie van $\Delta t = 10$ min.
- Spuidebieten bij de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand gedurende de meetperiode zijn aangeleverd door Rijkswaterstaat. Deze data bevat het spuidebiet met een resolutie van $\Delta t = 10$ min.
- Baggervolumes in de vaargeul Boontjes gedurende de T0-meetcampagne:
 - September 2024: 0 m³;
 - Oktober 2024: 5.900 m³;
 - November 2024: 13.500 m³; en
 - December 2024: 1.000 m³.

Deze baggervolumes waren relatief laag ten opzichte van de gemiddelde baggervolumes per maand sinds de drempelverwijdering. Vermoedelijk heeft er dus ook relatief weinig sedimentatie plaatsgevonden in de vaargeul, al zijn de bodempeilingen niet in detail geanalyseerd. Het is goed om hier rekening mee te houden bij interpretatie van de resultaten van de pilot.

2.2 Hypotheses

In paragraaf 1.4 is het bestaande conceptuele systeembegrip van de vaarweg Boontjes en de toename van het baggerbezwaar beschreven. Het is niet mogelijk om op alle aspecten nader in te gaan in dit rapport. Gezien de beschikbare metingen uit de T0-meetcampagne wordt gewerkt met de volgende hypothesen 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 komt voornamelijk vanuit het Vlie; en*
- c. de getijuitwisseling tussen Boontjes en Kimstergat is beperkt.*

hypothese 2: Wind en golven:

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

hypothese 3: Gravitatiecirculatie:

- a. De zoetwaterspui bij Kornwerderzand drijft een gravitatiecirculatiepatroon aan in de Boontjes met aan het oppervlak noordwaarts gericht transport (zoetwaterpuls) en nabij de bodem zuidwaarts gericht transport van water en sediment.*
- b. Bij afwezigheid van deze zoetwaterspui is het transport uniform over de gehele verticaal (tijdens vloed noordwaarts en tijdens eb zuidwaarts).*

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 kan met de aankomende meetcampagnes worden bekeken of de bodemsamenstelling gedurende de looptijd van de pilot verandert.

3 Waterbeweging en sedimentconcentraties

In dit hoofdstuk wordt eerst een algemeen beeld van de gemeten waterbeweging en sedimentconcentraties gegeven. Daarna worden in de volgende hoofdstukken achtereenvolgend verschillende processen en hun bijdragen aan gemeten variaties in ruimte en tijd uitgewerkt, achtereenvolgens stroomsnelheid (Hoofdstuk 3), wind en golven (Hoofdstuk 4), residuele transporten (Hoofdstuk 5) en stratificatie en gravitatiecirculatie (Hoofdstuk 6). In Hoofdstuk 7 komen de metingen van de bodemsamenstelling aan bod. Tabellen met een aantal basisstatistieken (waaronder gemiddelde, standaarddeviatie, minimum en maximumwaarde) van alle parameters zijn opgenomen in Bijlage B.1.

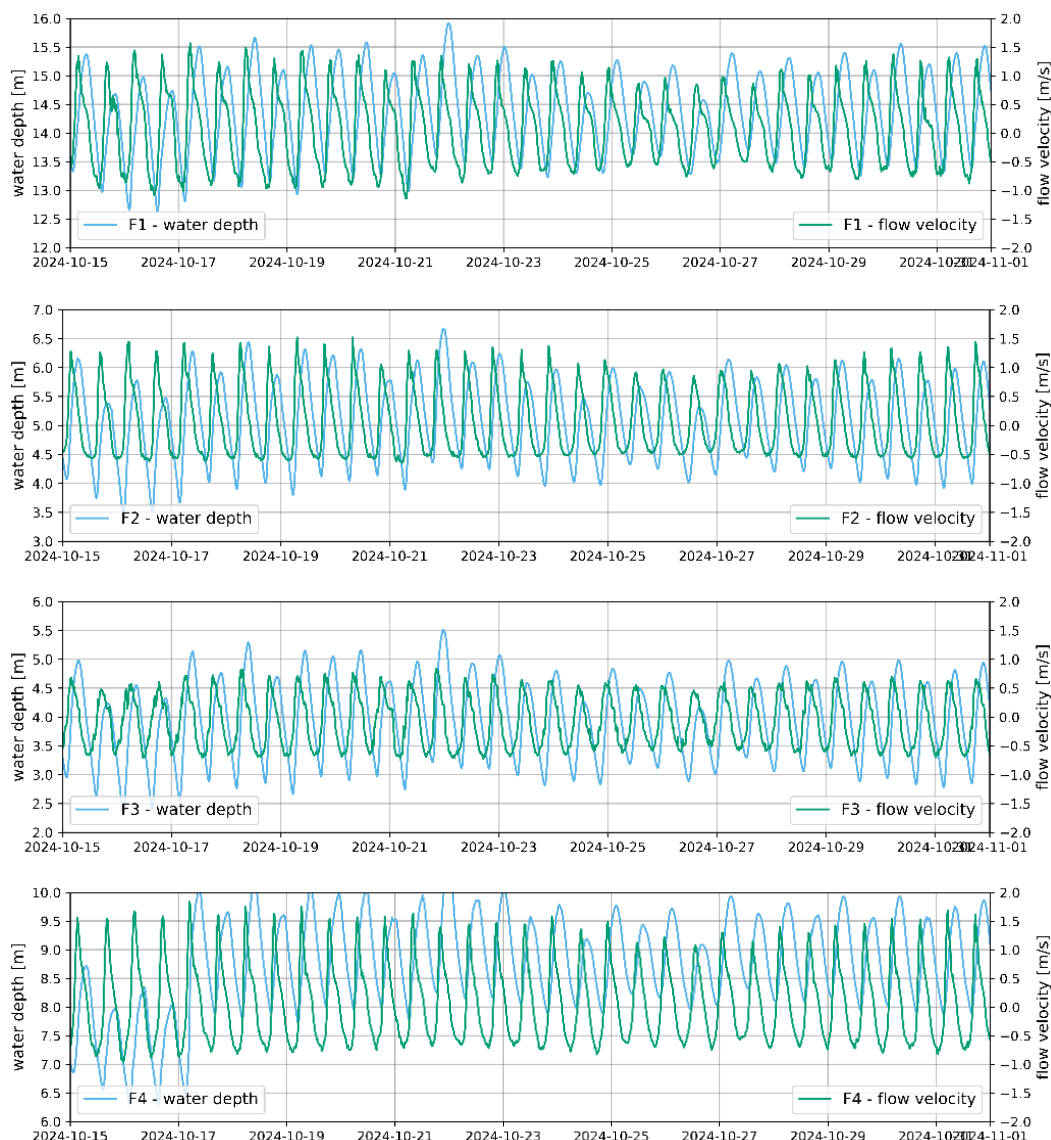
3.1 Gemeten stroomsnelheden

De vier meetframes stonden in getijdegeulen met een verschillende diepte. Als eerste blik op de hydrodynamische condities op de vier meetlocaties toont Figuur 3-1 tijdreeksen van de gemeten waterdiepte (d.w.z., waterhoogte boven de druksensor van de ADV, welke op ongeveer 65 cm boven de bodem zat), en de stroomsnelheid in de richting van de geul, positief in vloedrichting. In deze tijdreeksen is al een spring-doodtij variatie in de waterdiepte en stroomsnelheid zichtbaar, met bijvoorbeeld springtij rond 20 oktober en doottij rond 27 oktober. Op locaties Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2) en Boontjes zuid (F4) is de gemeten piek stroomsnelheid tijdens vloed duidelijk groter dan de piek stroomsnelheid tijdens eb. Dit wordt bevestigd in Figuur 3-2, waarin de gemeten snelheidsvectoren voor de gehele meetperiode worden getoond ten opzichte van de verandering van de waterstand in de tijd. 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).

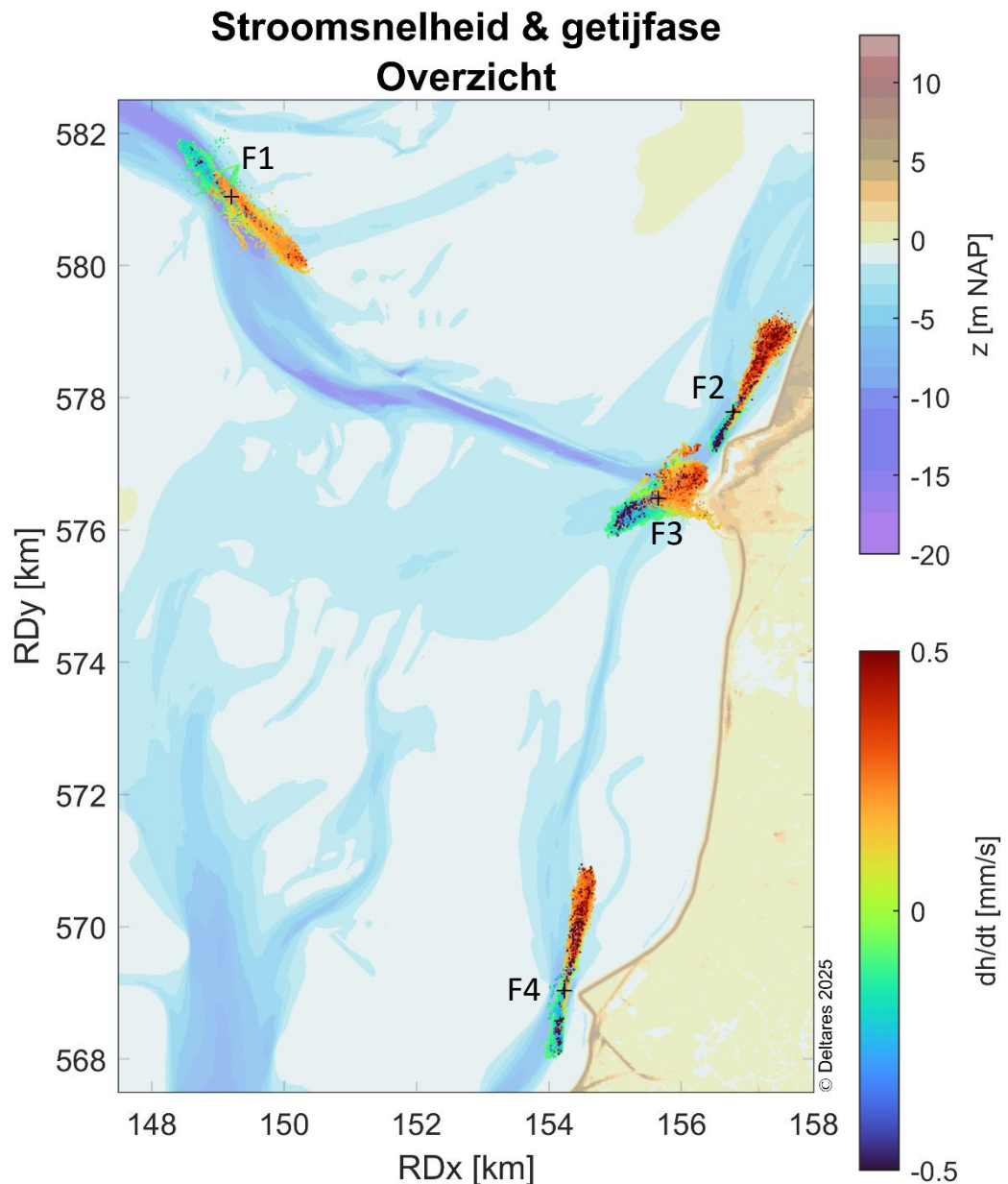
De vloedstroming richting Harlingen komt deels vanuit het Vlie (meetlocatie F1 in de Blauwe Slenk) en deels vanuit het Marsdiep (meetlocatie F4 in de zuidelijke Boontjes). Op meetlocatie Boontjes noord (F3), op het noordelijke uiteinde van de Boontjes, is de vloedstroming gericht naar het noorden, wat suggereert dat er tijdens vloed een uitstroming is vanuit de Boontjes richting Harlingen, en dat er dus in de Boontjes geen sprake is van een hydrodynamisch wantij. De vloedstromingen vanuit het Marsdiep (Boontjes en/of Molenrak) en het Vlie (Geul langs de Pollendam) gaan dan beiden richting het Kimstergat.. Omgekeerd lijkt de ebstroming vanuit het achterliggende kombergingsgebied (d.w.z., het Kimstergat en daar voorbij) zich ook te verdelen over deze geulen die verbonden zijn met enerzijds het Marsdiep en anderzijds het Vlie. In Figuur 3-2 is ook te zien dat de vloedstroming bij meetlocatie F3 incidenteel naar het oosten/zuidoosten gericht is. Waarschijnlijk gebeurt dit tijdens bepaalde windcondities, met bijvoorbeeld wind vanuit het noordwesten. In dat geval kan een deel van de Boontjes gevuld worden vanuit het Vlie (Geul langs de Pollendam), en is er dus sprake van een hydrodynamisch wantij in de Boontjes. Die variatie met windcondities komt verder aan bod in Paragraaf 3.2.

De vloedstroming bij meetlocatie Boontjes noord (F3) is nog wel naar het noordoosten gericht, maar de stroomsnelheden zijn een stuk kleiner dan bij meetlocatie Boontjes zuid (F4). Pieken in de gemeten stroomsnelheden bij vloed zijn bij meetlocatie F4 groter dan 1,5 m/s, en liggen bij meetlocatie F3 doorgaans rond de 0,6-0,7 m/s. Dit suggereert een sterke gradiënt in de sterkte van de vloedstroming over de lengterichting van de Boontjes.

De gemeten piek stroomsnelheden bij eb zijn bij meetlocatie F3 maar iets kleiner dan bij meetlocatie F4, zodat de er bij meetlocatie F4 duidelijk sprake is van een vloeddominant signaal (d.w.z., op basis van snelheidspieken), terwijl dat bij meetlocatie F3 nauwelijks het geval is. De gradiënt in vloeddominantie is waarschijnlijk erg relevant voor (gradiënten in) sedimenttransport, en mogelijk voor aanslibbing/sedimentatie in de geul.

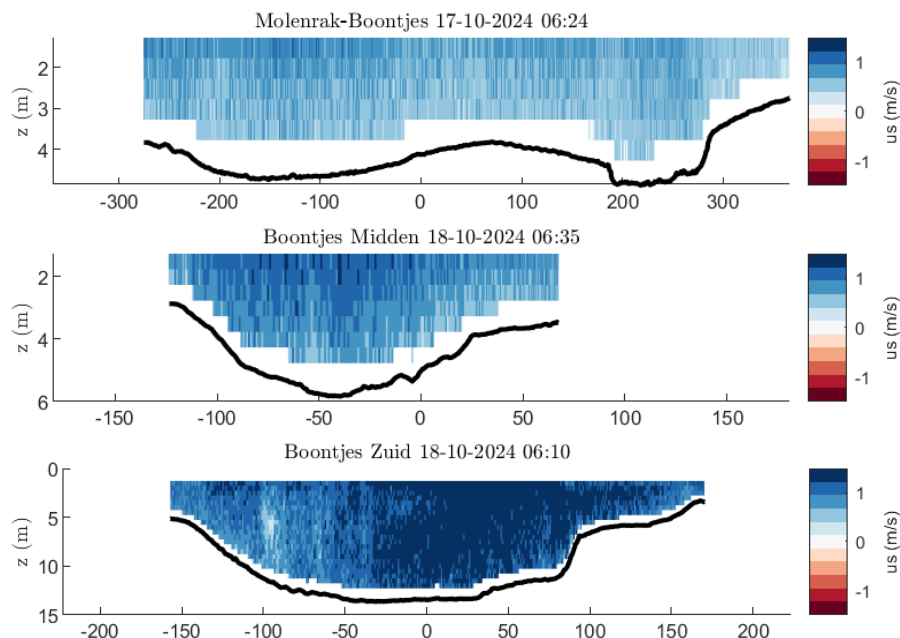


Figuur 3-1: Tijdreeksen van de gemeten waterdiepte boven de ADV druksensor en de gemeten stroomsnelheid in de richting van de geul (vloed = positief) in de tweede helft van oktober 2024 op de vier verschillende meetlocaties (van boven naar beneden Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2), Boontjes noord (F3) en Boontjes zuid (F4)). De sprong in de gemeten waterdiepte op locatie F4 is het gevolg van een verschuiving van het meetframe naar een dieper deel van de getijdegeul.



Figuur 3-2: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op de vier meetlocaties tijdens de gehele meetperiode. De meetlocaties zijn weergegeven 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.

De gradiënt in piek stroomsnelheid bij vloed over de lengte van de Boontjes wordt bevestigd door de varende ADCP metingen, te zien in Figuur 3-3. Ondanks dat de metingen (door praktische overwegingen) niet op hetzelfde moment zijn uitgevoerd, is duidelijk dat de piek stroomsnelheid bij vloed bij springtij op 17 en 18 oktober kleiner is in het deel van de Boontjes op raai T2 (Molenrak-Boontjes) dan op raai T3 (Boontjes midden), en kleiner is op raai T3 dan op raai T4 (Boontjes zuid). Vergelijkbare figuren voor de varende metingen bij doottij (niet weergegeven) tonen dezelfde gradiënt, al is het verschil tussen raaien T3 (Boontjes midden) en T4 (Boontjes zuid) dan kleiner, omdat de maximale stroomsnelheid in Boontjes Zuid bij doottij relatief klein is.

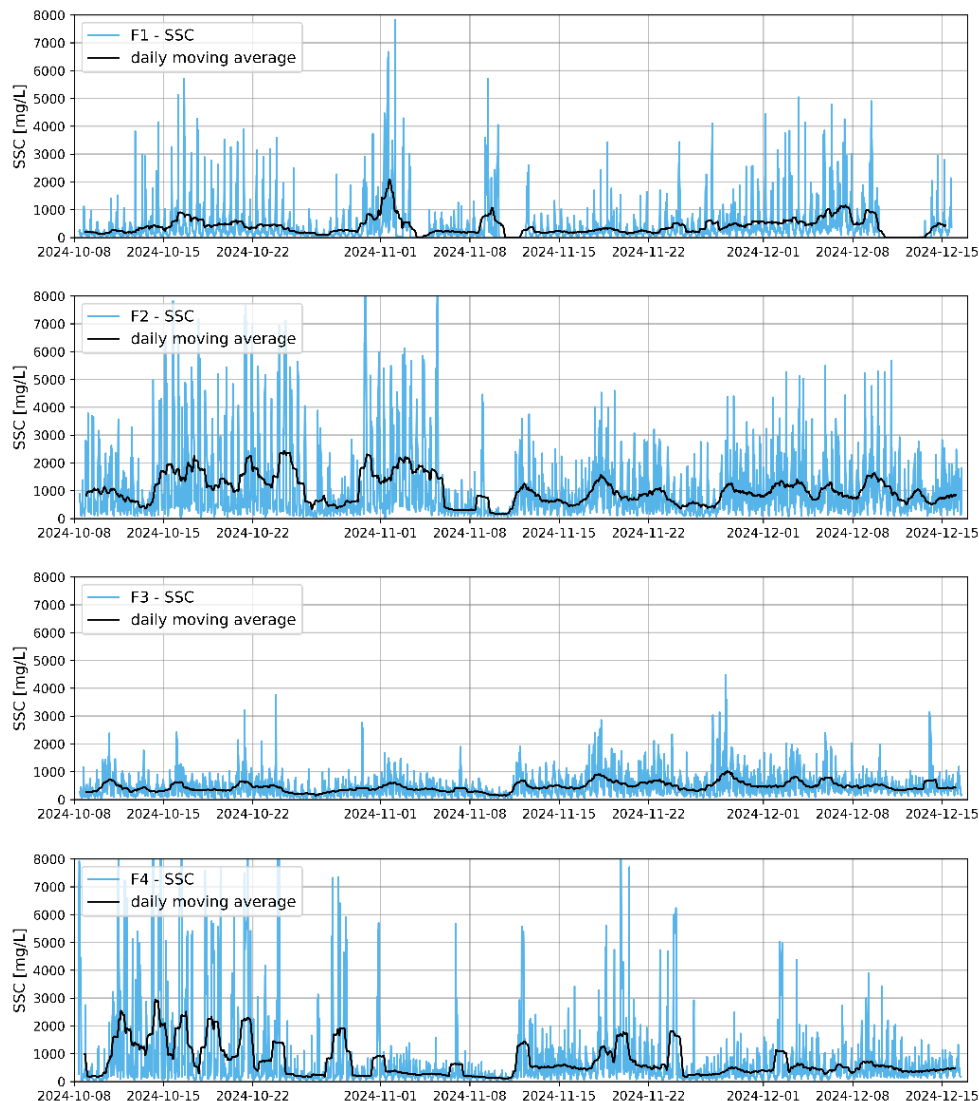


Figuur 3-3: Gemeten stroomsnelheid in de richting van de geul tijdens piek vloedstroming op 17 en 18 oktober 2024 op raaien Molenrak-Boontjes (T2; boven), Boontjes Midden (T3; midden) en Boontjes Zuid (T4; onder). Positieve waarden zijn in vloedrichting, negatieve waarden in ebbichting. Merk op dat alleen het rechterdeel van de raai Molenrak-Boontjes de geul Boontjes betreft en dat de schaal van assen verschilt tussen de panelen. De kleurschaal is echter gelijk voor de drie panelen.

3.2 Gemeten troebelheid en analyse sedimentconcentraties

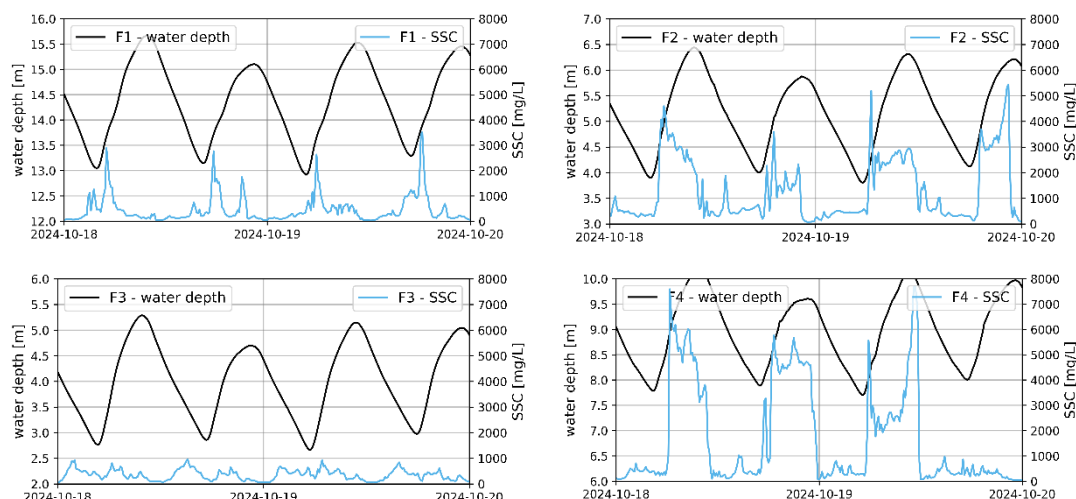
Tijdreeksen van de gemeten sedimentconcentraties (SPM) bij de bovenste optische sensor op de frames (0,62 m boven de bodem) zijn weergegeven in Figuur 3-4. Zoals besproken in paragraaf 2.1.4 zijn de gemeten concentraties die hier worden weergegeven hoog, doordat de gebruikte kalibratiefactor wellicht te hoog is. De variaties in SPM over tijd en ruimte zijn echter onafhankelijk van die kalibratiefactor.

De gemeten concentraties zijn het hoogst op meetlocatie F2 in het Kimstergat en het laagst op meetlocatie F3 op het noordelijke uiteinde van de Boontjes. Op meetlocatie F1 zijn de daggemiddelde concentraties over het algemeen ook relatief laag, maar de concentratie piekt aan het einde van de eb, rond laagwater. In de meetreeks op locatie F4 valt op dat de (daggemiddelde) SPM soms voor een aantal vloedperiodes achter elkaar erg hoog is, terwijl er ook periodes in de tijdreeksen zitten waarin dat niet het geval is. De pieken zijn gemeten op andere momenten dan wanneer de gemeten concentraties op de andere locaties hoog zijn. Sturende processen voor die verschillende variaties over tijd komen later in dit hoofdstuk en de volgende hoofdstukken aan bod.



Figuur 3-4: Tijdreeksen van de gemeten sedimentconcentraties (SSC ofwel SPM) bij de bovenste OBS (0,62 m boven de bodem) op de frames bij Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2), Boontjes noord (F3) en Boontjes zuid (F4). Op 12 november is onderhoud aan de frames uitgevoerd, waardoor de meetreeksen tijdelijk is onderbroken.

Op elk van de vier locaties piekt de gemeten sedimentconcentratie aan het begin van de vloedfase, net na kentering. Dit is weergegeven met fragmenten van de gemeten tijdreeksen in Figuur 3-5. Op basis van Figuur 3-1 werd eerder al geconcludeerd dat er weinig verschil zit in de fasering van verticaal getij (waterstanden) en horizontaal getij (stroomsnelheden). Daarom wordt hier uitgegaan van minimale stroomsnelheden tijdens kentering. Op meetlocaties Kimstergat (F2) en Boontjes zuid (F4) is het SPM-gehalte gedurende de gehele vloedfase relatief hoog, en laag tijdens de gehele ebfase. Dit suggereert een (veel) groter suspensief sedimenttransport in vloed- dan in ebrichting. Het residuele transport komt verder aan bod in Paragraaf 3.4. In de fragmenten van de tijdreeksen op locaties F2 en F4 in Figuur 3-5 valt verder op dat de gemeten concentratie ver terugzakt rond hoogwater-kentering. Dit suggereert dat het suspensieve sediment een voldoende hoge valsnelheid heeft om tijdens de rustige condities tijdens kentering (d.w.z., één tot enkele uren) uit te zakken naar de bodem.



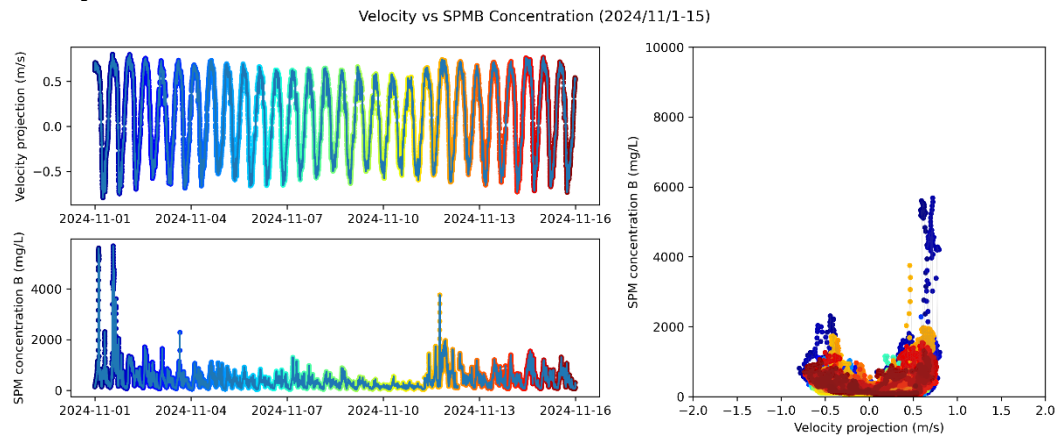
Figuur 3-5: Tijdreeksen van de gemeten waterdiepte boven de ADV druksensor en de sedimentconcentraties (SSC ofwel SPM) bij de bovenste OBS (0,62 m boven de bodem) op de frames op meetlocaties F1-F4 tijdens springtij op 17 en 18 oktober 2025.

3.3 Samenhang waterstanden en stroomsnelheden met SPM

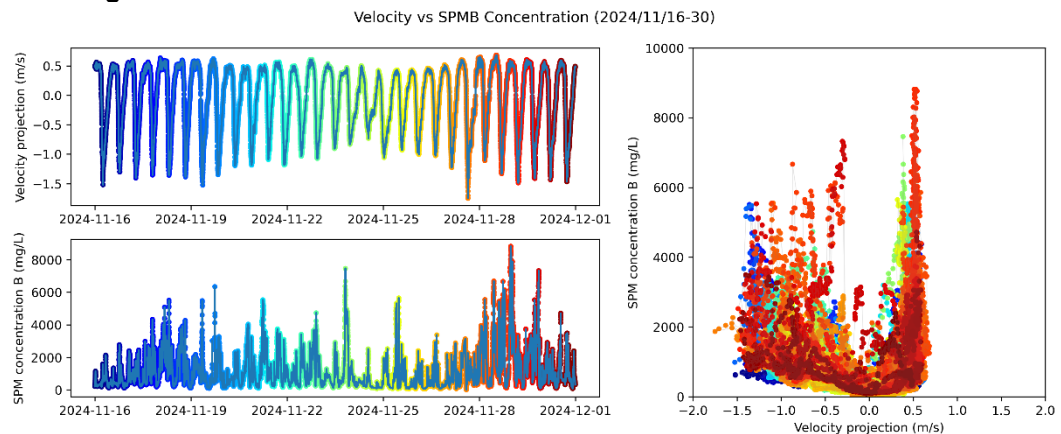
Uit een vergelijking van tijdreeksen van stroomsnelheid en sedimentconcentraties (Figuur 3-6 en Figuur C-1 t/m Figuur C-4 in Bijlage C) blijkt dat sommige pieken in de sedimentconcentratie duidelijk samenhangen met de getijstrooming (hoge sedimentconcentraties komen voor bij hoge stroomsnelheid). Andere periodes met hoge sedimentconcentraties worden niet tot nauwelijks verklaard door de stroomsnelheid, vermoedelijk doordat andere sturende processen (zoals wind en golven of stratificatie) dominant lijken te zijn.

Om de relatie tussen variaties in SPM en verschillende parameters te kwantificeren zijn correlatiecoëfficiënten van SPM met diverse parameters bepaald in Bijlage B.2. De samenhang van de gemeten waterstanden en stroomsnelheden met SPM zijn opgenomen in Tabel B-5. Vooral bij de ondieper gelegen locaties Boontjes noord (F3) en Kimstergat (F2) lijkt de stroomsnelheid een belangrijk proces, te zien aan de matige correlaties (respectievelijk $p=+0,40$ en $p=+0,41$, zie bijlage B.2.1) en aan de duidelijke 'vlinder' vorm van de figuren (hoge SPM aan de uiteinden en lage SPM in het midden). Bij de hoge concentraties tijdens strooming in vloedrichting op locaties Kimstergat (F2) en Boontjes zuid (F4) horen correlatiecoëfficiënten van respectievelijk 0,42 (matig) en 0,21 (zwak). Ook de getijasymmetrie is in Figuur 3-6 duidelijk zichtbaar aan de grootte van de stroomsnelheden in het Kimstergat (piek vloedstrooming is groter dan piek ebstrooming).

Boontjes Noord



Kimstergat



Figuur 3-6: Samenhang tussen stroomsnelheid en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Boontjes noord tussen 1 en 16 november (boven) en in het Kimstergat tussen 16 en 30 november (onder). Per figuur zijn links de tijdreeksen van stroomsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) weergegeven en rechts de scatterplot tussen stroomsnelheid en SPM. Snelheden zijn hierbij negatief gedefinieerd in ebrichting. De kleuren tonen het verloop van de tijd, waardoor de samenhang tussen datapunten zichtbaar is.

3.4 Bevindingen

De belangrijkste bevindingen uit met betrekking tot de invloed van getijuitwisseling en stroomsnelheden op de slibdynamiek:

- Uit de resultaten komt een beeld naar voren dat afwijkt van de hypothese (zoals gesteld in Paragraaf 2.2) dat getijvulling van het Kimstergat voornamelijk vanuit het Vlie komt en de getijuitwisseling tussen Boontjes en Kimstergat beperkt is. Op basis van de T0-meetdata zijn namelijk geen kenmerken van een hydrodynamisch wantij in de Boontjes gevonden, aangezien de vloedstroming door de gehele vaargeul Boontjes netto noordwaarts gericht is en de ebstroming vanuit het Kimstergat zich verdeelt over de Boontjes en de Geul langs Pollendam.
- Gemeten sedimentconcentraties in het Kimstergat en de zuidelijke Boontjes waren tijdens vloed aanmerkelijk hoger dan tijdens eb. In combinatie met vloeddominante stroomsnelheden duidt dit op netto landwaarts sedimenttransport (in noordelijke richting).
- 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 het noordelijke deel van de vaargeul kan ontstaan.

Voor de troebelheidsmetingen zijn de belangrijkste bevindingen:

- Het is onduidelijk hoe betrouwbaar de SPM-waardes zijn, mogelijk worden deze overschat door de relatief hoge gehanteerde conversiefactor van 3,54 (mg/L)/NTU. Om die reden worden de sedimentconcentraties en -transporten vooral kwalitatief beschreven (bijv. variaties in ruimte en tijd) in plaats van kwantitatief (bijv. getransporteerde massa). Een verbeterde kalibratie van de troebelheidssensoren bij vervolgmetingen is nodig om een kwantitatieve analyse van de SPM-data te maken.
- Gedurende een getijcyclus piekt de gemeten sedimentconcentratie aan het begin van de vloedfase, net na kentering. In het Kimstergat en bij Boontjes zuid is de sedimentconcentratie tijdens de vloedfase over het algemeen hoger dan tijdens de ebphase, waarbij de concentratie tijdens hoogwaterkentering afneemt. Implicaties hiervan op netto sedimenttransport komen in Hoofdstuk 5 aan bod.
- De samenhang tussen stroomsnelheden en SPM is het sterkst op ondiepe meetlocaties (Kimstergat en Boontjes noord) en tijdens kalme periodes.

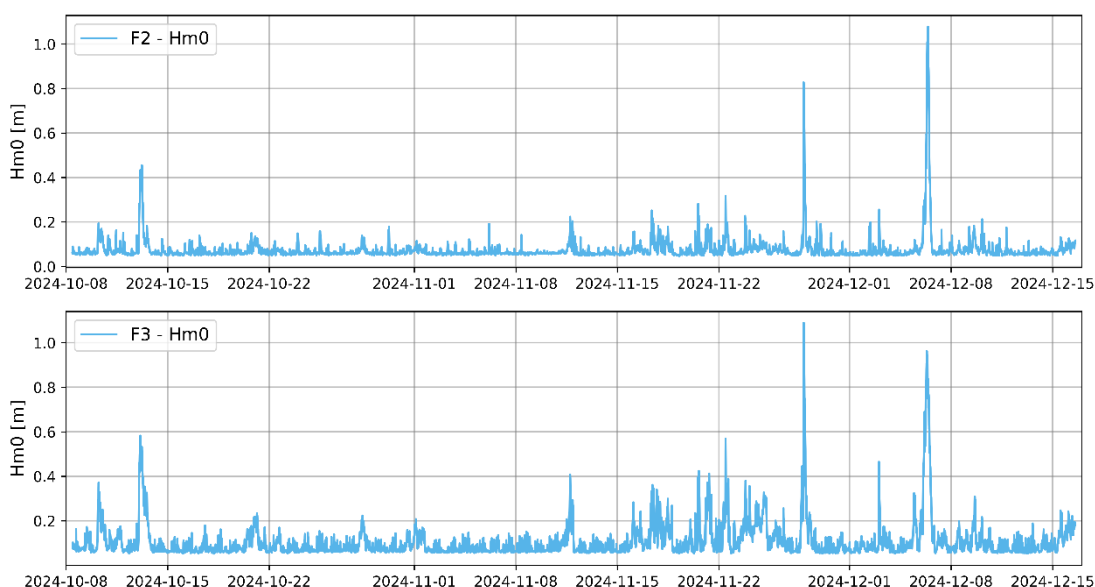
4 Invloed van wind en golven

In dit hoofdstuk wordt eerst kort de analyse van golfcondities uit de ruwe meetdata besproken in Paragraaf 4.1. Vervolgens wordt in Paragraaf 4.2 de samenhang tussen wind en golven bekeken. De strijklengte en lokale waterdiepte zijn belangrijke factoren die de golfhoogte bepalen, waardoor behalve de windsnelheid ook de windrichting van groot belang is. De strijklengte is immers afhankelijk van de windrichting en van de waterstand. Wind beïnvloedt ook de stroming, met name op ondiep water, waardoor het residuele sedimenttransport kan worden beïnvloed. Om die reden wordt de samenhang van wind en golven met SPM en sedimenttransport afzonderlijk bekeken in Paragraaf 4.3. Daarna wordt in Paragraaf 4.4 naar het directe verband tussen golfhoogte en SPM gekeken. Tot slot worden de bevindingen m.b.t. de invloed van wind en golven samengevat in Paragraaf 4.5.

4.1 Analyse golfcondities

Uit het gemeten druksignaal (ADV) is met behulp van lineaire golftheorie een golfsignaal aan het wateroppervlak bepaald. Figuur 4-1 toont tijdreeksen van de significante golfhoogte op meetlocaties Kimstergat (F2) en Boontjes noord (F3). De nauwkeurigheid van het golfsignaal voor lage en korte golven is beperkt, omdat de drukfluctuaties die deze golven introduceren maar beperkt wordt gemeten op de diepte van het frame. Het is om diezelfde reden dat het golfsignaal op de ondiepere meetlocaties F2 en F3 betrouwbaarder is dan het golfsignaal op de andere meetlocaties. Zo zijn de golven met significante golfhoogtes tot 0,4-0,5 m rond 22 november op locatie F3 nauwelijks waar te nemen in het gemeten druksignaal op locatie F4. Daarom wordt alleen de golfdata op de ondiepste meetlocaties Kimstergat (F2) en Boontjes noord (F3) gebruikt in vervolganalyses.

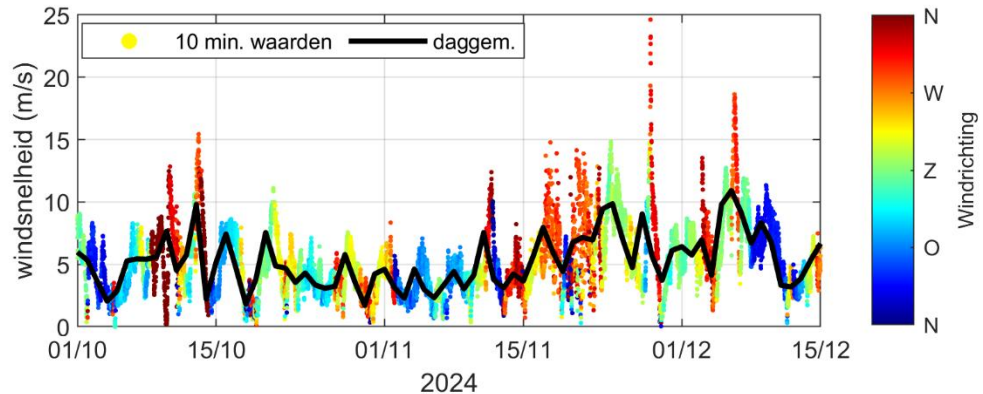
In het golfsignaal in Figuur 4-1 is te zien dat de pieken in significante golfhoogte tijdens de meetcampagne rond de 1,0 m liggen, eind november en begin december. Events met significante golfhoogtes rond 0,4-0,5 m zijn gebruikelijker. In de meetreeks zit echter ook een periode waarin nauwelijks golven werden gemeten, van medio oktober tot medio november, die verklaard kan worden vanuit de windcondities (zie Sectie 4.2).



Figuur 4-1: Tijdreeksen van de significante golfhoogte op meetlocaties Kimstergat (F2, boven) en Boontjes noord (F3, onder), bepaald met lineaire golftheorie uit het gemeten druksignaal bij het frame op de bodem.

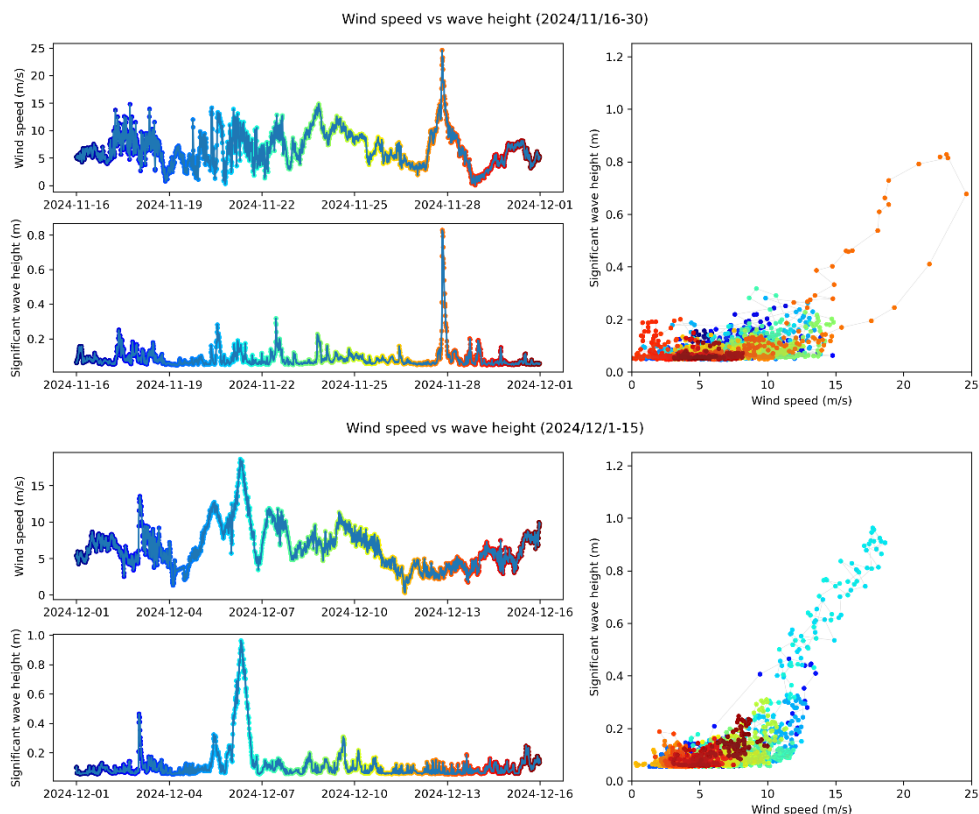
4.2 Samenhang wind met golven

Aangezien de windgegevens afkomstig zijn van meetstation Stavoren, verschilt de gebruikte data niet voor de verschillende meetlocaties. Opvallend aan de winddata (Figuur 4-2) zijn de stormen op 28 november en 6 december, maar ook de kalme periode van 13 oktober tot 10 november, waarin windsnelheden vrijwel onafgebroken onder de 10 m/s (5 Bft en kleiner) bleven. Dat laatste verklaart ook direct de lage gemeten golfhoogtes in die periode, zoals besproken in Sectie 4.1.



Figuur 4-2: Gemeten windsnelheid (y-as) en windrichting (kleuren) bij Stavoren gedurende de T0-meetcampagne. De zwarte lijn toont de daggemiddelde windsnelheid.

Tussen wind en golven wordt een sterke samenhang verwacht, aangezien de golven in de Waddenzee lokaal opgewekte windgolven zijn. In het Kimstergat (F2) en Boontjes noord (F3) is de samenhang tussen wind en golfhoogte duidelijk aanwezig voor windsnelheden boven 12-15 m/s (6-7 Bft), zie Figuur 4-3 (en Figuur D-1 en Figuur D-2 in Bijlage D). Voor lagere windsnelheden is de samenhang onduidelijk. Alleen voor stormachtige windsnelheden (vanaf 8 Bft, ofwel boven 17,2 m/s), zoals voor de stormen op 28 november en 6 december 2024, ontstaan er grotere golven (golfhoogte groter dan 0,5 m), zie Figuur 4-3.



Figuur 4-3: Samenhang tussen windsnelheid en golfhoogte. Bovenste paneel: meetlocatie Kimstergat (F2) tussen 16 november en 1 december. Onderste paneel: meetlocatie Boontjes noord (F3) tussen 1 en 15 december. Per figuur zijn links de tijdreeksen van windsnelheid (linksboven) en golfhoogte (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen windsnelheid en golfhoogte. De kleuren tonen het verloop van de tijd, waardoor de samenhang tussen datapunten zichtbaar is.

4.3 Samenhang wind met SPM en sedimenttransport

Uit een vergelijking van tijdreeksen van windsnelheid en sedimentconcentraties (Figuur 4-4 en Figuur D-3 t/m Figuur D-6) blijkt dat sommige pieken in de sedimentconcentratie duidelijk samenhangen met hoge windsnelheid. Andere periodes met hoge sedimentconcentraties worden niet tot nauwelijks verklaard door de windsnelheid. Met name tijdens de kalme periode van 13 oktober tot 10 november zijn andere factoren bepalend voor het SPM-gehalte. Omgekeerd zijn er ook momenten met hoge windsnelheden die niet of nauwelijks tot hoge sedimentconcentraties leiden, vermoedelijk vanwege de windrichting. Ook bestaan er verschillen tussen de vier meetframes. Bijvoorbeeld voor de stormcondities op 28 november is voor locatie Boontjes noord een duidelijke piek in de sedimentconcentratie waarneembaar (zie oranje kleuren in Figuur 4-4), terwijl dit voor locaties Blauwe Slenk en Kimstergat minder het geval is en voor locatie Boontjes zuid zelfs nauwelijks tot niet. De windrichting tijdens deze storm was noordnoordwest, waardoor het Kimstergat en Boontjes zuid in de luwte lagen van hoge wadplaten (respectievelijk Ballastplaat en plaatgebied Kornwerderzand).

Op ondieper gelegen frames is het effect van wind via golfwerking groter dan op dieper gelegen frames. Dit blijkt ook uit de correlatiecoëfficiënten van windsnelheid en -richting met SPM, waarbij een zwakke correlatie blijkt tussen windsnelheid en SPM op locatie Boontjes noord ($p=+0,20$) en matige correlaties voor locaties Blauwe Slenk en Kimstergat (beide $p=+0,11$), zie Bijlage B.2.2. Op locatie Boontjes zuid lijkt er nauwelijks samenhang te bestaan tussen windsnelheid en SPM ($p=+0,03$).

Voor de windrichting zijn correlatiecoëfficiënten met SPM relatief laag (Tabel B-6) en lijkt er nauwelijks samenhang te bestaan. Windrichting is echter geen parameter waarvan een lineaire verband met SPM te verwachten valt (specifieke richtingen spelen meer of minder een rol, er is geen eenduidige toe- of afname met toenemende 'windrichting'). Om die reden is gekozen voor een ander type analyse met behulp van boxplots voor verschillende windrichtingen.

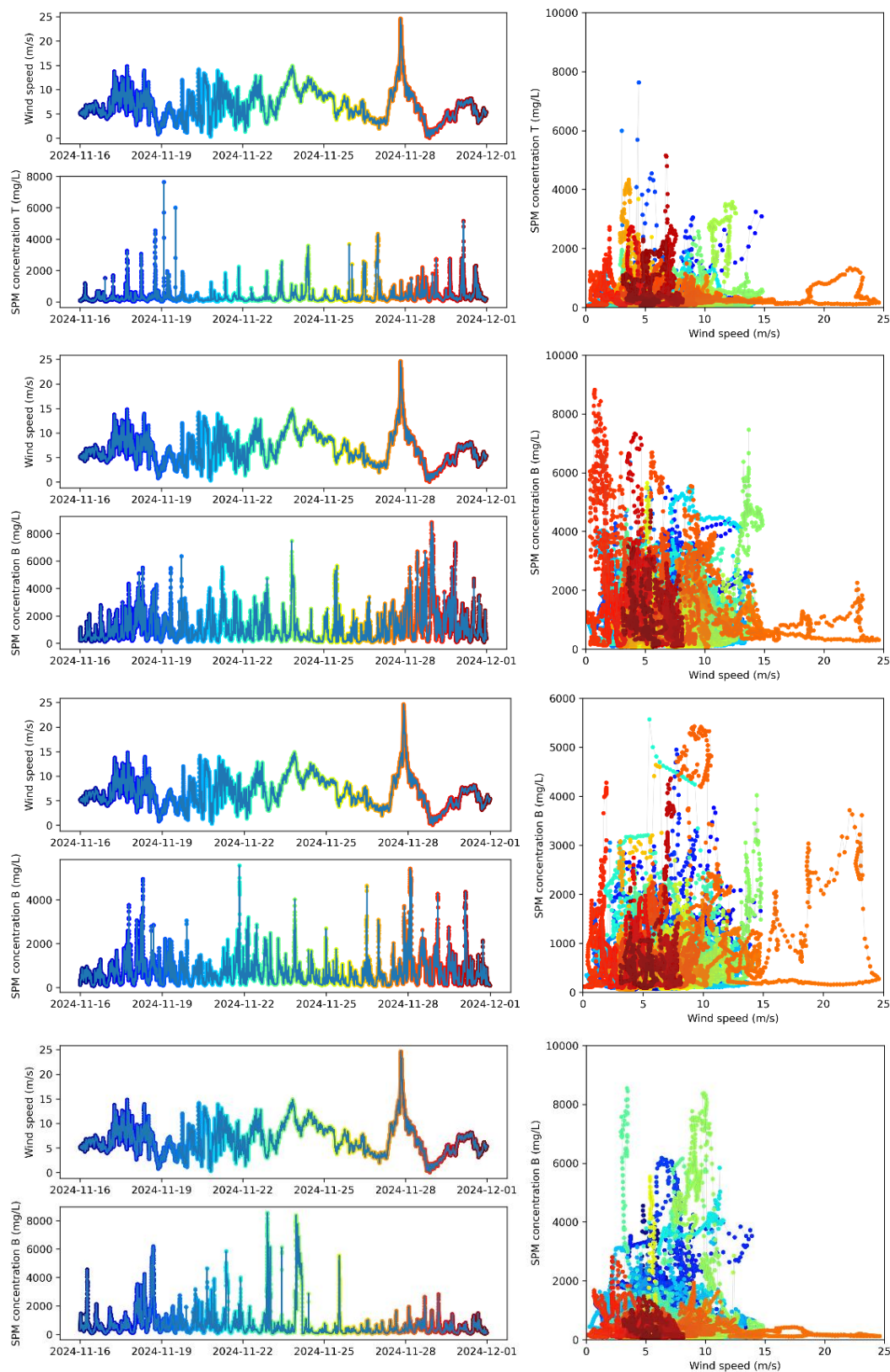
Uit deze boxplots blijkt dat zowel sedimenttransport en -concentraties toenemen voor windrichtingen noord en noordwest op locaties Boontjes noord en Boontjes zuid. De bruto transporten in zowel de eb- als vloedrichting zijn het grootst voor wind uit het noordwesten op locatie Boontjes noord (Figuur 4-5a) en voor wind uit het noorden op locatie Boontjes zuid (Figuur 4-6a). Ditzelfde patroon is zichtbaar voor de sedimentconcentraties (Figuur 4-5b en Figuur 4-6b). Voor oostenwind zijn zowel de sedimenttransporten als de -concentraties op beide locaties aanmerkelijk kleiner (Figuur 4-5 en Figuur 4-6).

Hiervoor bestaan twee mogelijke verklaringen: (1) door luwtewerking vindt minder opwoeling van sediment door golven plaats bij oostenwind (en meer bij wind uit zuidwest, west, noordwest en noord); (2) door windgedreven stroming vindt groter transport plaats tijdens wind uit het noorden en zuiden, terwijl het transport bij oosten- of westenwind kleiner is. Beide verklaringen lijken een rol te spelen.

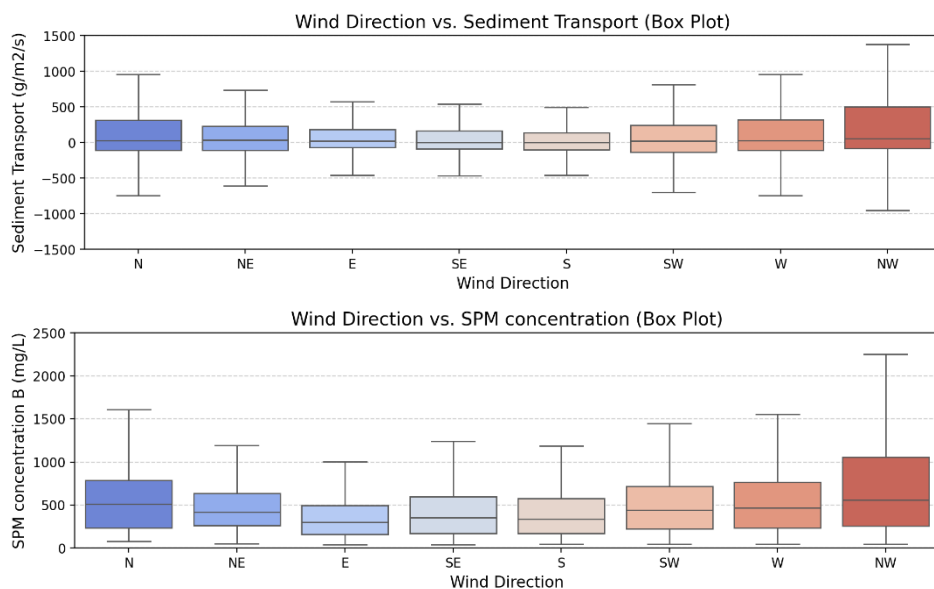
In het Kimstergat lijkt zuidenwind te zorgen voor transport richting de platen, waardoor sedimentconcentraties in de waterkolom afnemen (Figuur 4-7a). Noordenwind heeft het tegengestelde effect, waardoor sedimentconcentraties in de waterkolom toenemen. Dit effect speelt ook door in het sedimenttransport, waardoor deze het grootst is voor noorden- en noordoostenwind, en het kleinst voor zuidenwind (Figuur 4-7b).

Bij het meetframe in de Blauwe Slenk zit een opvallende discrepantie tussen de samenhang sedimenttransport en sedimentconcentratie met windrichting. Beiden zijn relatief hoog voor noordenwind, maar waar sedimenttransporten verder hetzelfde patroon laten zien als op andere meetlocaties (hoog voor noorden- en noordoostenwind; laag voor zuidenwind; Figuur 4-8a), zijn sedimentconcentraties opmerkelijk hoog voor zuidoostenwind en juist laag voor noordoostenwind (Figuur 4-8b). Zuidoost is hier de langsrichting van de geul, waardoor mogelijk sediment vanuit de Geul langs Pollendam richting de Blauwe Slenk getransporteerd wordt.

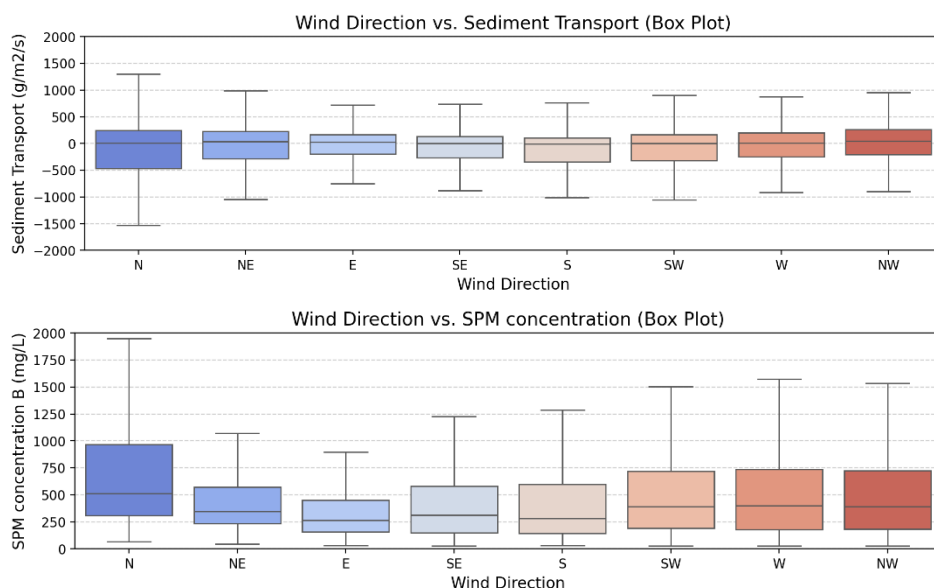
De invloed van windrichting op de residuele transportrichting wordt nader beschouwd in Hoofdstuk 5.



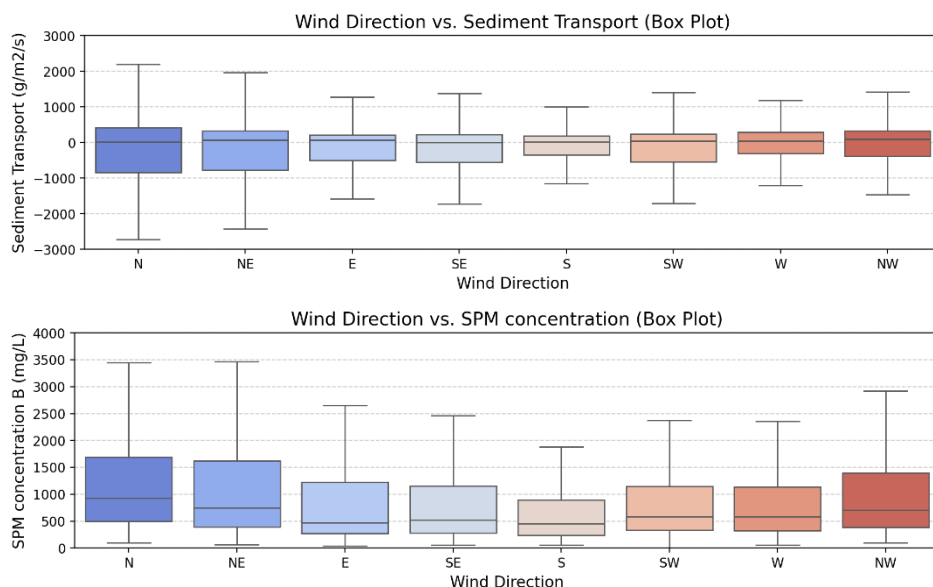
Figuur 4-4: Samenhang tussen windsnelheid en SPM bij de vier meetframes (van boven naar beneden Blauwe Slenk (F1, bovenste OBS), Kimstergat (F2, onderste OBS), Boontjes noord (F3, onderste OBS) en Boontjes zuid (F4, onderste OBS)). Per figuur zijn links de tijdreeksen van windsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor de periode 16 november tot 30 november 2024 weergegeven en rechts de scatter plot tussen windsnelheid en SPM. Kleuren tonen het tijdverloop. De oranje kleuren tonen de stormcondities rond 28 november.



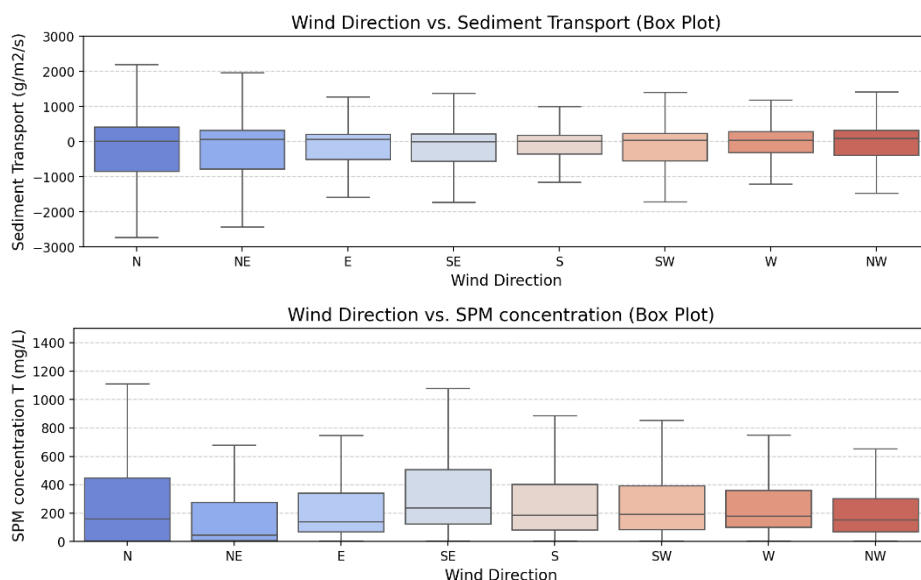
Figuur 4-5: Samenhang tussen windrichting en sedimenttransport (a, boven) en tussen windrichting en SPM nabij de bodem (b, onder) op locatie Boontjes noord. Deze boxplots tonen mediane waarden, de kwartielen en de spreiding van de data per windrichting (de kleur van deze boxplots toont de windrichting).



Figuur 4-6: Samenhang tussen windrichting en sedimenttransport (a, boven) en tussen windrichting en sedimentconcentraties (b, onder) op locatie Boontjes zuid. Deze boxplots tonen mediane waarden, de kwartielen en de spreiding van de data per windrichting (de kleur van deze boxplots toont de windrichting).



Figuur 4-7: Samenhang tussen windrichting en sedimenttransport (a, boven) en tussen windrichting en SPM nabij de bodem (b, onder) op locatie Kimstergat. Deze boxplots tonen mediane waarden, de kwartielen en de spreiding van de data per windrichting (de kleur van deze boxplots toont de windrichting).

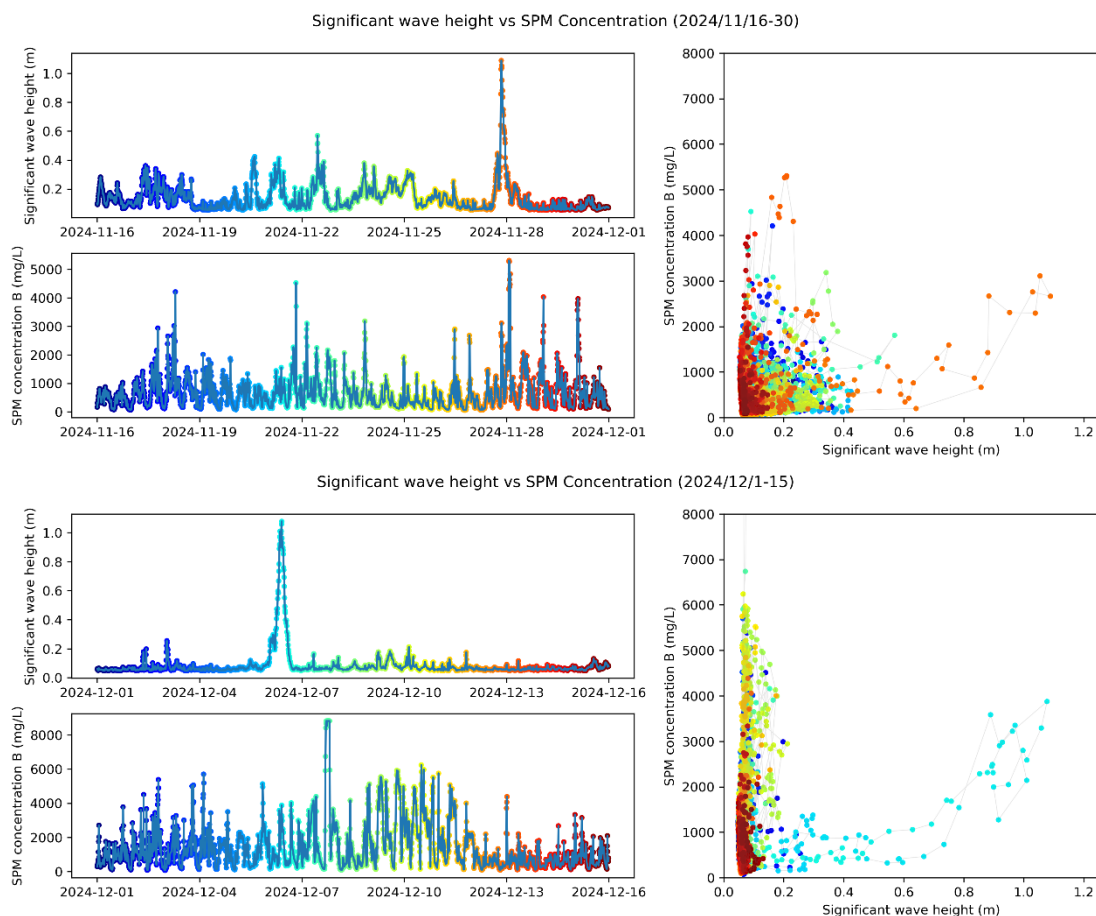


Figuur 4-8: Samenhang tussen windrichting en sedimenttransport (a, boven) en tussen windrichting en sedimentconcentraties (b, onder) op locatie Blauwe Slenk. Deze boxplots tonen mediane waarden, de kwartielen en de spreiding van de data per windrichting (de kleur van deze boxplots toont de windrichting).

4.4 Samenhang golven met SPM

De lokale golfhoogte lijkt met name op locatie Boontjes noord een belangrijke rol te spelen voor de sedimentconcentratie. De lineaire correlatie van de afgeleide golfhoogte met SPM is weliswaar matig ($\rho=+0,17$, zie Tabel B-6), maar lijkt vooral voor grotere golven toch substantieel. Op locatie Kimstergat ($\rho=+0,11$) zorgt de lokale waterdiepte (groter dan bij F3) vermoedelijk voor een te grote uitdemping van het ADV-druksignaal om een betrouwbaar meetsignaal te krijgen voor de golfanalyse (zie toelichting in Paragraaf 4.1). Kleine golven (golfhoogte onder 0,5 m) worden daar nauwelijks gedetecteerd. Op de nog dieper gelegen meetframes in de Blauwe Slenk en bij Boontjes zuid is de golfdata zeker niet betrouwbaar en daarom buiten beschouwing gelaten.

Net als voor de windsnelheid (zie sectie 4.1) lijkt ook voor de golfhoogte de lokale geometrie en morfologie (waterdiepte en oriëntatie t.o.v. dominante windrichting) bepalend. Als voorbeeld worden hier de samenhang tussen golfhoogte en SPM getoond voor locatie Boontjes noord tussen 16 en 30 november en in het Kimstergat tussen 1 en 16 december (Figuur 4-9), zie voor alle periodes Figuur D-7 en Figuur D-8.



Figuur 4-9: Samenhang tussen golfhoogte en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Boontjes noord tussen 16 november tot 30 november (boven) en in het Kimstergat tussen 1 en 16 december (onder). Per figuur zijn links de tijdreeksen van golfhoogte (linksboven) en SPM (linksonder) weergegeven en rechts de scatter plot tussen golfhoogte en SPM. Kleuren tonen het tijdsverloop.

4.5 Bevindingen

Voor de invloed van wind en golven zijn de belangrijkste bevindingen:

- Tijdens de meetcampagne hebben stormachtige condities plaatsgevonden op 28 november en 6 december en een kalme periode van 13 oktober tot 10 november.
- Door de afleiding van het golfsignaal uit de ADV-druksensor kon de golfhoogte niet nauwkeurig worden bepaald op dieper gelegen locaties Boontjes zuid en Blauwe Slenk.
- Wind en golven spelen vooral een grote rol voor sedimentconcentraties bij hogere windsnelheden (vanaf krachtige wind), met name op ondiepe locaties. De lokale waterdiepte en ligging van geulen en platen t.o.v. de windrichting is veelal bepalend voor de invloed op sedimentconcentraties en -transporten.
- Verhoogde troebelheid in de geul kan vervolgens ontstaan door geul-plaatuitwisseling: nadat golfwerking sediment op platen heeft opgewoeld wordt het sediment mogelijk in suspensie naar de geul getransporteerd.

- Bij wind uit het noorden tot noordwesten traden de hoogste sedimentconcentraties in de vaarweg Boontjes op (meetlocaties Boontjes noord en Boontjes zuid). Bij oostenwind ligt de vaargeul in de luwte van de landmassa, waardoor sedimenttransporten en -concentraties aanmerkelijk lager waren. Hierbij moet worden opgemerkt dat er weinig zuidwestenwind voorkwam gedurende de meetcampagne.
- In het Kimstergat lijkt door de oriëntatie en ligging vooral het verschil tussen noordenwind (hoge SPM) en zuidenwind (lage SPM) een rol te spelen, mogelijk via windgedreven stroming en/of geul-plaatuitwisseling. Mogelijk vindt bij noordenwind transport van plaat naar geul plaats, waardoor SPM toeneemt, terwijl bij zuidenwind transport van geul naar plaat gaat en SPM afneemt.

5 Residuele stroming en sedimenttransport

In dit hoofdstuk worden eerst richting en omvang van de residuele stroming en netto sedimenttransporten beschreven op basis van de data van de meetframes en varende metingen. Vervolgens wordt dieper ingegaan op de invloed van windrichting en -snelheid op de richting van de residuele stroming en transporten.

5.1 Residuele stroming en sedimenttransporten

5.1.1 Meetframes

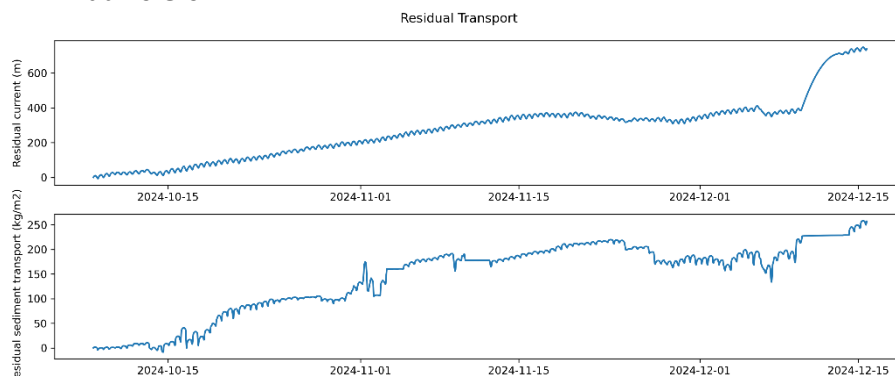
Voor de data van de meetframes is de residuele stroming bepaald door alle bruto getijvolumes te sommeren tot een netto (residueel) getijdebiet. De residuele stroming is in de vloedrichting voor de locaties Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2) en Boontjes Zuid (F4), zie Figuur 5-1. Alleen voor Boontjes noord (F3) is het residuele debiet in de ebrichting, met de kanttekening dat de dominante ebrichting hier richting het Molengat is en dus niet in de langsrichting van de geul. Dit komt overeen met de analyse van (piek) stroomsnelheden uit Hoofdstuk 3, waarbij op locaties F1, F2 en F4 vloeddominante stroming werd gevonden.

De residuele sedimenttransporten zijn bepaald door alle bruto sedimenttransporten (stroomsnelheid in langsrichting van de geul vermenigvuldigd met sedimentconcentratie ter hoogte van onderste OBS-sensor) 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 nabij de bodem, is de verwachting dat dit een goede benadering geeft van de residuele transporten over de gehele verticaal. Gemiddeld over de gehele meetperiode bekeken komen de richtingen van de residuele sedimenttransporten overeen met de residuele stromingen² (in de vloedrichting voor de locaties Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2) en Boontjes Zuid (F4); in de ebrichting voor locatie Boontjes noord (F3)). In de residuele sedimenttransporten in de Blauwe Slenk zit wel meer variatie over de tijd (d.w.z. periodes waarbinnen het sedimenttransport netto omgekeerd is).

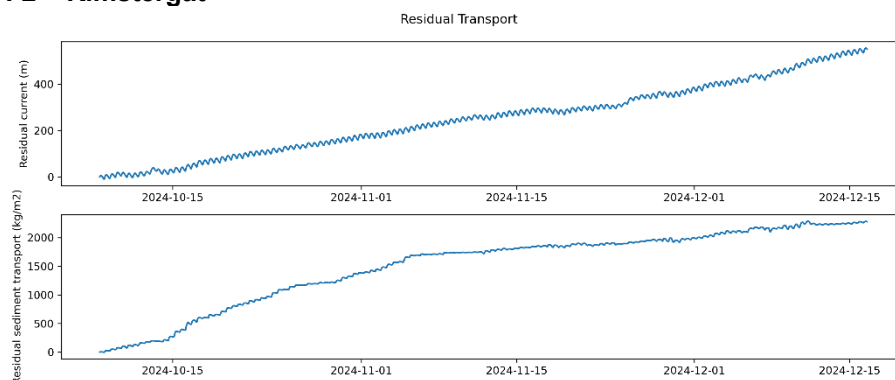
Deze ruimtelijke patronen worden geïllustreerd in Figuur 5-2, waarin SPM-waardes getoond ten opzichte van de gemeten snelheidsvectoren bij de meetframes voor de gehele meetperiode. Zie voor detailplots per locatie Bijlage C.2. Hierbij valt op dat het Kimstergat qua stroomsnelheden vloeddominant zijn, maar dat SPM-waardes hier tijdens ebstroming hoger lijken. Verder valt op dat in de zuidelijke Boontjes zowel de stroming als het sedimenttransport vloeddominant is (d.w.z. hogere SPM-waardes bij vloedstroming). Bij Boontjes noord zijn SPM-pieken tijdens de ebfase wat hoger. In de Blauwe Slenk lijkt SPM gelijkverdeelde over de getijfasen.

² In theorie zou de richting kunnen verschillen van de residuele stromingsrichting indien de fasering van hoge sedimentconcentraties niet gelijk verdeeld zijn over de getijfasen (d.w.z. als bijvoorbeeld SPM hoog is tijdens eb, maar laag tijdens vloed, dan kan het getijvolume tijdens vloed groter zijn, maar slibtransport tijdens eb groter zijn).

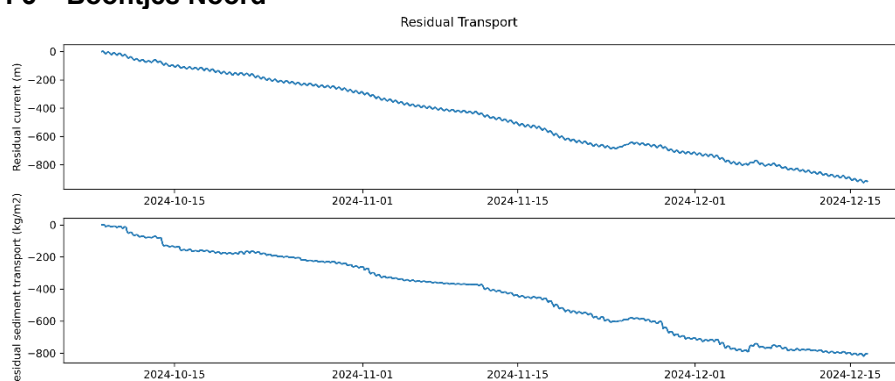
F1 - Blauwe Slenk



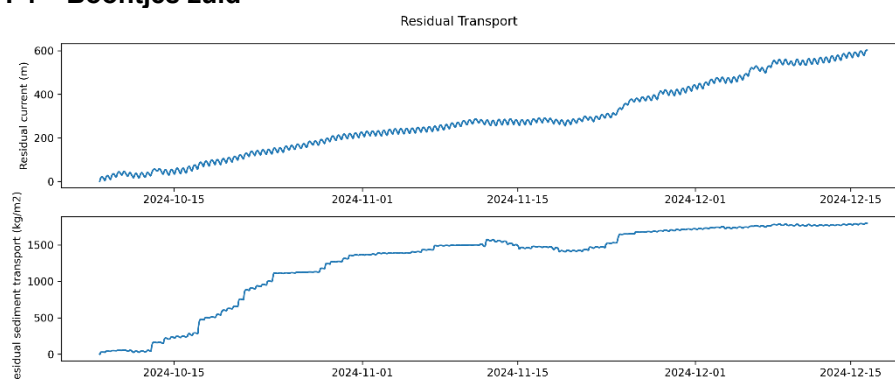
F2 – Kimstergat



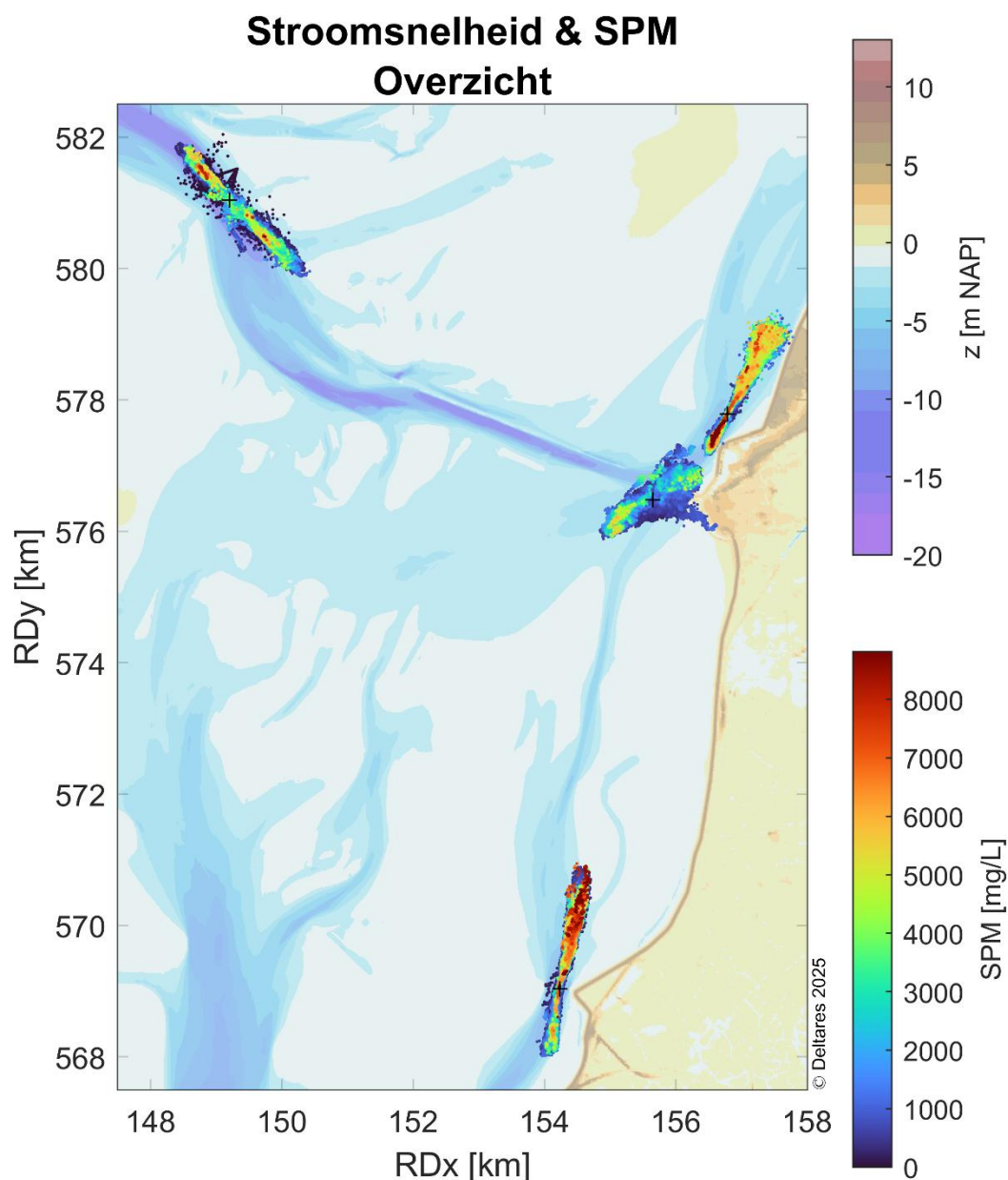
F3 – Boontjes Noord



F4 – Boontjes zuid



Figuur 5-1: Residuele transporten bij de vier meetframes (van boven naar beneden Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2), Boontjes noord (F3) en Boontjes zuid (F4)). Per locatie is het bovenste paneel steeds het residuele debiet (water), het onderste paneel het residuele sedimenttransport, waarbij de vloedrichting is gedefinieerd als positieve waarde.



Figuur 5-2: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op de vier meetlocaties tijdens de gehele meetperiode. De meetlocaties zijn weergegeven met een +. Schaal stroomsnelheden: 1 m/s : 1 km op de achtergrondkaart. De kleur toont de gemeten SPM-waardes, waarbij de hoogste waardes (rode kleuren) bovenop zijn geplot. Zie voor detailplots per locatie Bijlage C.2.

5.1.2 Varende metingen

Voor de varende metingen zijn de getijvolumes en bruto sedimenttransporten door de nabewerking van Rijkswaterstaat bepaald per getijfase voor de 13-uur durende meetperiodes (zie waardes Tabel 5-1 met dikgedrukt de netto richting):

- Voor de meetraai in het Kimstergat wisselt de netto stroomrichting tussen de twee meetmomenten (in de vloedrichting op 17 oktober, maar in de ebrichting op 24 oktober). Het sedimenttransport is op beide dagen netto in de vloedrichting, al verschilt de netto flux enorm (6,2 miljoen kg op 17 oktober en 0,1 miljoen kg op 24 oktober).
- Voor de meetraai Pollendam – Boontjes noord is de residuele stroming op beide dagen in ebrichting, terwijl de richting van het netto sedimenttransport wisselt tussen de twee meetmomenten (op 17 oktober netto in vloedrichting en op 24 oktober netto in ebrichting).
- Voor de meetraaien Boontjes midden en Boontjes zuid zijn zowel de stroming als het sedimenttransport netto in de vloedrichting op 17 oktober, maar in de ebrichting op 24 oktober.

Hieruit blijkt dat de richting van residuele stroming en netto sedimenttransport tussen twee meetmomenten kan verschillen. Dat suggereert dat zowel de omvang als de richting van netto transport zeer gevoelig is voor fluctuaties in bruto transport. Verklaringen hiervoor kunnen te maken hebben met verschillen in springtij (17 oktober) en doodtijcondities (24 oktober), windsnelheid en -richting (zie Paragraaf 5.2) en het spuidebiet bij Kornwerderzand (groter op 17-18 oktober, dan op 24-25 oktober).

Tabel 5-1: Getijvolumes en sedimenttransporten per getijfase op de verschillende meetraaien van de varende metingen (afkomstig uit nabewerking door Rijkswaterstaat-CIV). De grootste waardes tijdens de 13-uurs meting zijn dikgedrukt, wat de netto richting aangeeft.

Meetraai	Datum	Windrichting	Getijvolume vloed (10 ⁶ m ³)	Getijvolume eb (10 ⁶ m ³)	Sedimentflux vloed (10 ⁶ kg)	Sedimentflux eb (10 ⁶ kg)
Kimstergat	17 okt	ZW-ZO	42,0	30,0	11,0	4,8
	24 okt	WZW-ZO	26,0	38,0	4,5	4,4
Pollendam – Boontjes noord	17 okt	ZW-ZO	26,0	33,0	11,0	5,6
	24 okt	WZW-ZO	15,0	43,0	3,8	4,7
Boontjes midden	18 okt	NW-NO	9,4	9,0	1,8	1,0
	25 okt	ZO	7,3	14,0	1,0	1,3
Boontjes zuid	18 okt	NW-NO	43,0	42,0	6,9	3,9
	25 okt	ZO	31,0	46,0	2,9	3,2

Residuele stroming en sedimenttransporten zijn dus op de meeste meetpunten en 24-uursmetingen in de vloedrichting, behalve in de noordelijke Boontjes. Binnen de vaargeul Boontjes kan gesuspendeerd sediment ophopen door (netto) noordwaarts sedimenttransport vanuit het zuiden en (netto) zuidwaarts vanuit het noorden. Lokaal kan dit leiden tot sedimentatie in de vaargeul, al kan het sediment ook gedeeltelijk naar het Molenrak transporteren.

5.2 Invloed van wind op netto sedimenttransport

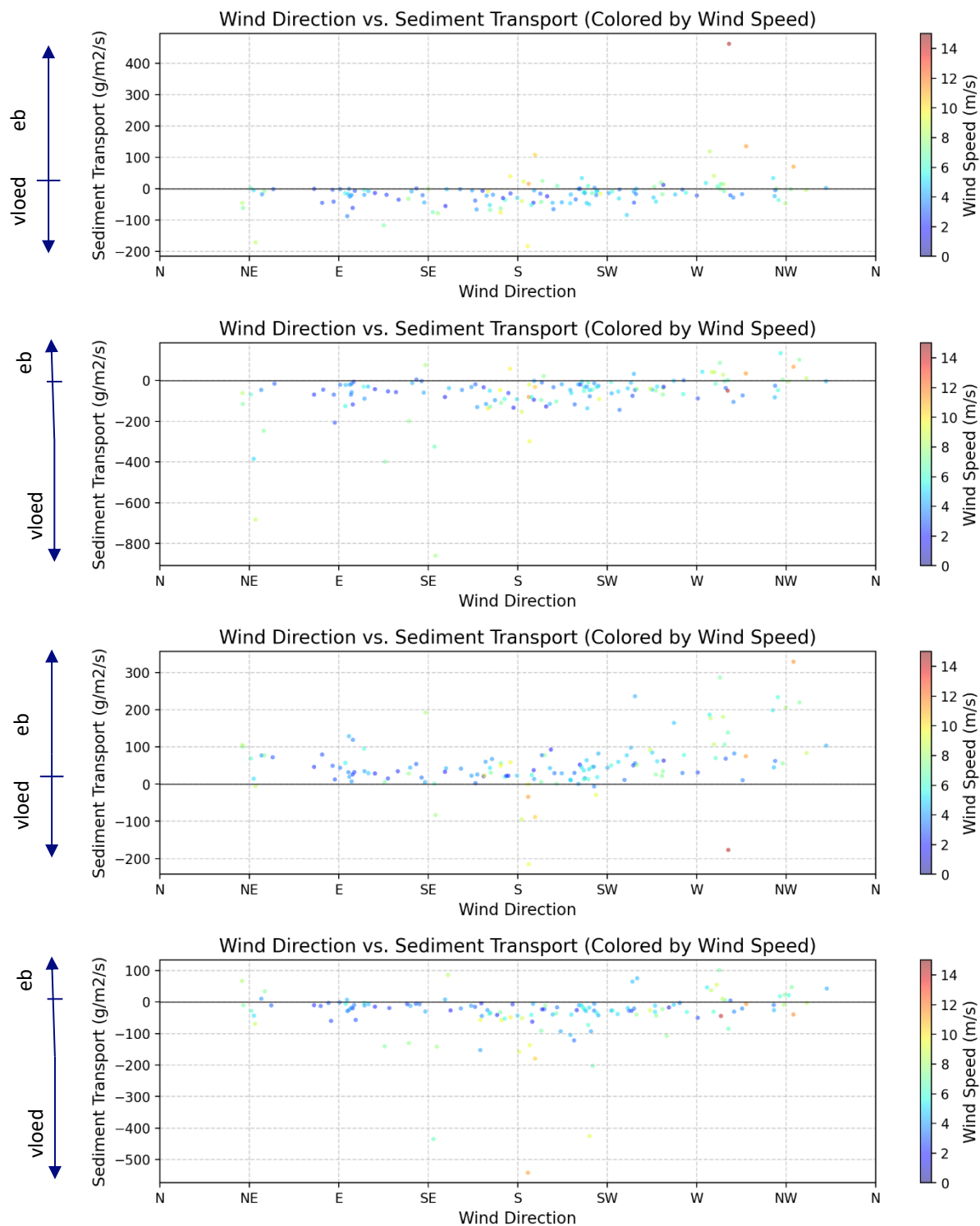
De samenhang tussen wind, golven en SPM is reeds besproken in Hoofdstuk 4. In deze sectie gaan we verder in op de samenhang van wind en golven met netto sedimenttransport door getijgemiddelde sedimenttransporten te analyseren.

In Figuur 5-3 is bij de verschillende stations zichtbaar hoe de windcondities netto sedimenttransporten beïnvloeden:

- in de Blauwe Slenk (Figuur 5-3a) is het netto sedimenttransport meestal in de vloedrichting. Tijdens extreme windsnelheden uit het westen en noordwesten vindt netto sedimenttransport in ebrichting (sedimentexport) plaats. Mogelijk komt dit door hogere concentraties tijdens eb, waarbij materiaal dat verderop in het bekken wordt opgewoeld via de Blauwe Slenk zeewaarts wordt getransporteerd.
- in het Kimstergat (Figuur 5-3b) is de windsnelheid veel minder bepalend voor netto transporten en draait het vooral om de windrichting; voor westen tot noordwestenwind is het netto sedimenttransport in ebrichting en voor alle andere richtingen (met name noordoosten tot zuidoosten) in vloedrichting.
- Ook in de vaargeul Boontjes zijn windsnelheid en -richting van belang voor het netto transport. Bij milde windcondities is het netto sedimenttransport op locatie Boontjes noord overwegend in de ebrichting (merk op dat 'de ebrichting' hier richting Molengat is, dus niet in langsrichting van de vaargeul Boontjes) en bij Boontjes zuid juist meestal in de vloedrichting, zoals besproken in voorgaande sectie (§5.1). Bij noordwesten- tot noordoostenwind verschuift dit voor beide locaties meer naar de ebrichting, terwijl dit voor zuidoosten tot zuidwestenwind juist meer verschuift naar de vloedrichting.

Deze invloed van de windrichting op de richting van het netto sedimenttransport in de vaargeul Boontjes is ook terug te zien in de resultaten van de varende metingen (Tabel 5-1), waarbij zowel residuele stroming als netto sedimenttransport in vloedrichting is op 18 okt (windrichting NW-NO) en in ebrichting op 25 oktober (windrichting ZO).

De windrichting blijkt dus een belangrijke rol te spelen voor de richting van het netto sedimenttransport in de vaargeul 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. Noordenwind zorgen voor sedimenttransport vanuit het Kimstergat richting de vaargeul Boontjes.



Figuur 5-3: Samenhang tussen windrichting en getijgemiddelde sedimenttransport bij de vier meetframes (van boven naar beneden Blauwe Slenk (F1), Kimstergat (F2), Boontjes noord (F3) en Boontjes zuid (F4)). De kleur van de punten geeft de windsnelheid aan. Positieve transporten zijn hier gedefinieerd in de ebrichting.

5.3 Bevindingen

De belangrijkste bevindingen met betrekking tot residuele stroming en (netto) sedimenttransport zijn:

- De residuele stroming is in de vloedrichting voor de locaties Blauwe Slenk, Kimstergat en Boontjes Zuid. Alleen voor Boontjes noord is het residuele debiet in de ebrichting, met de kanttekening dat de dominante ebrichting hier richting het Molengat is en dus niet in de langsrichting van de geul.
- SPM-waardes lijken in het Kimstergat en bij Boontjes noord tijdens de eb fase licht hoger dan tijdens vloed. Bij Boontjes zuid zijn zowel stroming als sedimenttransport vloed dominant. Bij Blauwe Slenk lijkt SPM gelijk verdeeld over de getijfasen.
- Uit de data van de meetframes zijn sedimenttransporten bepaald uit de stroomsnelheden en sedimentconcentraties ter hoogte van het meetframe (onder in de waterkolom). De richtingen van de netto sedimenttransporten komen overeen met de residuele stromingen (in de vloedrichting voor de locaties Blauwe Slenk, Kimstergat en Boontjes Zuid; in de ebrichting voor locatie Boontjes noord)
- Uit de varende metingen blijkt dat de richting van residuele stroming en netto sedimenttransport tussen twee 13-uursmetingen kan verschillen. Zowel de omvang als de richting van netto transport is dus zeer gevoelig voor fluctuaties in bruto transport.
- De windrichting blijkt een belangrijke rol te spelen voor de richting van de residuele transporten in de vaarweg Boontjes en in het Kimstergat. Wind uit zuidelijke richtingen versterkt vloedtransport op beide locaties, terwijl wind uit noordelijke richtingen het netto transport afzwakt of zelfs tijdelijk naar de ebrichting kan doen kantelen.

6 Stratificatie en gravitatiecirculatie

In dit hoofdstuk worden eerst verticale profielen van zout en temperatuur beschreven om een beeld te krijgen van stratificatie (gelaagdheid) op verschillende meetlocaties. Vervolgens wordt de mate van stratificatie en menging verklaard door de samenhang met het zoutgehalte en het spuidebiet bij Kornwerderzand te beschrijven.

6.1 Verticale profielen zoutgehalte en SPM

Uit de CTD-metingen die tijdens de varende metingen zijn uitgevoerd volgen verticale profielen van het zoutgehalte, de watertemperatuur en de dichtheid. In de watertemperatuur is over het algemeen nauwelijks variatie over de diepte zichtbaar, deze wordt daarom niet getoond in dit rapport. De omzetting van geleidbaarheid, via chloridegehalte naar zoutgehalte is beschreven in paragraaf 2.1. Daarnaast zijn ook verticale profielen van sedimentconcentratie bepaald door een OBS-sensor te laten zakken tijdens deze CTD-metingen.

De mate van gelaagdheid door verschillen in zoutgehalte (zoutstratificatie) varieert over de getijcyclus, doordat inkomende vloedstroming over het algemeen relatief zout zeewater aanvoert en tijdens eb relatief zoet water terugstroomt. Daarnaast wordt door de zoetwaterspui bij Kornwerderzand onder vrij verval (dus bij laagwater) gespuid, waardoor het zoutgehalte tijdens de laagwaterkentering lager is dan tijdens hoogwaterkentering. Tegelijkertijd zorgen hoge stroomsnelheden tijdens eb en vloed voor menging en kan een horizontale zoutgradiënt door gravitatiecirculatie leiden tot een verticale zoutgradiënt, waardoor zoutstratificatie ontstaat, vooral bovenin de waterkolom.

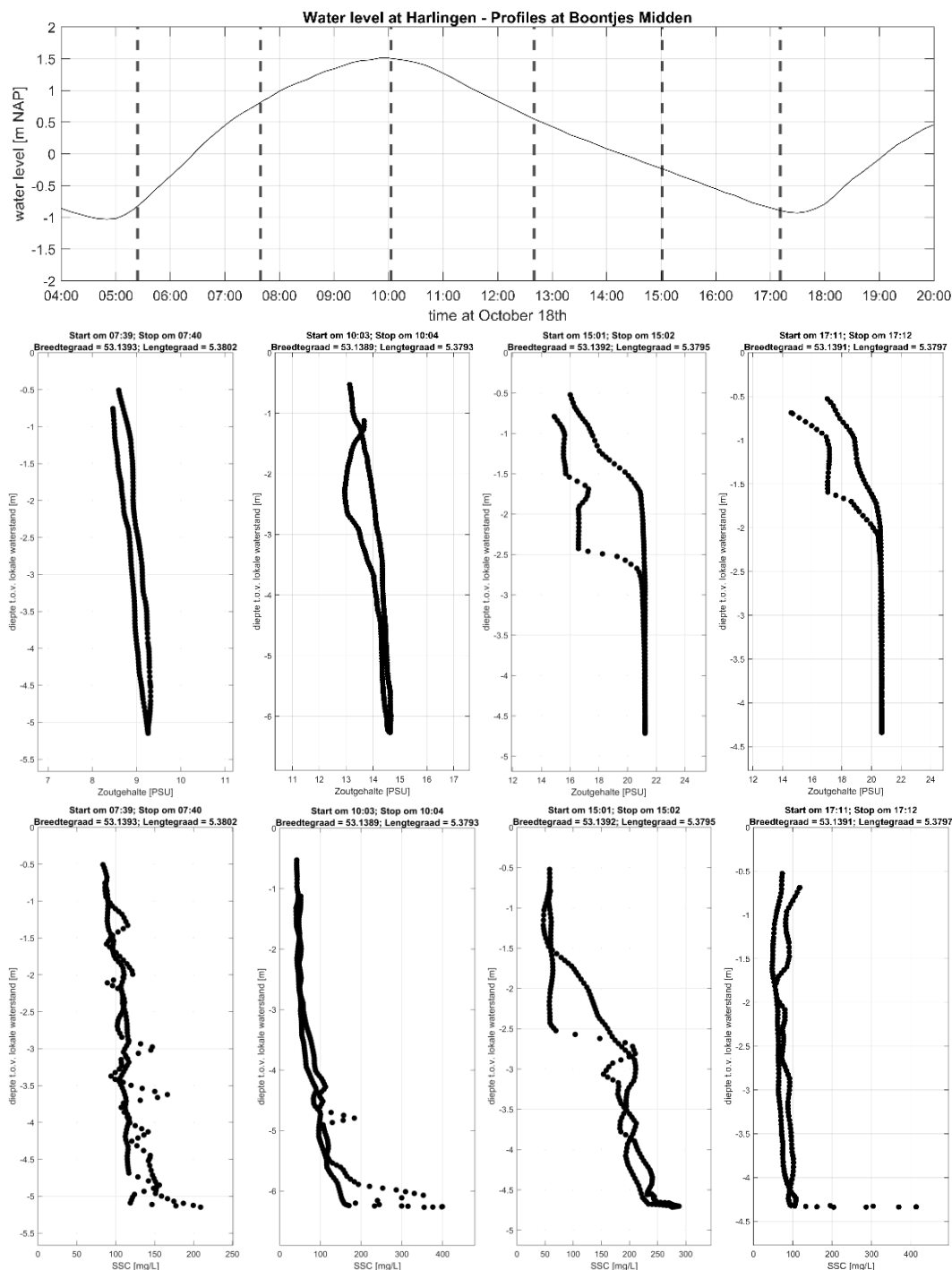
Voor sedimentstratificatie werkt dit voor suspensief transport vergelijkbaar, maar vinden ook uitzakking plaats door de valsnelheid van het sediment en uitwisseling met de bodem door depositie en resuspensie. Tijdens kentering zorgen deze processen voor afname van de sedimentconcentratie in de waterkolom. Tijdens piekstroming kan resuspensie plaatsvinden, waardoor sedimentconcentraties in de waterkolom toenemen. Sedimentstratificatie vindt daardoor vooral onderin de waterkolom plaats.

Zowel de mate van stratificatie, als de fasering met het getij variëren ruimtelijk doordat de verschillende meetlocaties meer of minder onder invloed staan van processen die stratificatie veroorzaken. In de profielen gemeten in de vaarweg Boontjes en de Geul langs Pollendam is zoutstratificatie bovenin de waterkolom en sedimentstratificatie onderin de waterkolom zichtbaar. In het Kimstergat is vooral sedimentstratificatie zichtbaar, terwijl de zoutprofielen voornamelijk gemengd zijn over de verticaal.

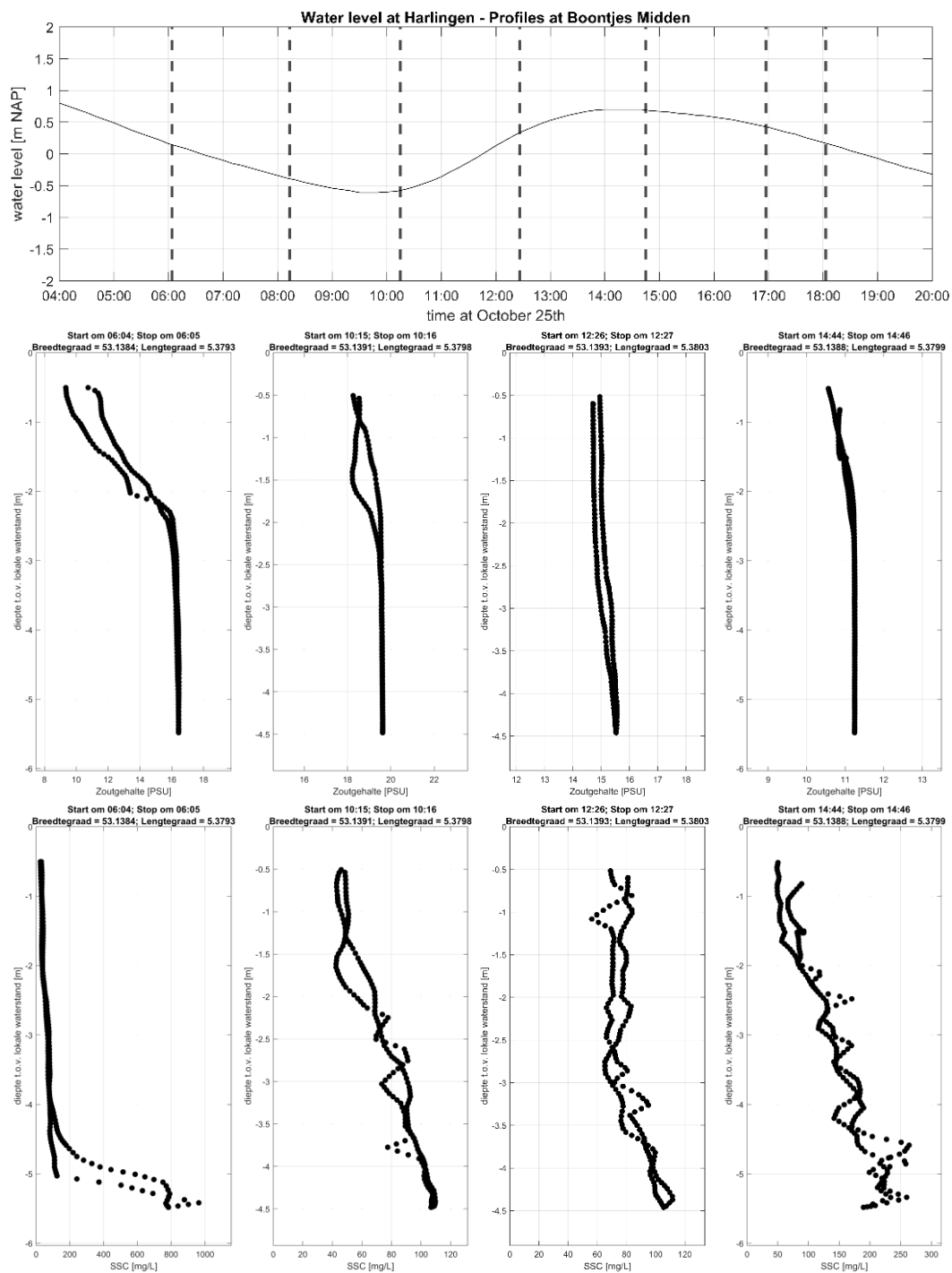
Een korte beschrijving per locatie:

- Midden in de vaarweg Boontjes is het zoutgehalte aan het wateroppervlak gedurende het hele getij lager dan bij de bodem (Figuur 6-1 en Figuur 6-2). Tijdens eb is het zoutgehalte maximaal en tijdens vloed minimaal. Rond hoogwater is de stratificatie klein. Opvallend zijn de lage zoutgehaltes tijdens vloed op 18 oktober en tijdens hoogwater op 25 oktober. Tijdens de eb- en vloedstroming neemt de sedimentconcentratie met name onder in de waterkolom toe en tijdens kentering zakt het sediment uit naar de bodem.

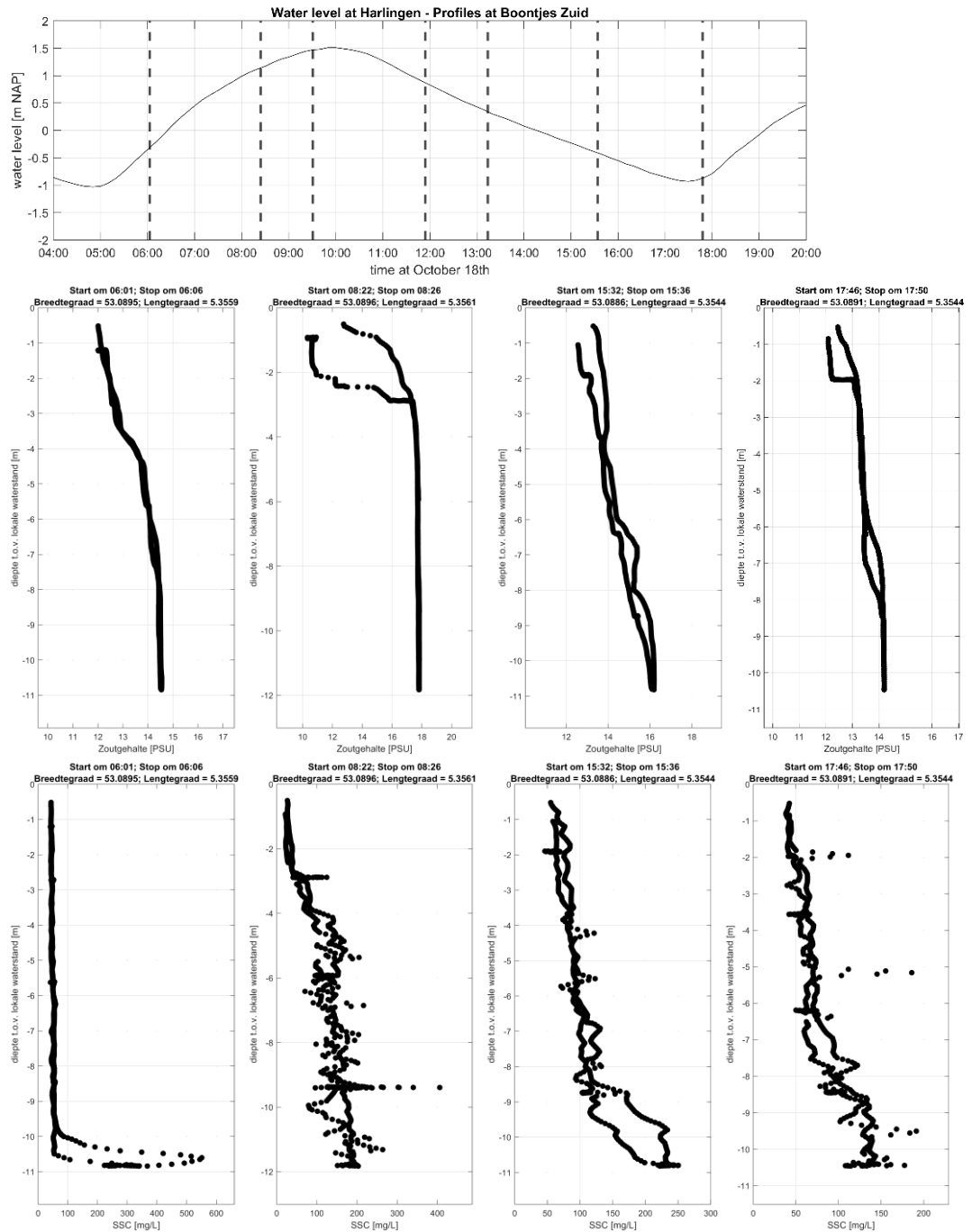
- Ook in de zuidelijke Boontjes zijn over het hele getij lagere zoutgehaltes aan het wateroppervlak zichtbaar (Figuur 6-3 en Figuur 6-4). Hier is het zoutgehalte over de gehele verticaal echter het laagst rond laagwater. Vooral tijdens vloed is er relatief zoet water aan het oppervlak. Op 25 oktober is opvallend dat bij hoogwater geen effect meer te zien is van het relatief zoete oppervlaktewater tijdens vloed. Mogelijk is er sprake van een zoetwaterbel die bij hoogwater naar Boontjes Midden is verplaatst. Ook hier neemt de sedimentconcentratie toe tijdens de eb- en vloedstroming en zakt het sediment uit naar de bodem tijdens kentering, waardoor sedimentconcentraties afnemen en een uniform profiel over de verticaal ontstaat (behalve de onderste laag van de waterkolom nabij de bodem).
- In de Geul langs Pollendam worden sterk gestratificeerde zoutprofielen aangetroffen rond hoogwater en tijdens eb (Figuur E-1 en Figuur E-2 in Bijlage E). Vooral op 17 oktober is goed te zien hoe het zoutgehalte bij het wateroppervlak toeneemt tijdens eb, terwijl het zoutgehalte bij de bodem afneemt. Rond laagwater en aan het begin van de vloedperiode is er nauwelijks of geen sprake van zoutstratificatie. Tijdens kentering (vooral goed zichtbaar tijdens laagwater op 17 oktober) treden de hoogste sedimentconcentraties op nabij de bodem.
- In het Kimstergat is er alleen wat zoutstratificatie rond hoogwater met lager zoutgehalte aan het wateroppervlak op 17 oktober (Figuur E-3). Bij het begin van de ebfase (4^e meting) is die stratificatie maximaal. Richting het einde van de ebfase (5^e meting) is het verticale profiel weer bijna uniform over de diepte. Tijdens de vloedfase treden hier de hoogste sedimentconcentraties op nabij de bodem. Op 24 oktober zit er nauwelijks stratificatie in het zoutprofiel, maar wel in het sedimentprofiel bij hoogwater (Figuur E-4).



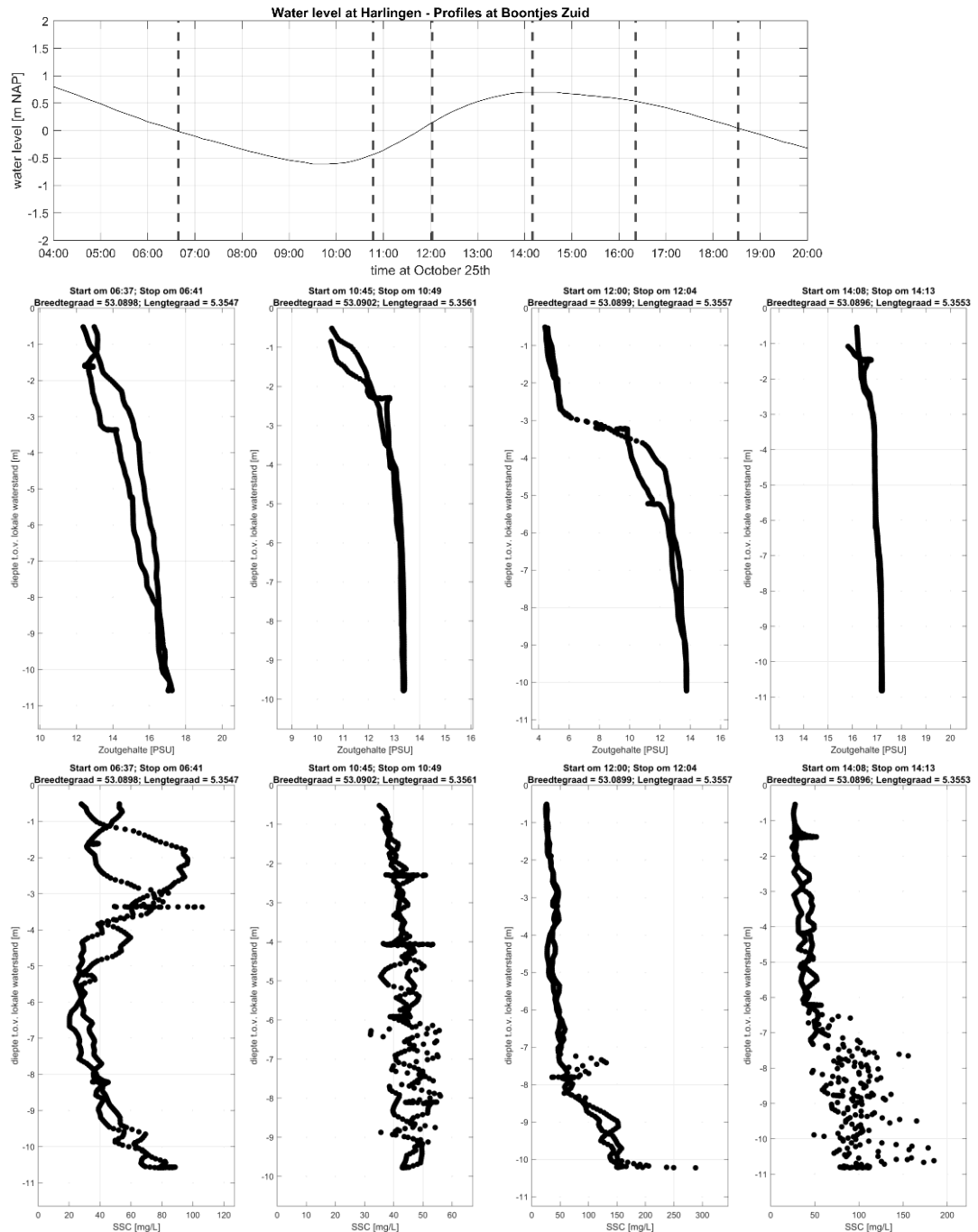
Figuur 6-1: Bovenste paneel: tijdreeks waterstand Harlingen met tijdstippen profielen (stippellijnen). Daaronder zoutprofielen (middelste panelen) en sedimentconcentratie (onderste panelen) over de waterdiepte bij Boontjes midden op 18 okt. om (v.l.n.r.) 7:39, 10:03, 15:02 en 17:11 uur.



Figuur 6-2: Bovenste paneel: tijdreeks waterstand Harlingen met tijdstippen profielen (stippellijnen). Daaronder zoutprofielen (middelste panelen) en sedimentconcentratie (onderste panelen) over de waterdiepte bij Boontjes midden op 25 okt. om (v.l.n.r.) 6:05, 10:15, 12:26 en 14:45 uur.

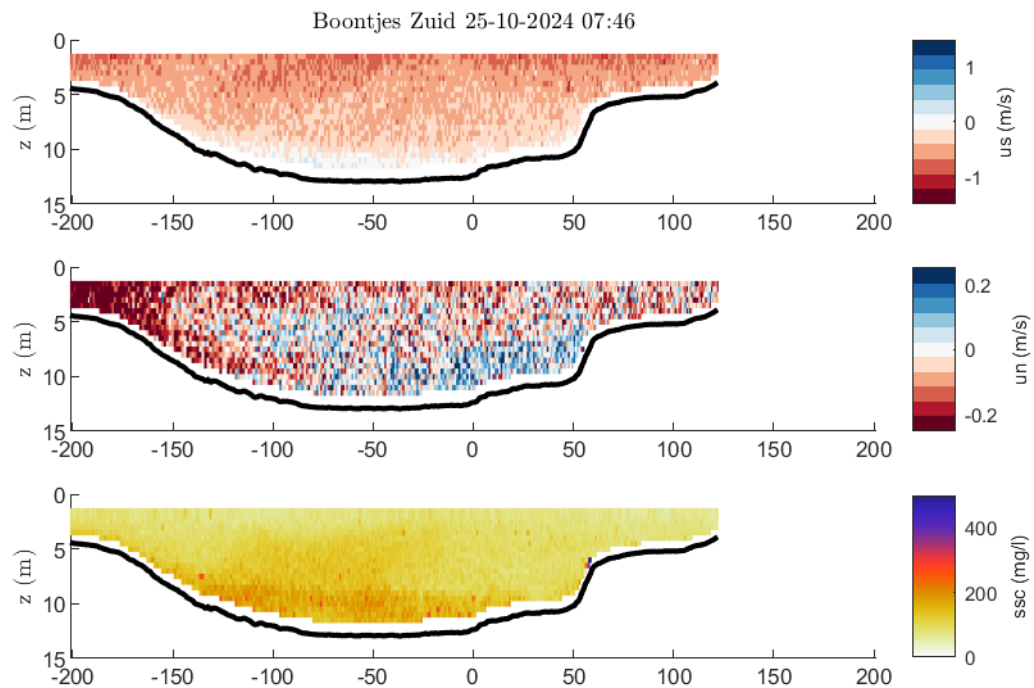


Figuur 6-3: Bovenste paneel: tijdreeks waterstand bij Harlingen met tijdstippen profielen (stippellijnen). Daaronder zoutprofielen (middelste panelen) en sedimentconcentratie (onderste panelen) over de waterdiepte bij Boontjes zuid op 18 okt. om (v.l.n.r.) 6:01, 8:22, 15:32 en 17:46 uur. Merk op dat de assimieten per figuur verschillen.

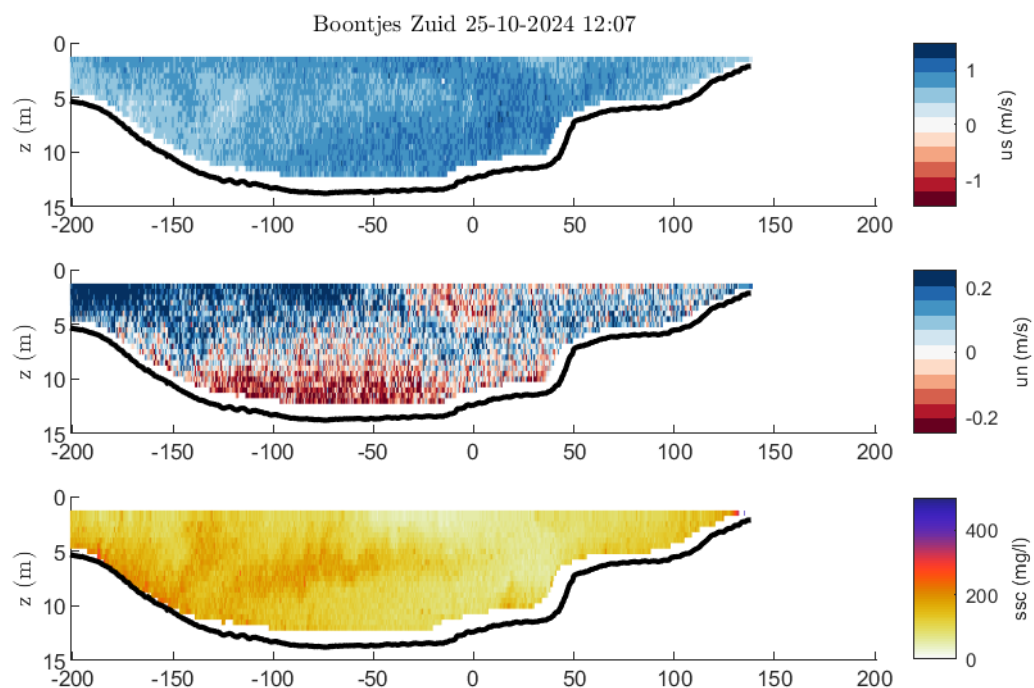


Figuur 6-4: Bovenste paneel: tijdreeks waterstand bij Harlingen met tijdstippen profielen (stippellijnen). Daaronder zoutprofielen (middelste panelen) en sedimentconcentratie (onderste panelen) over de waterdiepte bij Boontjes zuid op 25 okt. om (v.l.n.r.) 6:37, 10:45, 12:00 en 14:08 uur.

Uit de varende metingen (zie figuren in Bijlage F) zijn beperkt patronen naar voren gekomen die duiden op gravitatiecirculatie (d.w.z. circulatiepatronen in de langsrichting van de geul). In Figuur 6-5 is een snelheid aan de bodem te zien die (net) tegengesteld is aan de snelheid aan de oppervlakte en een sterke SPM-gradiënt nabij de bodem. Echter, tijdens het moment van maximale zoutstratificatie (12:00 uur volgens Figuur 6-4) is dit effect niet zichtbaar in de varende metingen (Figuur 6-6). Dit is tijdens piek vloedstroming, dus daardoor is de stroomsnelheid over de gehele waterkolom wel noordwaarts gericht. De getijstrooming (primaire stroming) is dus sterker dan dit secundaire effect van de stratificatie. Verder blijkt uit beide figuren dat de maximale SPM over de verticaal op de hoogte zit waar de stroomsnelheid het laagst is.



Figuur 6-5: Resultaten van varende metingen bij Boontjes zuid tijdens piek ebstroming op 25 oktober 2024. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.



Figuur 6-6: Resultaten van varende metingen bij Boontjes zuid tijdens piek vloedstroming op 25 oktober 2024 om 12:00 uur, het moment van maximale (zout)stratificatie volgens Figuur 6-4. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in resp. de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.

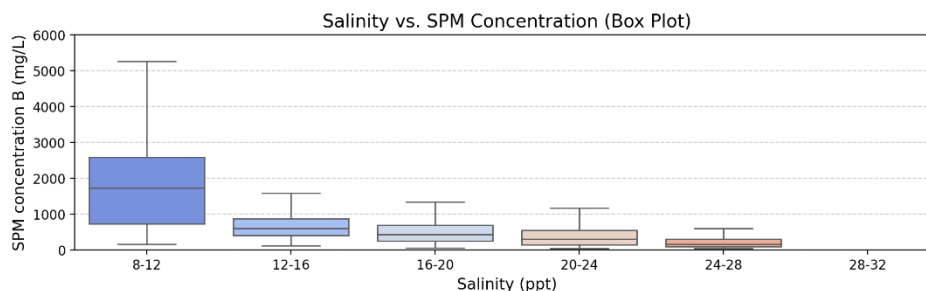
6.2 Sturende processen

Het belangrijkste sturende proces voor stratificatie is het zoutgehalte. Het zoutgehalte wordt beïnvloed door inkomend getij tijdens vloed, zoetwaterafvoeren (vooral het spuidebiet bij Kornwerderzand) en menging. Overigens speelt ook de zoetwaterspui in de haven van Harlingen een rol, met name voor sedimentatie in het havenbasin. Dit spuidebiet bij Harlingen wordt hier niet specifiek beschouwd, omdat het een orde grootte kleiner is dan het spuidebiet bij Kornwerderzand en de invloed hiervan op de Boontjes wordt daarom als verwaarloosbaar aangenomen. Het spuidebiet bij Kornwerderzand heeft een tweeledig effect: primair een advectief effect op stroomsnelheden (ook wel 'barotropisch' genoemd) en secundair een effect via stratificatie en gravitatiecirculatie (ook wel 'baroklinisch' genoemd). De samenhang van zoutgehalte en het spuidebiet met SPM en sedimenttransport worden afzonderlijk bekeken om deze effecten van elkaar te onderscheiden.

Zoutgehalte

Voor het zoutgehalte is er alleen op locatie Boontjes noord ($p = -0,26$) sprake van een zwakke correlatie met SPM over de gehele meetperiode (d.w.z. de variatie in SPM bij Boontjes noord hangt voor 26% samen met het zoutgehalte), zie Tabel B-7. Daarbij moet opgemerkt worden dat getijstroming een onderliggende oorzaak kan zijn van variaties in zowel zoutgehalte als SPM (oftewel geen causaal verband tussen zoutgehalte en SPM). Ook uit Figuur 6-7 blijkt de negatieve correlatie, aangezien hogere SPM-waardes worden gemeten bij lagere zoutgehaltenes op meetlocatie Boontjes noord (zie de toenemende mediane SPM-waardes voor afnemende zoutgehaltenes).

De samenhang van het zoutgehalte met sedimenttransport en SPM wordt geïllustreerd met scatterplots en boxplots per meetlocatie in Bijlage E. Deze samenhang geldt in mindere mate ook voor het Kimstergat ($p = -0,13$), wat met name zichtbaar is in de boxplot voor zoutgehalte t.o.v. sedimenttransport (Figuur E-8). Op basis van de correlatiecoëfficiënten lijkt er nauwelijks samenhang te bestaan tussen zoutgehalte en SPM bij meetlocaties Blauwe Slenk ($p = -0,03$) en Boontjes zuid ($p = -0,04$). Toch lijkt in de boxplots (Figuur E-7 en Figuur E-10) een negatief verband zichtbaar, d.w.z. hogere SPM-waardes voor lagere zoutgehaltenes. Daarnaast is duidelijk zichtbaar dat de zoutgehaltenes bij Boontjes zuid over het algemeen lager zijn.



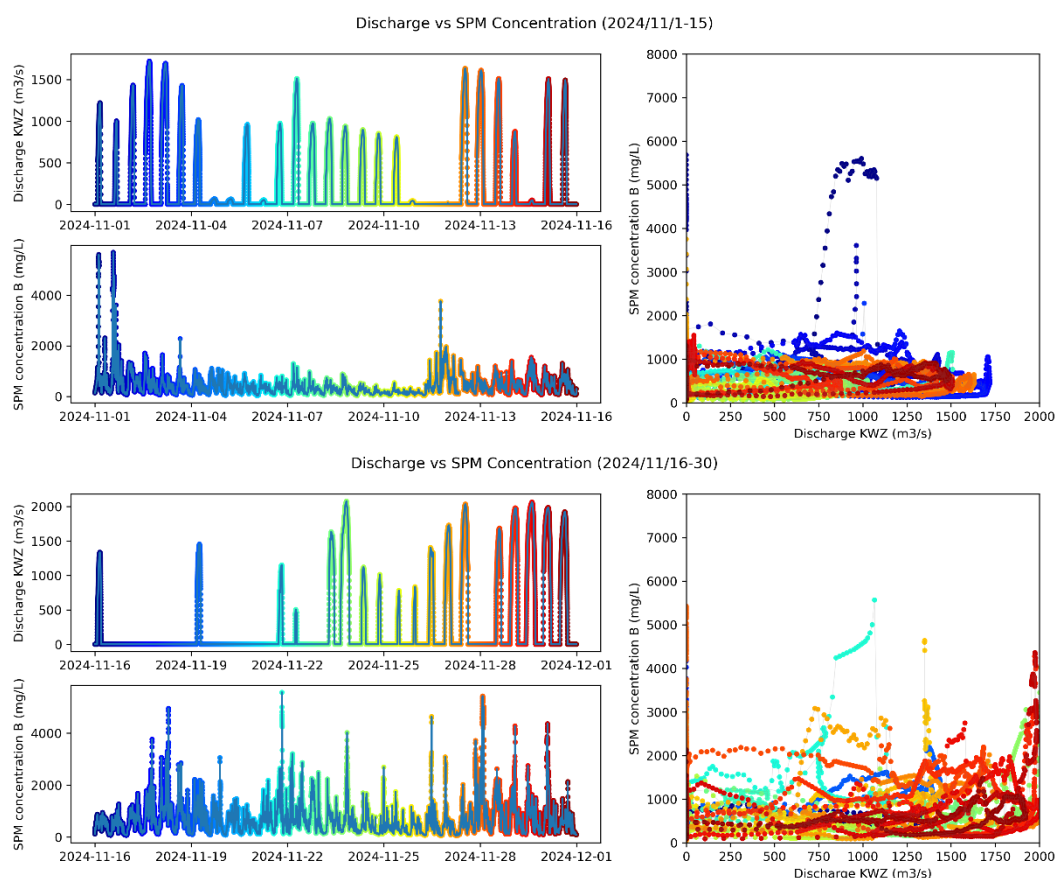
Figuur 6-7: Samenhang zoutgehalte met SPM getoond als boxplots op meetlocatie Boontjes noord. zoutgehalte t.o.v. SPM nabij de bodem. De kleuren hebben geen betekenis. Merk op dat zoutgehaltenes tussen 8 en 12 PSU relatief weinig voorkomen, waardoor de bijbehorende boxplot sterk afwijkende waardes geeft.

Spuidebiet Kornwerderzand

Aangezien het debiet van de zoetwaterspui in de haven van Harlingen verwaarloosbaar is t.o.v. het debiet van de zoetwaterspui bij Kornwerderzand, is in dit rapport enkel de laatste geanalyseerd. De samenhang van dit spuidebiet bij Kornwerderzand met het zoutgehalte is bekeken op de meetlocaties in de vaargeul Boontjes, waarbij opvalt dat het zoutgehalte op meetlocatie Boontjes zuid sterker en directer beïnvloed wordt door het spuidebiet bij Kornwerderzand, dan op meetlocatie Boontjes noord (zie figuren in Bijlage E.2).

De eerder genoemde lagere gemeten zoutgehaltes bij Boontjes zuid lijken logisch vanwege de nabijgelegen zoetwaterspui bij Kornwerderzand. Toch is de correlatiecoëfficiënt tussen het spuidebiet bij Kornwerderzand en de gemeten SPM-waardes op deze locatie ($\rho = -0,03$, zie Tabel B-7) het kleinst van alle meetlocaties (er is geen lineair verband), zie ook Figuur E-14.

Sedimentconcentraties op locatie Boontjes noord nemen wel licht toe voor grotere spuidebieten (Figuur E-13), maar de correlatie is ook hier zeer zwak ($\rho = +0,15$, zie Tabel B-7) en er is geen overduidelijk effect zichtbaar van de spuidebieten op de richting van het sedimenttransport (d.m.v. gravitatiecirculatie). Wel valt op dat een aantal momenten met relatief hoge SPM samenvallen met een periode van een tot enkele dagen waarin niet werd gespuid (rond 12 november, 17-18 november en 20-21 november). Dit zou kunnen duiden op het afnemen of wegvallen van een gravitatiecirculatiepatroon bij afwezigheid van deze zoetwaterspui (zie hypothese 3b uit paragraaf 2.2). Merk op dat dit verband (het sterkst voor extreem laag spuidebiet) niet goed tot uitdrukking komt in een lineaire correlatiecoëfficiënt.



Figuur 6-8: Samenhang tussen spuidebiet Kornwerderzand en SPM nabij de bodem op meetlocatie Boontjes noord (F3). Bovenste paneel toont de periode 1-16 november 2024, onderste paneel toont de periode 16-30 november 2024. Per paneel zijn links de tijdreeksen van spuidebiet (linksboven) en SPM (linksonder) weergegeven en rechts de scatterplot tussen spuidebiet en SPM.

Voor het Kimstergat is de correlatiecoëfficiënt tussen het spuidebiet bij Kornwerderzand en SPM eveneens laag ($\rho = +0,12$). Wel lijkt een hoog spuidebiet daar samen te hangen met meer netto sedimenttransport in ebrichting (sedimentexport) en relatief hoge SPM-waardes bij hoge afvoer (Figuur E-12). Om de samenhang beter te duiden moeten alle parameters in gezamenlijkheid worden beschouwd.

Tegen de verwachting in treedt de hoogste correlatiecoëfficiënt tussen het spuidebiet en SPM op in de Blauwe Slenk ($\rho = +0,27$; nog altijd een zwakke correlatie), de locatie die juist het verst van Kornwerderzand verwijderd ligt. Dit komt ook duidelijk naar voren uit de toenemende sedimenttransporten en SPM-waardes bij hogere spuidebieten in Figuur E-11. Mogelijk speelt hierbij een rol dat een gedeelte van de zoetwaterafvoer niet via de Boontjes, maar via een parallel geulsysteem (via het Verversgat en Molenrak) richting de Blauwe Slenk stroomt, waardoor het effect daar groter is. Of wellicht speelt er een gedeelte onderliggende oorzaak, waardoor wel een zwakke correlatie wordt gevonden, maar niet noodzakelijk een causaal verband.

6.3 Bevindingen

Met betrekking tot stratificatie en gravitatiecirculatie zijn de belangrijkste bevindingen:

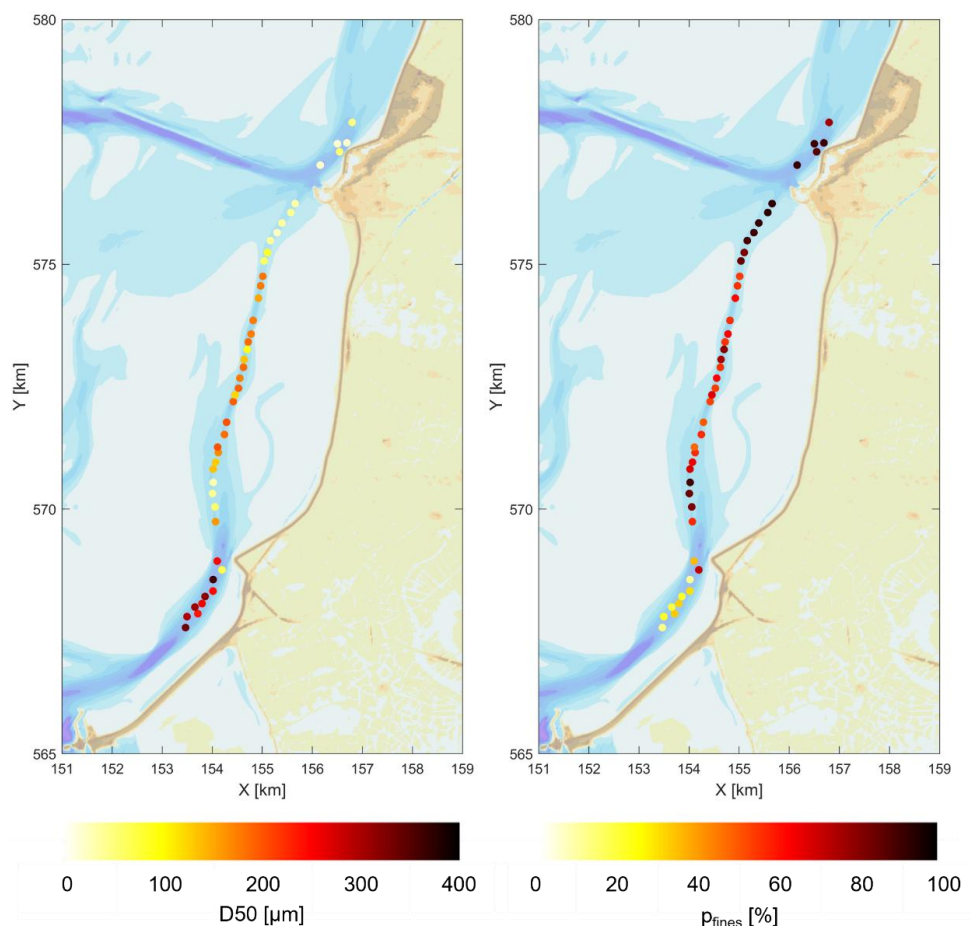
- Stratificatie wordt af en toe aangetroffen in de gemeten zout- en sedimentconcentratieprofielen. De mate van stratificatie varieert tussen verschillende locaties en ook gedurende een getijcyclus.
- In de gemeten profielen in de vaarweg Boontjes en de Geul langs Pollendam is zoutstratificatie bovenin de waterkolom en sedimentstratificatie onder in de waterkolom zichtbaar. In het Kimstergat is vooral sedimentstratificatie zichtbaar, terwijl de zoutprofielen voornamelijk gemengd zijn over de verticaal.
- Het zoutgehalte is het belangrijkste sturende proces dat zorgt voor stratificatie. Dit wordt vooral bepaald door de getijstrooming en daarnaast spelen ook zoetwaterafvoeren een rol, waarbij vooral de spuisluis bij Kornwerderzand van belang is. De zoetwaterspui in Harlingen heeft vooral een lokaal effect op sedimentatie in het havenbekken, maar speelt een minder grote rol voor de dynamiek op grotere schaal.
- Het zoutgehalte toont alleen op meetlocatie Boontjes noord een zwak verband met SPM, waarbij afnemende zoutgehaltes samenhangen met toenemende sedimentconcentraties. Op andere locaties speelt dit verband minder (Kimstergat) tot nauwelijks (Blauwe Slenk en Boontjes zuid) een rol. Wel zijn de zoutgehaltes bij Boontjes zuid aanmerkelijk lager.
- Het verband tussen het spuidebiet bij Kornwerderzand en sedimentconcentraties:
 - Deze zwakke tot zeer zwakke correlatie is in de op grotere afstand gelegen Blauwe Slenk iets hoger (met hogere sedimentconcentraties voor grotere spuidebieten) dan op het nabij gelegen meetpunt Boontjes zuid.
 - Opvallend dat een aantal SPM-pieken plaatsvonden op dagen waarop niet werd gespuid. Mogelijk viel hierbij het gravitatiecirculatiepatroon juist weg door afwezigheid van deze zoetwaterspui (negatief, niet-lineair verband).
- Een mogelijke gravitatiecirculatie (d.w.z. circulatiepatronen in de langsrichting van de geul) in de Boontjes, aangedreven door de zoetwaterspui bij Kornwerderzand, kan niet worden bevestigd op basis van de meetframes, maar hiervoor is wel enige aanwijzing in de snelheidsprofielen van de varende metingen bij meetraai Boontjes zuid.

7 Bodemsamenstelling

De resultaten van de bodembemonstering zijn in de vorm van de mediane korreldiameter (D50) en de slibfractie in de bodem weergegeven in Figuur 7-1. Deze resultaten bevestigen de gradiënt in bodemsamenstelling 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 die ook uit eerdere bemonstering volgde (Colina Alonso et al. (2021)). Rondom Harlingen, in het Kimstergat en in de Boontjes, bestaat de bodem eigenlijk enkel uit slib; de zandfractie is verwaarloosbaar klein. In het smalle deel van de vaarweg Boontjes is de slibfractie >50%. Zuidelijk van de Zuricher Oord polder bestaat de bodem vooral uit zand, met een mediane korreldiameter van rond de 300 μm .

Opvallend in de resultaten van de bodemsamenstelling is het slibrijke deel van de vaarweg ten noorden van de Zuricher Oord polder, op de overgang van de natuurlijke geul naar de onderhouden vaarweg, rond Y = 570 km in Figuur 7-1. De vaarroute en daarmee de monsterlocaties liggen hier net ten westen van het diepste deel van de natuurlijke geul. Tegelijkertijd blijkt uit recente bodempeilingen dat het uiteinde van de natuurlijke geul verschuift naar het oosten. Dit suggereert dat terwijl de geulstaart verschuift naar het oosten, de westkant van de geul opvult met slibrijk materiaal.

Op basis van de data die nu beschikbaar is van de T0-metingen kan geen uitspraak gedaan worden over de aanwezigheid van fluid mud onderin de waterkolom.



Figuur 7-1: Resultaten van bodembemonstering in vaarweg Boontjes en het Kimstergat. Het paneel links toont de mediane korrelgrootte (D50) en het paneel rechts toont de slibfractie (massafractie < 63 μm).

Tabel 7-1: Mediane korrelgrootte (D50) en slibfractie (massafractie < 63 μm) voor de monsterlocaties, zoals weergegeven in Figuur 7-1. Merk op dat de monsterlocaties zijn opgenomen in volgorde van zuid naar noord.

Locatie	X (RD) [m]	Y (RD) [m]	D50 (μm)	Slibfractie (%)
CB20	153467	567579	360	16
CB19	153496	567803	321	31
CB18	153712	567864	268	42
CB17	153654	567998	331	26
CB16	153797	568069	285	41
CB15	153857	568214	344	29
CB14	154015	568325	276	39
CB13	154018	568560	383	14
CB12	154195	568757	98	79
CB11	154100	568937	277	44
BB20	154065	569743	196	65
BB19	154055	570044	79	88
KB1	156795	577899	68	83
KB2	156691	577480	28	96
KB3	156501	577462	26	96
KB4	156546	577299	78	93
KB5	156157	577026	30	98

Locatie	X (RD) [m]	Y (RD) [m]	D50 (µm)	Slibfractie (%)
BB1	155657	576240	45	98
BB2	155571	576057	57	99
BB3	155392	575843	52	97
BB4	155294	575647	33	96
BB5	155161	575484	53	95
BB6	155102	575241	120	88
BB7	155036	575069	85	91
BB8	155011	574755	217	62
BB9	154967	574560	214	63
BB10	154923	574308	189	69
BB18	154005	570318	59	90
BB17	154021	570545	43	96
BB16	154018	570816	174	76
BB15	154068	570959	168	72
BB14	154121	571154	203	64
BB13	154107	571265	235	56
BB12	154245	571523	220	64
BB11	154287	571773	235	58
CB10	154420	572195	228	61
CB9	154456	572332	163	74
CB8	154525	572469	227	62
CB7	154552	572674	211	70
CB6	154625	572895	222	64
CB5	154638	573056	173	82
CB4	154699	573260	126	86
CB3	154719	573413	221	63
CB2	154777	573576	211	70
CB1	154817	573853	212	64

8 Discussie

De analyse van de T0-meetgegevens in dit rapport bestaat uit een beschrijving van de gemeten tijdreeksen en nadere analyse van de invloed van een aantal beperkt aantal sturende processen voor SPM (te weten stroming, wind/golven en stratificatie door de zoet/zout-gradiënt). Naast deze eerste analyses zouden diverse andere analyses uitgevoerd kunnen worden op de meetdata en een uitgebreidere synthese van deze analyse in de context van eerdere metingen en beschrijvingen uit literatuur. Dit gaat voorbij aan het doel van dit rapport. Aanbevelingen voor verdere analyses zijn opgenomen in Paragraaf 9.2.

8.1 Methode en interpretatie

Er zijn verschillende kanttekeningen te plaatsen bij de methode en interpretatie van de data-analyse. Ten eerste is de gehanteerde conversiefactor om SPM te bepalen uit de ruwe OBS-meetdata van 3,54 (mg/L)/NTU relatief hoog ten opzichte van eerdere metingen met een vergelijkbare procedure (zoals de analyse van de metingen bij Holwerd en Ferwerd met factor 1,9 (mg/L)/NTU door Bi et al. (2024)). Zie ook de beschrijving van deze kalibratie in sectie 2.1.4. Deze hoge conversiefactor leidt tot relatief hoge SPM-waarden in de gemeten tijdreeksen, met pieken tot wel 8000 mg/L. De reden voor de relatief hoge conversiefactor voor de T0-meetdata is onbekend, waardoor onduidelijk is hoe betrouwbaar de hoge concentraties zijn. Om die reden zijn de resultaten in dit rapport voor wat betreft sedimentconcentraties en -transporten vooral kwalitatief beschreven (bijv. variaties in ruimte en tijd) in plaats van kwantitatief (bijv. getransporteerde massa). Een verbeterde kalibratie van de troebelheidssensoren bij vervolgmetingen is nodig om een kwantitatieve analyse van de SPM-data te maken.

Daarnaast komen uit de analyse van de T0-metingen een aantal suggesties naar voren voor vervolgmetingen. Tijdens de T0-meetcampagne zijn er geen directe golfmetingen gedaan, maar zijn golfhoogtes afgeleid uit het druksignaal van de ADV-sensor. Deze afleiding blijkt beperkt betrouwbaar, met name op dieper gelegen meetpunten. Het toevoegen van één of meerdere golfboei(en) aan de vervolgmeetcampagnes zou nuttig zijn om de golfhoogte betrouwbaarder te bepalen en daarmee mogelijk ook het belang van resuspensie vanaf de platen en geul-plaatinteractie aan te kunnen tonen.

Met betrekking tot de bodemsamenstellingen kan, op basis van de bodembemonsteringen uit de T0-metingen, niet worden bepaald of fluid mud aanwezig is onderin de waterkolom. Door bij vervolgmetingen ook de dichtheid van de monsters te bepalen kan hier meer inzicht in worden verkregen.

8.2 Reflectie op hypothesen en conceptueel systeembegrip

De meetdata uit de T0-meetcampagne is zeer waardevol, maar tevens beperkt in tijd en ruimte, waardoor er geen compleet beeld van de stroming- en sedimentdynamiek en morfologische ontwikkeling uit kan worden gehaald. Om de analyse breder te interpreteren zou een uitgebreide vergelijking met eerdere metingen, andere datasets en literatuurbeschrijvingen moeten worden gemaakt. Een dergelijke synthese gaat voorbij aan het doel van dit rapport. Daarom volgt hierna een beperkte reflectie op de hypothesen uit Paragraaf 2.2 en ook een beperkte aanscherping van het conceptueel systeembegrip op basis van de bevindingen uit de analyse van de T0-metingen.

hypothese 1: Stromingspatronen en getijvoortplanting:

- a. *getijvulling van de Boontjes komt voornamelijk vanuit het Marsdiep;*
- b. *getijvulling van het Kimstergat komt voornamelijk vanuit het Vlie; en*
- c. *de getijuitwisseling tussen Boontjes en Kimstergat is beperkt.*

Uit Paragraaf 3.1 blijkt de vloedstroming door de gehele vaargeul Boontjes meestal noordwaarts gericht is. De getijvulling van de Boontjes is dus inderdaad voornamelijk vanuit het Marsdiep afkomstig (conform hypothese 1a). In tegenstelling tot hypothese 1b blijkt de getijvulling van het Kimstergat ook gedeeltelijk afkomstig uit de Boontjes. Ook de ebstroming vanuit Kimstergat verdeelt zich over Boontjes, Molenrak en Geul langs Pollendam. Op basis van de varende metingen en meetframes uit de T0-meetcampagne zijn er geen aanwijzingen voor aanwezigheid van een hydrodynamisch wantij in de Boontjes. Dit geheel is dus in tegenspraak op hypothese 1c en wijkt af van eerdere bevindingen op basis van een modelstudie (Smits et al., 2022).

hypothese 2: Wind en golven:

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

Uit Paragraaf 3.2 blijkt dat wind en golven vooral een grote rol spelen voor SPM bij hoge windsnelheden op de ondiepere meetlocaties. Wind uit het noordwesten (de meest bepalende conditie voor slibtransport in de Waddenzee) heeft het grootste effect op SPM in de vaarweg Boontjes (in lijn met hypothese 2a). Daarnaast lijkt in het Kimstergat door de oriëntatie en ligging vooral het verschil tussen noordenwind en zuidenwind een rol te spelen voor netto sedimenttransport. Dit komt overeen met eerdere bevindingen van Colosimo et al. (2020). Geul-plaatuitwisseling is niet specifiek geanalyseerd. Wel blijkt uit de samenhang tussen golfhoogte en SPM dat de samenhang vrij sterk is voor grotere golfhoogtes en dat de sedimentconcentratie vrij snel reageert op golfhoogte (zowel bij toename als bij afname). Het gebrek aan vertraging in respons duidt op uitwisseling op relatief kleine tijd en ruimteschaal. Op basis van de varende metingen zouden circulatiepatronen in dwarsrichting van de geul verder onderzocht kunnen worden.

hypothese 3: Gravitatiecirculatie:

- a. *De zoetwaterspui bij Kornwerderzand drijft een gravitatiecirculatiepatroon aan in de Boontjes met aan het oppervlak noordwaarts gericht transport (zoetwaterpuls) en nabij de bodem zuidwaarts gericht transport van water en sediment.*
- b. *Bij afwezigheid van deze zoetwaterspui is het transport uniform over de gehele verticaal (tijdens vloed noordwaarts en tijdens eb zuidwaarts).*

In Paragraaf 5 wordt beschreven dat stratificatie wordt aangetroffen in een aantal gemeten zoutprofielen in de vaarweg Boontjes en in de Geul langs Pollendam. De getijfasering van gelaagdheid en menging verschilt per locatie. De gemeten zoutprofielen in het Kimstergat zijn meer gemengd. Er is beperkt aanwijzing gevonden voor een mogelijke gravitatiecirculatiepatroon in de vaarweg Boontjes, in de vorm van 3D stromingsprofielen met tegengestelde stromingsrichtingen nabij de bodem en aan het wateroppervlak. Daarnaast zijn er enkele andere aanwijzingen die kunnen duiden op een dergelijk effect, zoals de zwakke samenhang (correlatie) tussen het zoutgehalte en SPM bij meetlocatie Boontjes noord. Er was echter nauwelijks sprake van lineaire correlatie tussen het spuidebiet bij Kornwerderzand en SPM bij meetlocatie Boontjes noord en in het Kimstergat.

Met name op momenten met laag of zelfs zonder spuidebiet was SPM hoog (waarvoor een lineaire correlatiecoëfficiënt geen goede representatie is). Wanneer wel gespuid wordt is er in feite sprake van een omgekeerd gravitatiecirculatiepatroon. Bij klassieke gravitatiecirculatie zorgt een bovenstrooms zoetwaterbron voor sedimentimport (landwaarts). Bij de Boontjes en het Kimstergat ligt de voornaamste zoetwaterbron (Kornwerderzand) aan de zeewaartse kant van het waterlichaam, waardoor zoetwater leidt tot sedimentexport (zeewaarts). Dit proces is eerder beschreven voor het Kimstergat door Schulz & Gerkema (2018). Hypotheses 3a en 3b konden op basis van de resultaten dus slechts beperkt worden geverifieerd. Voor verdere verificatie zouden verticale stromingsprofielen moeten worden geanalyseerd en vergeleken met het spuidebiet bij Kornwerderzand.

Op basis van de analyse van de T0-metingen zou hypothese 1 aangescherpt kunnen worden m.b.t. getij-instroom en uitstroom van het Kimstergat, waar wel degelijk een uitwisseling met de Boontjes plaatsvindt. De aangescherpte hypothese voor vervolgstudie luidt:

“hypothese 1: Stromingspatronen en getijvoortplanting:

- a. getijvulling van de Boontjes komt voornamelijk vanuit het Marsdiep;*
- b. getijvulling van het Kimstergat komt vanuit zowel het Vlie als vanuit de vaargeul Boontjes; en*
- c. de mate van uitwisseling tussen Boontjes en Kimstergat is sterk afhankelijk van getij- en windcondities”.*

Voor hypotheses 2 en 3 is er vooralsnog geen aanleiding om deze hypotheses aan te passen.

Naast de hypotheses zijn een aantal andere aspecten naar voren gekomen die het conceptueel systeembegrip uit Paragraaf 1.4 aanscherpen:

- In de vaarweg Boontjes werd vaargeulonderhoud uitgevoerd op 10, 15 en 31 oktober, op 4, 21, 23, 26 en 27 november en op 1 december. Waarvan:
 - Op 10 en 15 oktober werd enkel geploegd (geen sediment verwijderd).
 - Op 31 oktober, 4 november en 26-27 november werd gebaggerd in de noordelijke Boontjes en verspreid in het verspreidingsvak Kimstergat.
 - Op 31 oktober, 27 november en 1 december werd gebaggerd in de zuidelijke Boontjes en verspreid bij in verspreidingsvak Boontjes (nabij Kornwerderzand).
 - Op 31 oktober, 23 en 27 november werd middels agitatiebaggeren sediment binnen de baggervakken ‘op stroom gezet’
 - Er zijn duidelijke SPM-pieken zichtbaar in het Kimstergat (zie Figuur G-1 t/m Figuur G-4) en op meetlocatie Boontjes zuid (zie Figuur G-5 t/m Figuur G-8) op deze verspreidingsmomenten. Deze SPM-pieken zijn echter niet hoger dan SPM-pieken die daarvoor of daarna optreden, waardoor dit geen overtuigend bewijs is dat verspreiding baggerspecie zorgt voor verhoging van SPM op deze specifieke momenten en locaties.
- Op basis van het vaargeulonderhoud kunnen sommige SPM-pieken in het Kimstergat en Boontjes zuid dus mogelijk worden verklaard. Naast materiaal uit de Boontjes wordt in het Kimstergat ook gebaggerd materiaal uit de haven van Harlingen verspreid. Gegevens over gebaggerde volumes en verspreidingsmomenten vanuit de haven van Harlingen ontbreken echter op het moment van schrijven.
- Uit de recente morfologische ontwikkeling rond de zuidelijke Boontjes, beschreven in Paragraaf 1.4, blijkt dat de hoofdgeul vanuit het Marsdiep (Texelstroom) licht noordwaarts uitbreidt en een nieuwe vloedschaar vormt, oostelijk van de huidige vaarweg (zie Figuur 1-2). Uit de bodembemonstering van de T0-meetcampagne bleek ook dat slibrijk materiaal wordt aangetroffen in de huidige vaargeul (ten westen van het diepste deel van de natuurlijke geul), zie Hoofdstuk 7.

Een deel van het baggerbezwaar in de vaargeul wordt dus veroorzaakt doordat de betonde vaargeul de natuurlijke loop van de Boontjes niet (meer) goed volgt. Op dit moment is onduidelijk welk aandeel dit precies vormt van het gehele baggerbezwaar, maar over het algemeen wordt het merendeel gebaggerd in het voormalige drempelgebied in de noordelijke Boontjes. Als deze ontwikkeling doorzet zou de vaarroute in de toekomst oostwaarts verplaatst kunnen om in te spelen op deze morfologische ontwikkeling .

- Tijdens de meetcampagne is geëxperimenteerd met bodembepaling met verschillende akoestische frequenties (1200 en 200 kHz), om de aanwezigheid van een sliblaag te bepalen. Door de verschillende posities van beide instrumenten (ADCP en SBES) kon hieruit helaas geen dikte van de sliblaag bepaald worden. Dit wordt opgevolgd in de latere meetcampagnes die gekoppeld zijn aan de pilot in de vaarweg Boontjes, om de aanwezigheid van fluid mud in een later stadium te kwantificeren.

8.3 Analyse vervolgmetingen

De bovenstaande reflectie op hypothesen en aanscherping van het conceptueel model levert nuttige inzichten op qua sturende processen voor de hoge baggervolumes in de vaargeul Boontjes. Er komt echter geen duidelijk dominant proces naar voren uit de meetgegevens, verschillende parameters en processen lijken een kleine rol te spelen in deze dynamische omgeving. De inzichten en de analysemethode van de T0-meting kunnen worden gebruikt om het effect van de pilot te duiden op basis van vervolgmetingen tijdens de pilot.

Ten eerste kunnen de gemeten sedimentconcentraties tijdens deze vervolgmetingen direct worden vergeleken met de gemeten sedimentconcentraties van de T0-meting (na verbeterde kalibratie) om te zien of gedurende de pilot de sedimentconcentraties afnemen, als maat voor de te verwachten sedimentatie in de vaargeul. Daarbij zullen verschillen in weersomstandigheden en condities ook een rol spelen, waardoor niet alleen tijdreeksen vergeleken moeten worden, maar ook een statistische analyse gedaan kan worden. Daarnaast kan in meer detail worden gekeken naar verschillende sturende processen door bijvoorbeeld in relatief kalme periodes het effect van getijstroming te analyseren en in periodes met meer wind het effect van golfgedreven resuspensie te bekijken. Om dit te duiden is uiteraard ook van belang hoeveel en waar gebaggerd is, en hoe dit zich verhoudt tot de periode voorafgaand aan de pilot. Dus ook de baggergegevens en dieptepeilingen zullen geanalyseerd moeten worden, het baggervolume is immers de meest directe aanwijzing voor sedimentatie in de vaargeul. De aanpak voor de analyse van de vervolgmetingen zal voorafgaand aan deze analyse in meer detail met Rijkswaterstaat worden besproken.

9 Conclusie

9.1 Bevindingen analyse T0-meting

Met de pilot verondieping vaarweg Boontjes wordt beoogd het onderhoudsbaggervolume omlaag te brengen en de ecologische impact van het baggeren en verspreiden te verminderen. De T0-meetcampagne is uitgevoerd om een goed beeld te hebben van de systeemwerking voorafgaand aan de pilot, zodat metingen tijdens de uitvoering van de pilot kunnen worden vergeleken met de situatie daarvoor.

Voor de troebelheidsmetingen is onduidelijk hoe betrouwbaar de SPM-waardes zijn, mogelijk worden deze overschat door de relatief hoge gehanteerde conversiefactor van 3,54 (mg/L)/NTU. Om die reden worden de sedimentconcentraties en -transporten vooral kwalitatief beschreven in plaats van kwantitatief. Een verbeterde kalibratie van de troebelheidssensoren bij vervolgmetingen is nodig om een kwantitatieve analyse van de SPM-data te maken.

De eerste analyse van de T0-meting heeft een aantal nuttige inzichten opgeleverd over de systeemwerking:

- Getijuitwisseling en stroomsnelheden:
 - Vloedstroming is door de gehele vaargeul Boontjes meestal noordwaarts gericht. Ebstroming vanuit Kimstergat verdeelt zich over Boontjes en Geul langs Pollendam. Er lijkt dus geen hydrodynamisch wantij in de Boontjes te liggen.
 - De samenhang tussen stroomsnelheden en SPM is het sterkst op ondiepe meetlocaties (Kimstergat en Boontjes noord) en tijdens kalme periodes.
 - Gemeten SPM-gehalten in het Kimstergat en de zuidelijke Boontjes waren tijdens vloed aanmerkelijk hoger dan tijdens eb. In combinatie met vloeddominante stroomsnelheden duidt dit op netto landwaarts sedimenttransport (of sedimentimport).
 - 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.
- Wind en golven spelen vooral een grote rol voor sedimentconcentraties bij hoge windsnelheden op de ondiepere meetlocaties. Wind uit het noordwesten (de meest bepalende conditie voor slibtransport in de Waddenzee) lijkt het grootste effect te hebben op SPM in de vaarweg Boontjes. Dit is in lijn met bevindingen uit eerdere studies, al kwam er weinig zuidwestenwind voor gedurende de meetcampagne. In het Kimstergat lijkt door de oriëntatie en ligging vooral het verschil tussen noordenwind en zuidenwind een rol te spelen (mogelijk gekoppeld aan geul-plaatswisseling).
- Residuele stroming en netto sedimenttransporten
 - Residuele stroming en netto sedimenttransport zijn op de meeste meetpunten in de vloedrichting, behalve in de noordelijke Boontjes.
 - Daardoor kan gesuspendeerd sediment ophopen in de vaargeul Boontjes als gevolg van noordwaarts sedimenttransport vanuit het zuiden en zuidwaarts sedimenttransport vanuit het noorden. Dit is een belangrijke bevinding, waardoor lokale sedimentatie kan ontstaan in de vaargeul.
 - Het is van belang is om de lokale dynamiek bij meetlocatie Boontjes noord in meer detail te bestuderen, aangezien ook ebtransport richting Molenrak plaatsvindt.

- Uit de varende metingen blijkt dat de richting van residuele stroming en netto sedimenttransport tussen twee 13-uursmetingen kan verschillen. Zowel de omvang als de richting van netto transport is dus zeer gevoelig voor fluctuaties in bruto transport.
- De windrichting blijkt een belangrijke rol te spelen voor de richting van de 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. Daardoor kan noordenwind zorgen voor sedimenttransport vanuit het Kimstergat richting de vaargeul Boontjes.
- Stratificatie en gravitatiecirculatie:
 - Gestratificeerde zout- en sedimentconcentratieprofielen werden aangetroffen in de vaarweg Boontjes en in de Geul langs Pollendam, waarvan de fasering met het getij verschilt per locatie. De gemeten zoutprofielen in het Kimstergat zijn meer gemengd.
 - Alleen in de noordelijke Boontjes is een zwak verband tussen zoutgehalte en SPM gevonden met hogere sedimentconcentraties bij zoeter water.
 - Over de gehele meetperiode zijn zoutgehaltes bij Boontjes zuid aanmerkelijk lager dan op de andere locaties.
 - Desondanks lijkt de samenhang tussen het spuidebiet bij Kornwerderzand en sedimentconcentraties hier klein. Juist in de Blauwe Slenk gaf dit spuidebiet een verrassend hogere correlatie met SPM.
 - Een mogelijke gravitatiecirculatie in het Kimstergat en Boontjes noord, aangedreven door de zoetwaterspui bij Kornwerderzand, werd niet bevestigd op basis van lineaire correlatie tussen het spuidebiet en SPM. Wel werd beperkt aanwijzing hiervoor gevonden in de snelheidsprofielen van de varende metingen bij meetraai Boontjes zuid (op grotere waterdiepte).

Bovenstaande inzichten zijn nuttig om de hoge baggervolumes in de vaargeul Boontjes te verklaren. Bovendien kunnen deze inzichten en de analysemethode van de T0-meting worden gebruikt om het effect van de pilot te duiden op basis van vervolgmetingen tijdens de pilot. Daarnaast kunnen de inzichten uit de analyse van de T0-meetdata mogelijk ook ter inspiratie dienen om nieuwe maatregelen te ontwerpen of om het onderhoud te optimaliseren.

9.2 Aanbevelingen

Uit de analyse van de T0-meting zijn een aantal aanbevelingen naar voren gekomen. Met betrekking tot vervolgmetingen gedurende de pilot:

- Tijdens de analyse van de T0-metingen is tevens geadviseerd over de wenselijkheid van aanvullende metingen in mei 2025. Vanwege de relatieve lage baggervolumes in de Boontjes in het najaar van 2024 en het verschil in condities tussen het voorjaar en najaar (wind en golven, spuidebieten, mogelijke aanwezigheid fluid mud en invloed van biologische factoren) is geadviseerd om ook in het voorjaar van 2025 metingen uit te voeren (bij publicatie van dit rapport reeds uitgevoerd).
- Ter verbetering van de kalibratie van de OBS-sensoren wordt aangeraden om watermonsters te nemen en hiervan de sedimentconcentratie te bepalen. Het is vooral van belang om verschillende type instrumenten te ijken voor een monster met een bekende sedimentconcentratie. Dit zal worden opgepakt in het NWO-onderzoeksprogramma WadSed.
- Tijdens de T0-metingen zijn golven niet direct gemeten, maar afgeleid uit het druksignaal van de ADV-sensor. De betrouwbaarheid van dit signaal bleek beperkt, met name op grotere dieptes.

Daarom wordt aangeraden om een of meerdere golfboeien te plaatsen tijdens de volgende meetcampagnes, zodat de rol van golven voor sedimentatie in de vaargeul beter geduid kan worden.

- Om meer inzicht te krijgen in geul-plaatuitwisseling zou het nuttig zijn om meerdere meetpunten te plaatsen op de overgang van plaat naar geul. Ook dit wordt reeds opgepakt in het NWO-onderzoeksprogramma WadSed.
- Om een beter beeld te krijgen van de bodemsamenstelling en de aanwezigheid van fluid mud onderin de waterkolom, wordt aangeraden om bij bodembemonstering ook de in-situ dichtheid van de monsters te meten. Daarnaast kan bij dieptepeilingen met verschillende akoestische frequenties (1200 en 200 kHz) worden gemeten om een fluid mudlaag te detecteren.

In dit rapport is de eerste analyse van de T0-meetresultaten beschreven. Er zijn diverse aanbevelingen om de analyse uit te breiden en de verzamelde data voor andere toepassingen te gebruiken:

- Om de analyse van de T0-meetresultaten in bredere context te plaatsen zou een uitgebreide vergelijking met eerdere metingen, andere datasets en literatuurbeschrijvingen moeten worden gemaakt. Een dergelijke synthese zou een aanvulling kunnen vormen op de vervolganalyse van meetresultaten gedurende de pilot. Als onderdeel hiervan zou ook een vergelijking gemaakt kunnen worden SPM-metingen met bagger- en verspreidingsgegevens van de vaargeul Boontjes en de haven van Harlingen (zie verderop).
- Om de lokale dynamiek bij Boontjes noord en eventuele uitwisseling met het Molenrak beter te begrijpen zou de langsrichting van de geul moeten worden aangehouden bij het bepalen van (netto) sedimenttransport.
- In meer detail de verticale profielen van de sedimentconcentratie afkomstig van de CTD-OBS sensor, die zijn verzameld tijdens de varende metingen, bestuderen om het belang van gravitatiecirculatie beter te kunnen duiden.
- Verticale stromingsprofielen kunnen worden afgeleid uit de (verticaal gepositioneerde) ADCP-sensor en kunnen waardevol zijn om inzichten te krijgen in eventuele 3D-stromingspatronen, met name voor het duiden van eventuele gravitatiecirculatie in de vaarweg Boontjes. De backscatter van deze ADCP-sensor kan gebruikt worden om (kwalitatief) te duiden waar in de waterkolom hogere sedimentconcentraties optreden.
- Op basis van de varende metingen zouden laterale circulatiepatronen verder onderzocht kunnen worden om meer inzicht te krijgen in geul-plaat uitwisseling.
- De SPM-metingen kunnen in meer detail worden bekeken en vergeleken met sturende factoren om niet alleen de correlatie over de gehele tijdreeks te bekijken, maar ook variaties op korte tijdschaal (bijv. per SPM-piek) te verklaren.

Daarnaast zou het interessant zijn om de bagger- en verspreidingsgegevens naast de gemeten SPM-tijdreeksen te leggen. Deze gegevens zijn op dit moment alleen beschikbaar voor het onderhoud van de vaargeul Boontjes (baggervolumes waren relatief klein in het najaar van 2024), maar niet van de haven van Harlingen, waarvan meestal meer baggerspecie verspreid wordt in het Kimstergat.

De verzamelde meetgegevens kunnen gebruikt worden ter validatie of (indien nodig) nadere kalibratie van het numerieke model. Vooral de verticale profielen van de stroomsnelheden en sedimentconcentraties in de waterkolom zijn van grote waarde omdat dit type metingen zeldzaam is. Dit is zowel nuttig om nadere inzichten over de Boontjes op te doen, alsook om het model voor de gehele Waddenzee te verbeteren.

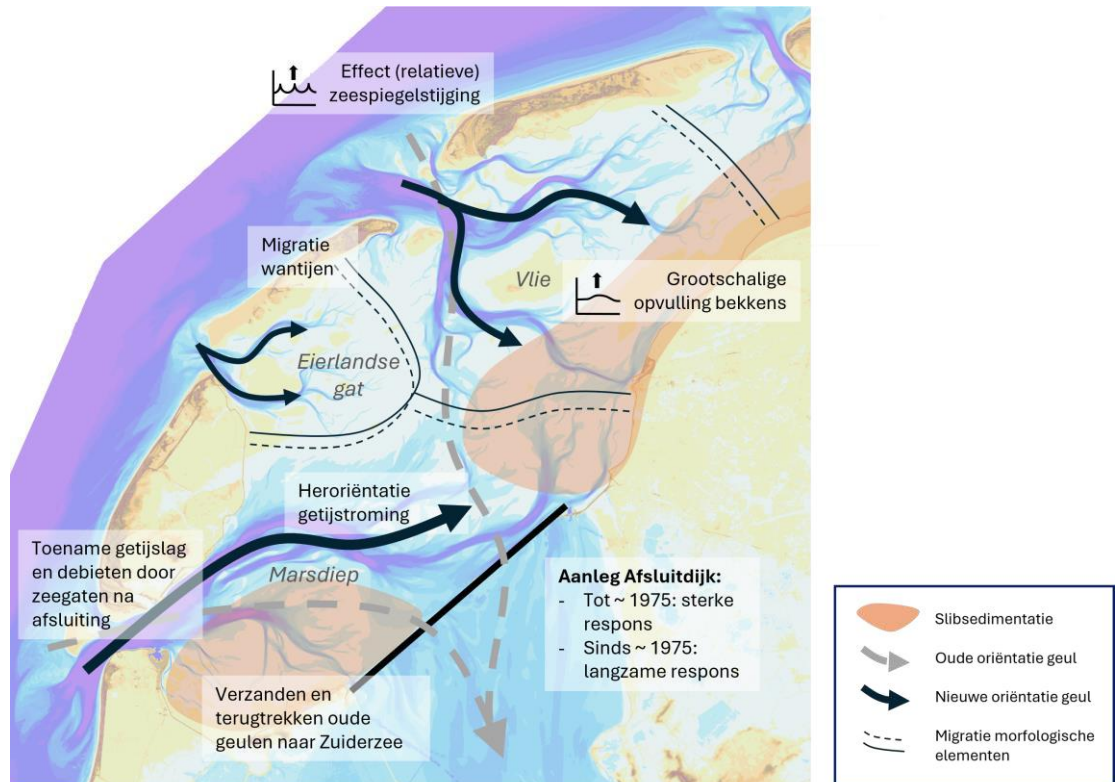
Tot slot raden wij aan om, zoals eerder aanbevolen door Smits et al. (2022):

- de effecten van een retourstroom vanuit de verspreidingsvakken op langere termijn door te rekenen met het model;
- een specifiek golfmodel opzetten om te combineren met het bestaande slibmodel om meer inzicht te verkrijgen in de afzonderlijke effecten van golven en stroming op sedimentatie in de vaargeul; en
- het effect van de airset uit de haven van Harlingen op de omgeving te onderzoeken, aangezien deze ook de slibeigenschappen (breken van vlokken, aanwezigheid luchtbelletjes) kan beïnvloeden.

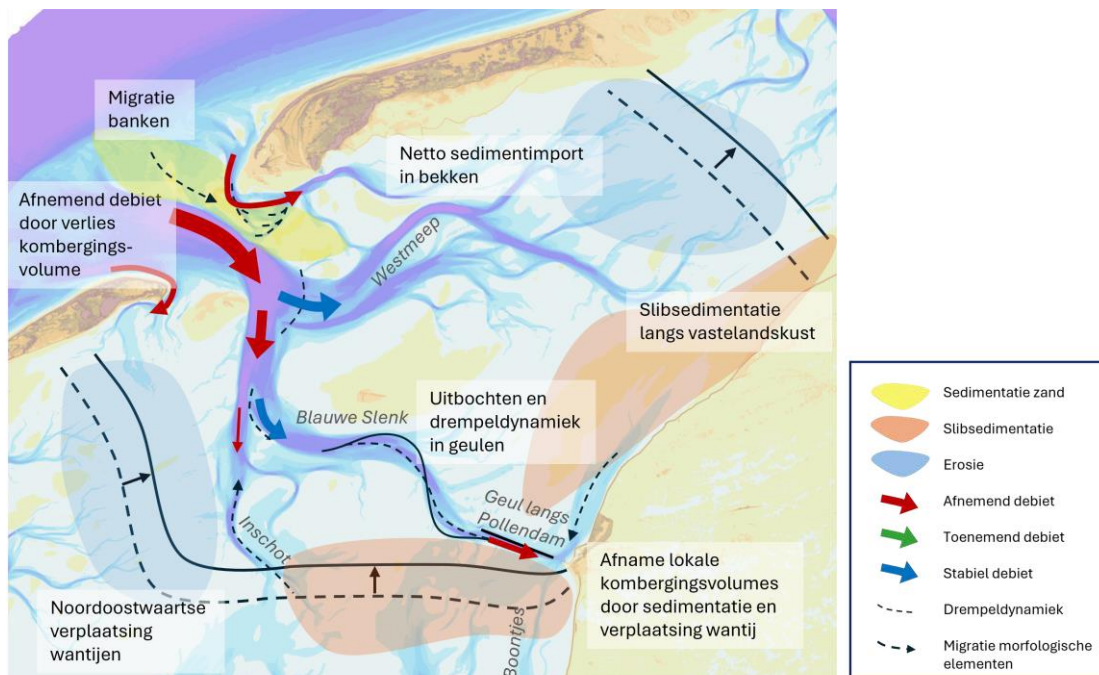
Literatuur

- 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.
- 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.
- Colina Alonso, A., Smits, B.P., Vroom, J.A. (2021). Stijging Baggerhoeveelheden Vaargeul Boontjes. Deltares rapport 11206799-007-ZKS-0001. Deltares, Delft. 93 pp.
- 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.
- 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.
- Oost, A. Cleveringa, J. en Taal, M. (2019) Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019. Deltares rapport 11203669-000-ZKS-0006. Deltares, Delft.
- Quataert, E., Meijers, C., De Beer, A., Elias, E. (2024) Knelpuntanalyse Harlingen – Noordzee. Deltares rapport 11210370-005-ZKS-0002. Deltares, Delft.
- Schulz, K.& Gerkema, T. (2018). An inversion of the estuarine circulation by sluice water discharge and its impact on suspended sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 200, 31-40
- 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.
- Vroom, J., Cleveringa, J., Oost, A., Taal, M. (2023) Kombergingsrapportage Marsdiep. Deltares rapport 11209267-001-ZKS-0005. Deltares, Delft.

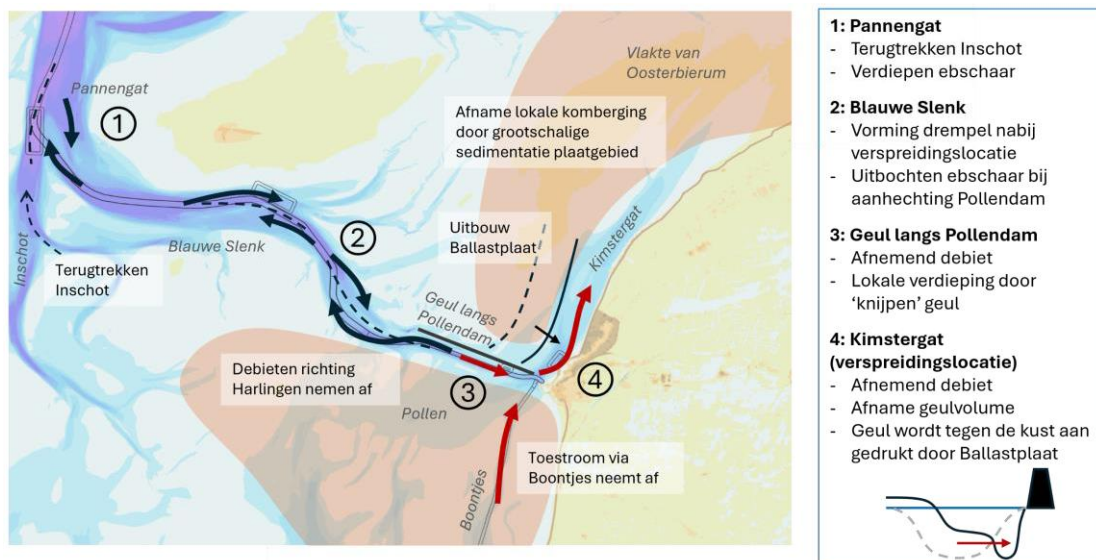
A Conceptueel model ontwikkeling kombergingsgebied Vlie



Figuur A-1: Ontwikkelingen op de schaal van de westelijke Waddenzee, op de tijdschaal van tientallen jaren tot eeuwen (Meijers et al., 2024).



Figuur A-2: Ontwikkelingen op de schaal van het kombergingsgebied Vlie, op de tijdschaal van tientallen jaren (Meijers et al., 2024).



Figuur A-3: Ontwikkelingen op de schaal van morfologische eenheden, op de tijdschaal van jaren (Meijers et al., 2024).

B Statistiek

B.1 Basisstatistieken per parameter

Tabel B-1: Basisstatistieken meetframe Blauwe Slenk (F1). Per parameter zijn de gemiddelde waarde, standaarddeviatie, minimumwaarde, 25-, 50-, 75-percentiel en maximumwaarde gegeven. Voor F1 ontbreken de metingen van de onderste OBS sensor en zijn de golfparameters niet accuraat.

	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: Basisstatistieken meetframe Kimstergat (F2). Per parameter zijn de gemiddelde waarde, standaarddeviatie, minimumwaarde, 25-, 50-, 75-percentiel en maximumwaarde gegeven.

	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-3: Basisstatistieken meetframe Boontjes noord (F3). Per parameter zijn de gemiddelde waarde, standaarddeviatie, minimumwaarde, 25-, 50-, 75-percentiel en maximumwaarde gegeven.

	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-4: Basisstatistieken meetframe Boontjes zuid (F4). Per parameter zijn de gemiddelde waarde, standaarddeviatie, minimumwaarde, 25-, 50-, 75-percentiel en maximumwaarde gegeven. Voor F4 zijn de golfparameters niet accuraat.

	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

B.2 Correlaties van parameters met SPM

In deze bijlage worden lineaire correlatiecoëfficiënten bepaald voor het verband tussen SPM en diverse andere parameters. Hierop is geen statistische toets uitgevoerd, maar correlatiecoëfficiënten tussen 0,4 en 0,6 worden als matige correlaties beschouwd en tussen 0,2 en 0,4 als zwakke correlaties. Alhoewel er dus geen sterke correlaties zijn gevonden, kunnen ook matige en zwakke correlaties een aanzienlijk deel van de variatie in SPM verklaren. De hoogste correlatiecoëfficiënten werden gevonden voor de stroomsnelheid in het Kimstergat en bij meetlocatie Boontjes noord.

Bij de interpretatie moet het verschil tussen correlatie en causaliteit beseft worden: niet alle parameters die gecorreleerd zijn hebben ook een oorzakelijk verband. Soms kunnen oorzaak en gevolg omgekeerd zijn, of geldt er een gedeelde onderliggende oorzaak. Temperatuur en SPM zijn bijvoorbeeld ook gecorreleerd (niet besproken in dit rapport), maar vermoedelijk speelt hierbij de seizoensvariatie een belangrijke onderliggende rol. Tot slot kan er soms een vertraging zitten tussen oorzaak en gevolg, wat niet goed naar voren komt uit een lineaire correlatiecoëfficiënt. Ondanks deze kanttekeningen is het nuttig om correlaties te bekijken om te bekijken welke parameters mogelijk sturend zijn voor SPM.

B.2.1 Waterstanden en stroomsnelheden

De samenhang van de gemeten waterstanden en stroomsnelheden met SPM zijn opgenomen in Tabel B-5. Hieruit volgt dat de gemeten troebelheid op locaties Blauwe Slenk (F1) en Boontjes noord (F3) over het algemeen hoger is bij laagwater. Vooral bij de ondieper gelegen locaties Boontjes noord (F3) en Kimstergat (F2) lijkt de stroomsnelheid een belangrijk proces, te zien aan de matige correlaties (respectievelijk $\rho=+0,40$ en $\rho=+0,41$). Bij de hoge concentraties tijdens stroming in vloedrichting op locaties Kimstergat (F2) en Boontjes zuid (F4) horen correlatiecoëfficiënten van respectievelijk 0,42 (matig) en 0,21 (zwak).

Tabel B-5: Lineaire correlatiecoëfficiënten (ρ) van waterstanden en stroomsnelheden met gemeten SPM op de verschillende meetpunten. Absolute waarden tussen 0,4 en 0,6 worden als matige correlaties aangeduid en tussen 0,2 en 0,4 als zwakke correlaties (dikgedrukt). Op locatie F4 is geen correlatiecoëfficiënt met de waterstand bepaald, omdat er sprongen in de gemeten waterstand zitten door het verschuiven van het frame.

Parameter	F1	F2	F3	F4
Waterstand [m]	-0,22	+0,09	-0,22	N/A
Snelheidsgrootte [m/s]	+0,15	+0,41	+0,40	+0,11
Stroomsnelheid in de richting van de geul [m/s]	0,00	+0,42	+0,12	+0,21

B.2.2 Wind en golven

Over de gehele meetperiode is er op locatie Boontjes noord ($\rho=+0,20$) sprake van een zwakke correlatie met de windsnelheid (d.w.z. de variatie in SPM bij Boontjes noord kan voor 20% worden verklaard door de windsnelheid). Voor locaties Blauwe Slenk en Kimstergat (beide $\rho=+0,11$) geldt dit in mindere mate. Op locatie Boontjes zuid ($\rho=+0,03$) lijkt er nauwelijks samenhang te bestaan. Dit kan te maken hebben met de lokale dynamiek en geometrie, maar ook de diepte waarop het frame geplaatst is kan hierbij een rol spelen (op ondieper gelegen frames is het effect van wind via golfwerking groter dan op dieper gelegen frames).

Voor de windrichting zijn correlatiecoëfficiënten met SPM relatief laag (Tabel B-6) en lijkt er nauwelijks samenhang te bestaan. Windrichting is echter geen parameter waarvan een lineaire verband met SPM te verwachten valt (specifieke richtingen spelen meer of minder een rol, er is geen eenduidige toe- of afname met toenemende 'windrichting').

De lokale golfhoogte lijkt met name op locatie Boontjes noord ($\rho=+0,17$, zie Tabel B-6) een belangrijke rol te spelen voor de sedimentconcentratie. Op locatie Kimstergat ($\rho=+0,11$) zorgt de lokale waterdiepte (groter dan bij F3) vermoedelijk voor een te grote uitdemping van het ADV-druksignaal om een betrouwbaar meetsignaal te krijgen voor de golfanalyse (zie toelichting in Sectie 4.1). Kleine golven (golfhoogte onder 0,5 m) worden daar nauwelijks gedetecteerd. Op de nog dieper gelegen meetframes in de Blauwe Slenk en bij Boontjes zuid is de golfdata zeker niet betrouwbaar en daarom buiten beschouwing gelaten.

Tabel B-6: Lineaire correlatiecoëfficiënten (ρ) van wind- en golfparameters met SPM op de verschillende meetpunten. Absolute waarden tussen 0,4 en 0,6 worden als matige correlaties aangeduid en tussen 0,2 en 0,4 als zwakke correlaties (dikgedrukt). Golfhoogte voor F1 en F4 zijn buiten beschouwing gelaten vanwege de beperkte betrouwbaarheid van deze data afkomstig uit het ruwe druksignaal op grotere waterdieptes.

Parameter	F1	F2	F3	F4
Windsnelheid	+0,11	+0,11	+0,20	+0,03
Windrichting	-0,00	-0,11	+0,12	+0,01
Significante golfhoogte	niet beschikbaar	+0,11	+0,17	niet beschikbaar

B.2.3 Stratificatie en gravitatiecirculatie

Voor het zoutgehalte is er alleen op locatie Boontjes noord ($\rho= -0,26$) sprake van een zwakke correlatie met SPM over de gehele meetperiode (d.w.z. de variatie in SPM bij Boontjes noord hangt voor 26% samen met het zoutgehalte), zie Tabel B-7. Daarbij moet opgemerkt worden dat getijstroming een onderliggende oorzaak kan zijn van variaties in zowel zoutgehalte als SPM (oftewel geen causaal verband tussen zoutgehalte en SPM). Ook uit Figuur 6-7 blijkt de negatieve correlatie, aangezien hogere SPM-waarden worden gemeten bij lagere zoutgehalten op meetlocatie Boontjes noord (zie de toenemende mediane SPM-waarden voor afnemende zoutgehalten).

De samenhang van het zoutgehalte met sedimenttransport en SPM wordt geïllustreerd met scatterplots en boxplots per meetlocatie in Bijlage E. Deze samenhang geldt in mindere mate ook voor het Kimstergat ($\rho = -0,13$), wat met name zichtbaar is in de boxplot voor zoutgehalte t.o.v. sedimenttransport (Figuur E-8). Op basis van de correlatiecoëfficiënten lijkt er nauwelijks samenhang te bestaan tussen zoutgehalte en SPM bij meetlocaties Blauwe Slenk ($\rho = -0,03$) en Boontjes zuid ($\rho = -0,04$). Toch lijkt in de boxplots (Figuur E-7 en Figuur E-10) een negatief verband zichtbaar, d.w.z. hogere SPM-waardes voor lagere zoutgehaltes. Daarnaast is duidelijk zichtbaar dat de zoutgehaltes bij Boontjes zuid over het algemeen lager zijn.

De lagere gemeten zoutgehaltes bij Boontjes zuid lijken logisch vanwege de nabijgelegen zoetwaterspui bij Kornwerderzand. Toch is de correlatiecoëfficiënt tussen het spuidebiet bij Kornwerderzand en de gemeten SPM-waardes op deze locatie met $\rho = -0,03$ het kleinst van alle meetlocaties (er is geen lineair verband), zie ook Figuur E-14.

Op locatie Boontjes noord is de correlatiecoëfficiënt met het spuidebiet iets hoger, maar nog altijd laag ($\rho = +0,15$). Sedimentconcentraties nemen wel licht toe voor grotere spuidebieten (Figuur E-13), maar er is geen overduidelijk effect zichtbaar van de spuidebieten op de richting van het sedimenttransport (d.m.v. gravitatiecirculatie). Voor de correlatie tussen het spuidebiet bij Kornwerderzand en SPM speelt een mogelijke onderliggende oorzaak: stormopzet kan mogelijk voor beide parameters een rol spelen, aangezien het spuien onder vrij verval plaatsvindt (dus niet mogelijk is bij te hoge stormopzet) en tijdens stormen ook veel sediment wordt opgewoeld van de bodem.

Tabel B-7: Correlatiecoëfficiënten van zoutgehalte en spuidebiet met SPM op de verschillende meetpunten. Absolute waarden tussen 0,4 en 0,6 worden als matige correlaties aangeduid en tussen 0,2 en 0,4 als zwakke correlaties (dikgedrukt).

Parameter	F1	F2	F3	F4
Zoutgehalte	-0,03	-0,13	-0,26	-0,04
Spuidebiet Kornwerderzand	+0,27	+0,12	+0,15	-0,03

B.2.4 Bevindingen

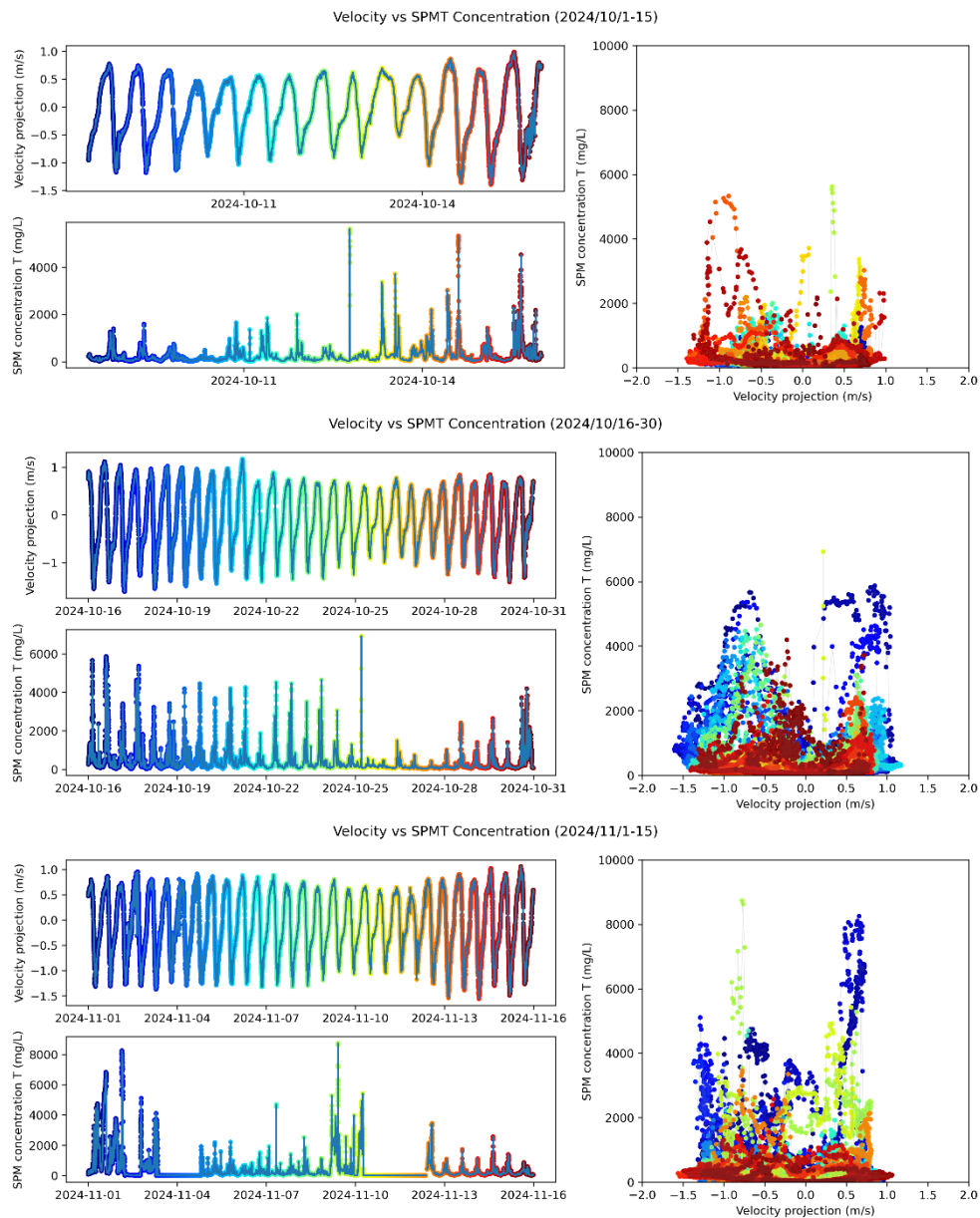
Uit de analyse van lineaire correlatiecoëfficiënten voor het verband tussen SPM en diverse andere parameters zijn geen sterke correlaties naar voren gekomen, maar slechts enkele matige correlaties en verder vooral zwakke of zeer zwakke correlaties. De hoogste correlatiecoëfficiënten werden gevonden voor de stroomsnelheid in het Kimstergat (+0,41) en bij meetlocatie Boontjes noord (+0,40).

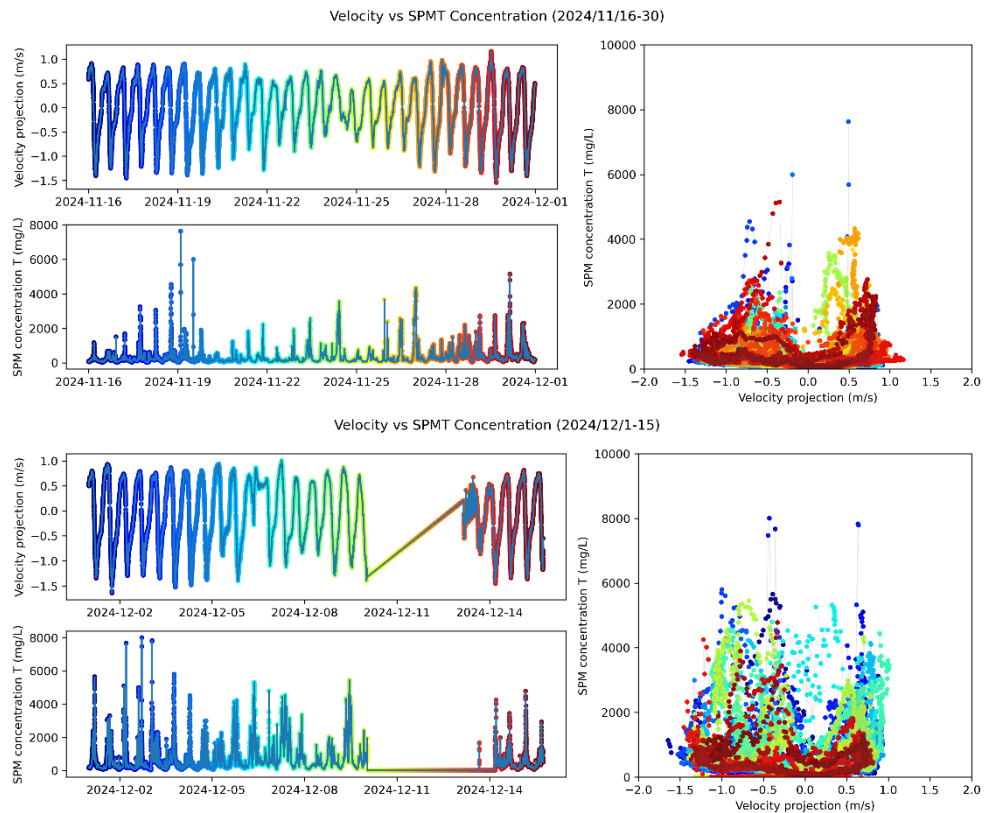
Er is dus geen duidelijke bepalende factor met een sterke correlatie uit deze analyse naar voren gekomen, al komen wel verschillen naar voren in de invloed van verschillende parameters/processen tussen de verschillende stations (zoals het belang van golven op ondiep gelegen stations, van zoutgehalte op meetlocatie Boontjes noord en van het spuidebiet bij Kornwerderzand voor meetlocatie Blauwe Slenk). Hierbij moet rekening worden gehouden met het verschil tussen correlaties en causaliteit en met de beperkte betekenis van een lineaire correlatiecoëfficiënt voor niet-lineaire processen. Een uitgebreidere statistische analyse zou nuttig zijn om niet-lineaire verbanden en vertraging in oorzaak-gevolg relaties in meer detail te bestuderen.

C Aanvullende resultaten stroomsnelheid

C.1 Samenhang stroomsnelheid en SPM

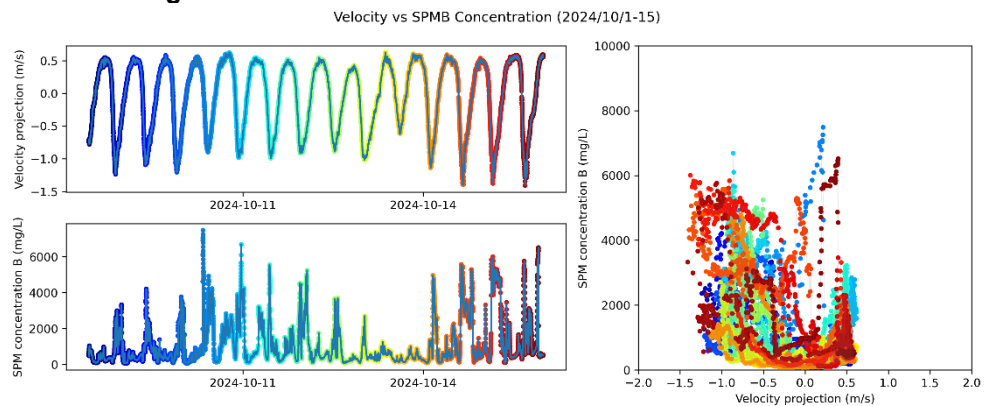
F1 – Blauwe Slenk

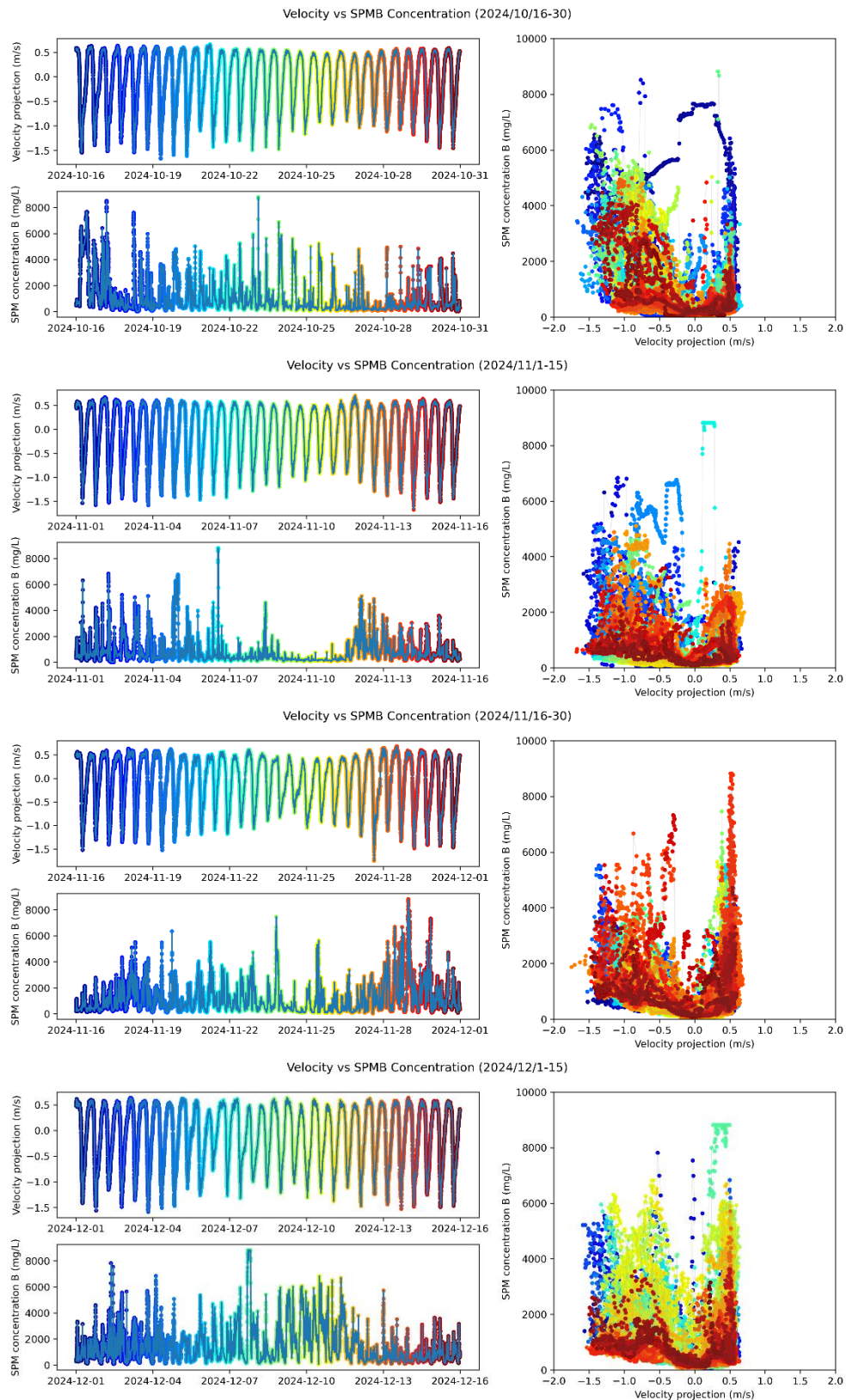




Figuur C-1: Samenhang tussen stroomsnelheid en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Blauwe Slenk (F1) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links tijdreeksen van stroomsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatterplot tussen stroomsnelheid en SPM. Ebsnelheden zijn negatief.

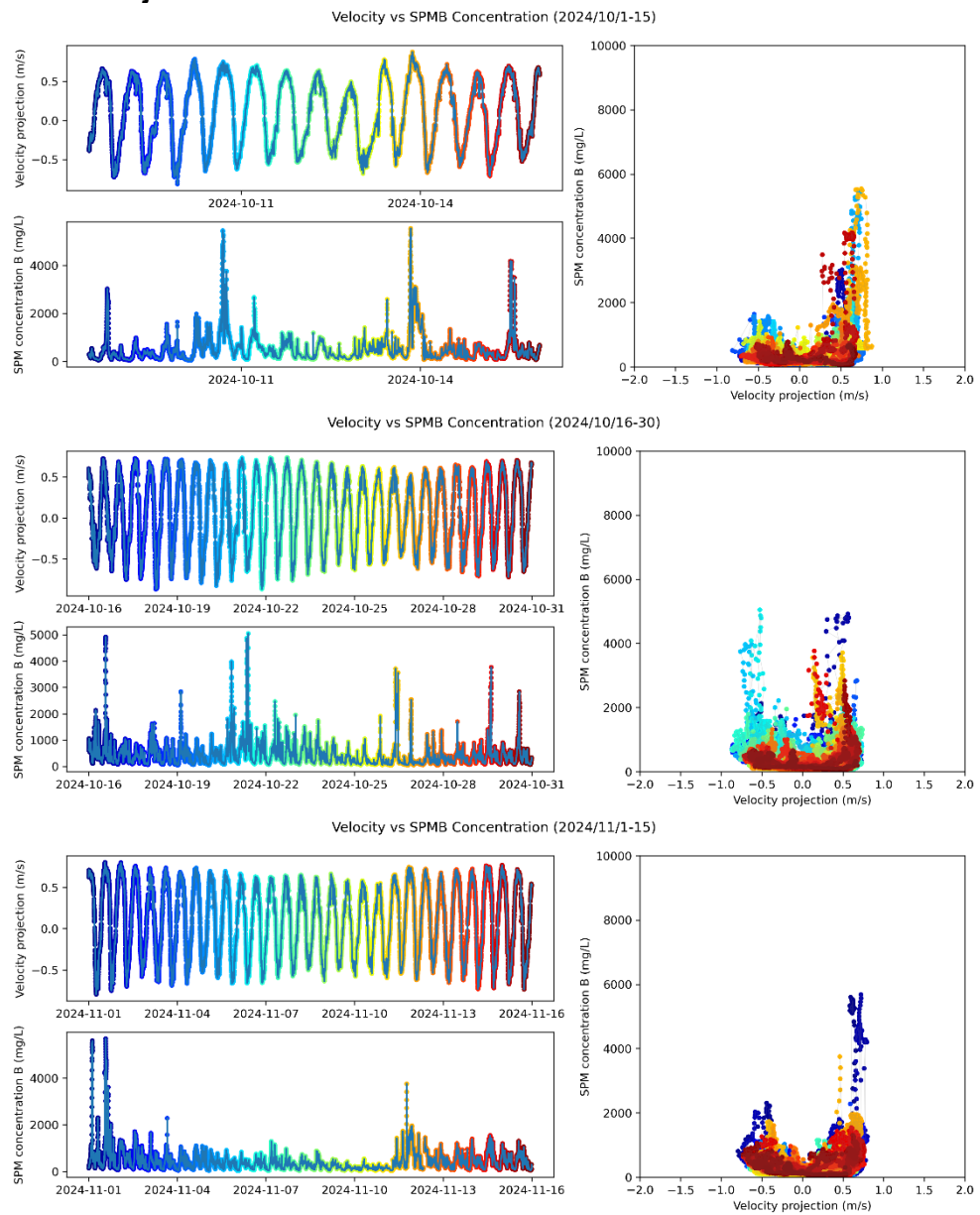
F2 – Kimstergat

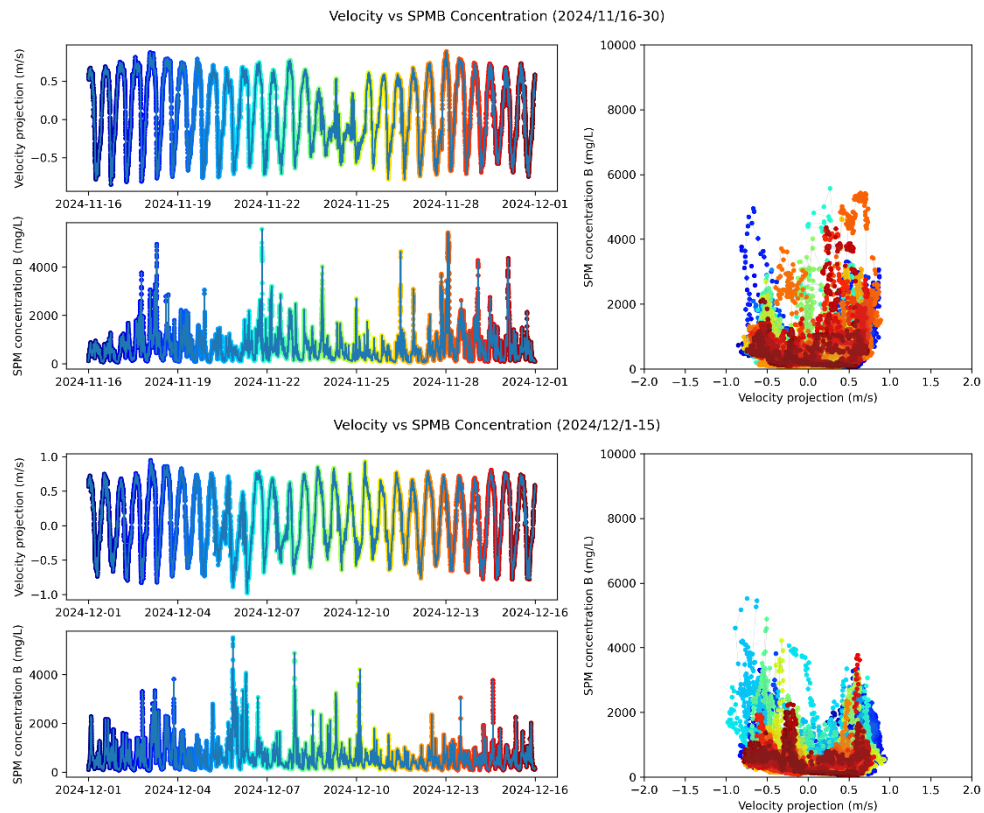




Figuur C-2: Samenhang tussen stroomsnelheid en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Kimstergat (F2) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links tijdreeksen van stroomsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen stroomsnelheid en SPM. Ebsnelheden zijn negatief.

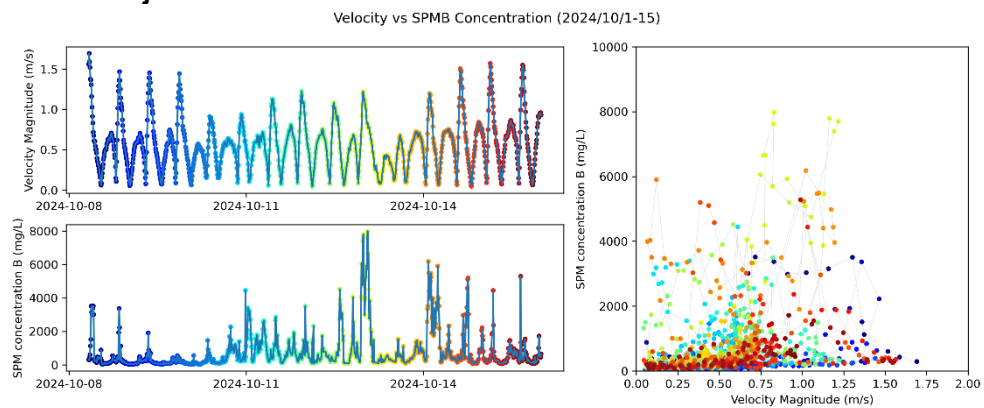
F3 – Boontjes noord

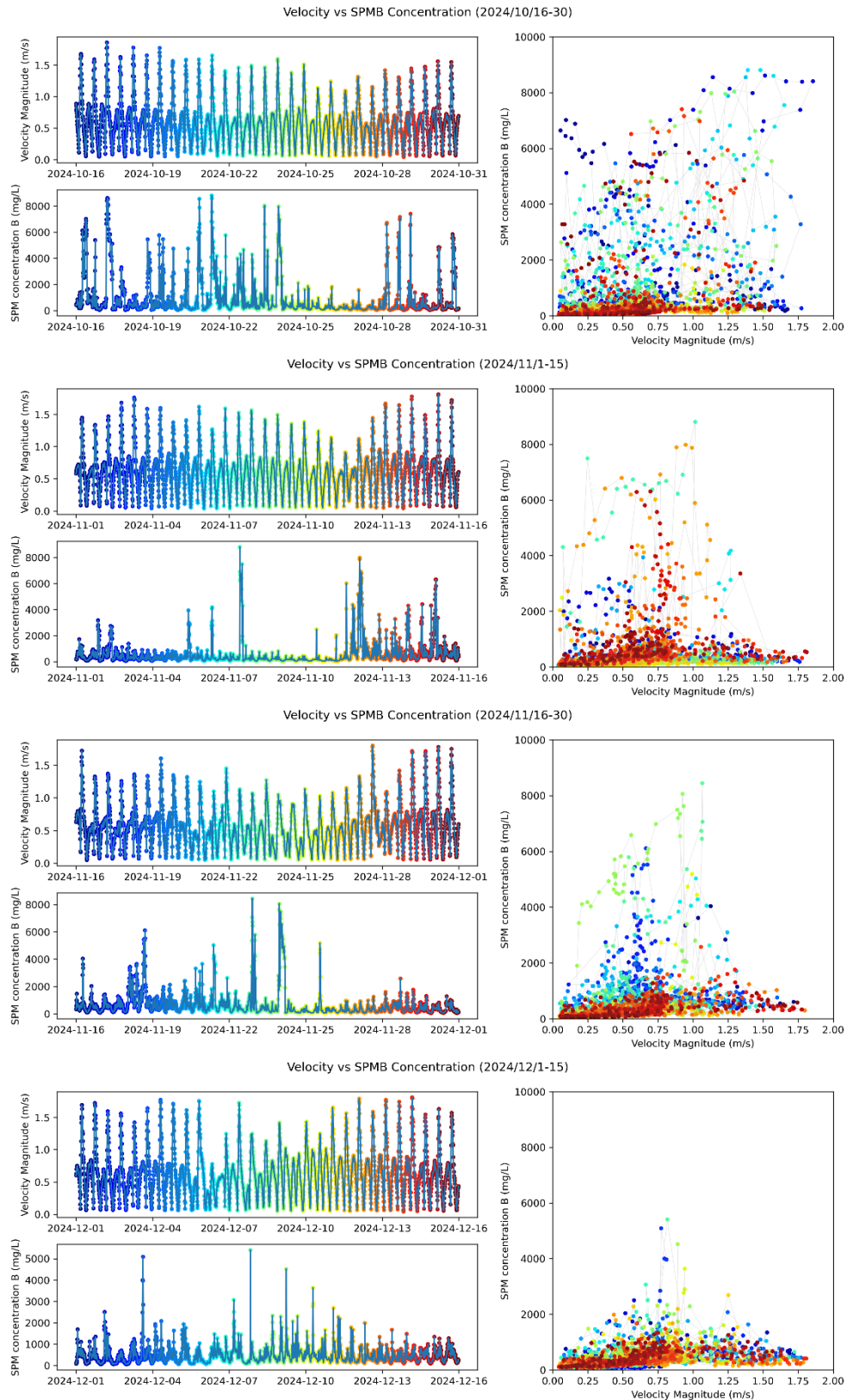




Figuur C-3: Samenhang tussen stroomsnelheid en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Boontjes noord (F3) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links tijdreeksen van stroomsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatterplot tussen stroomsnelheid en SPM. Ebsnelheden zijn negatief.

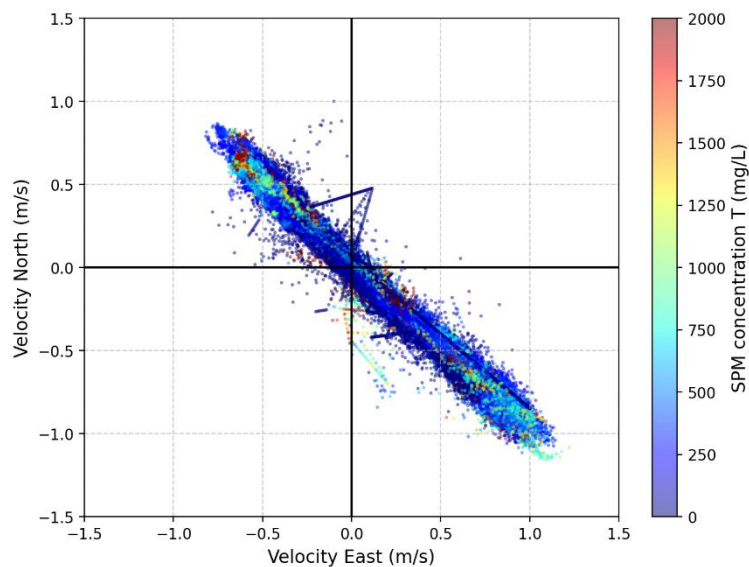
F4 – Boontjes zuid



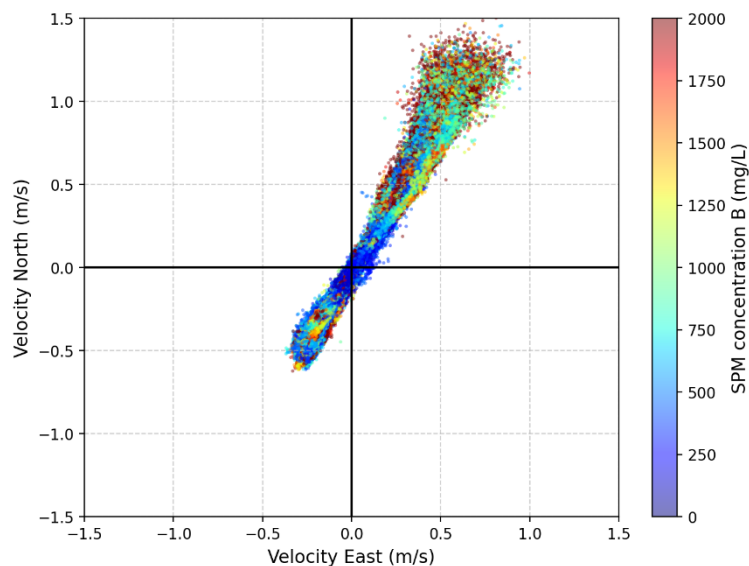


Figuur C-4: Samenhang tussen stroomsnelheid en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Boontjes zuid (F4) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links de tijdreeksen van stroomsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatterplot tussen stroomsnelheid en SPM. Ebsnelheden zijn negatief.

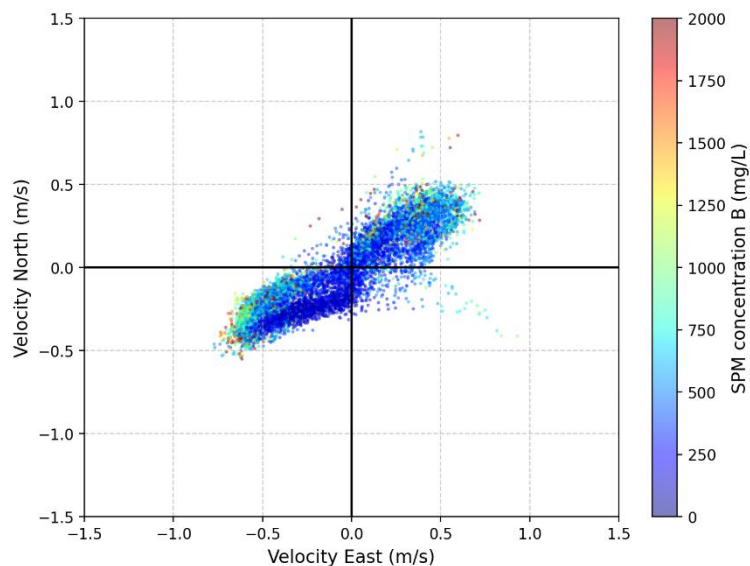
C.2 Stroomsnelheid en SPM



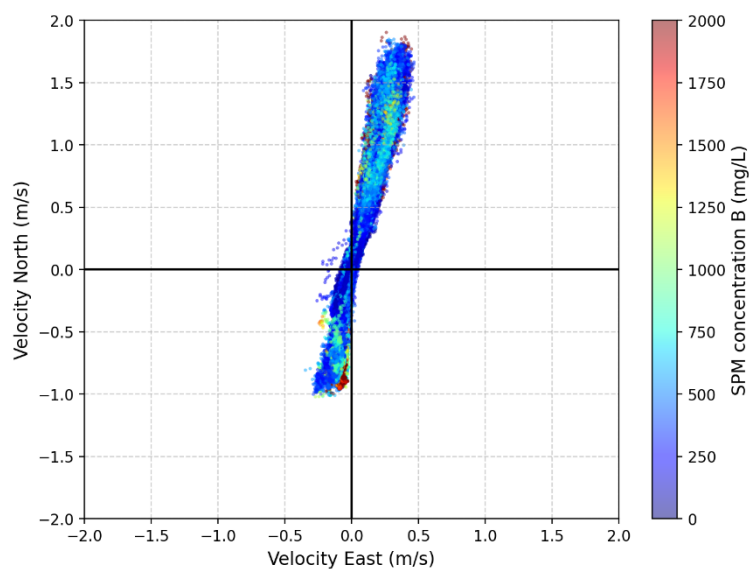
Figuur C-5: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op meetlocatie Blauwe Slenk (F1) tijdens de gehele meetperiode. De kleur toont de gemeten SPM-waardes.



Figuur C-6: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op meetlocatie Kimstergat (F2) tijdens de gehele meetperiode. De kleur toont de gemeten SPM-waardes.



Figuur Apx C-7: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op meetlocatie Boontjes noord (F3) tijdens de gehele meetperiode. De kleur toont de gemeten SPM-waardes.

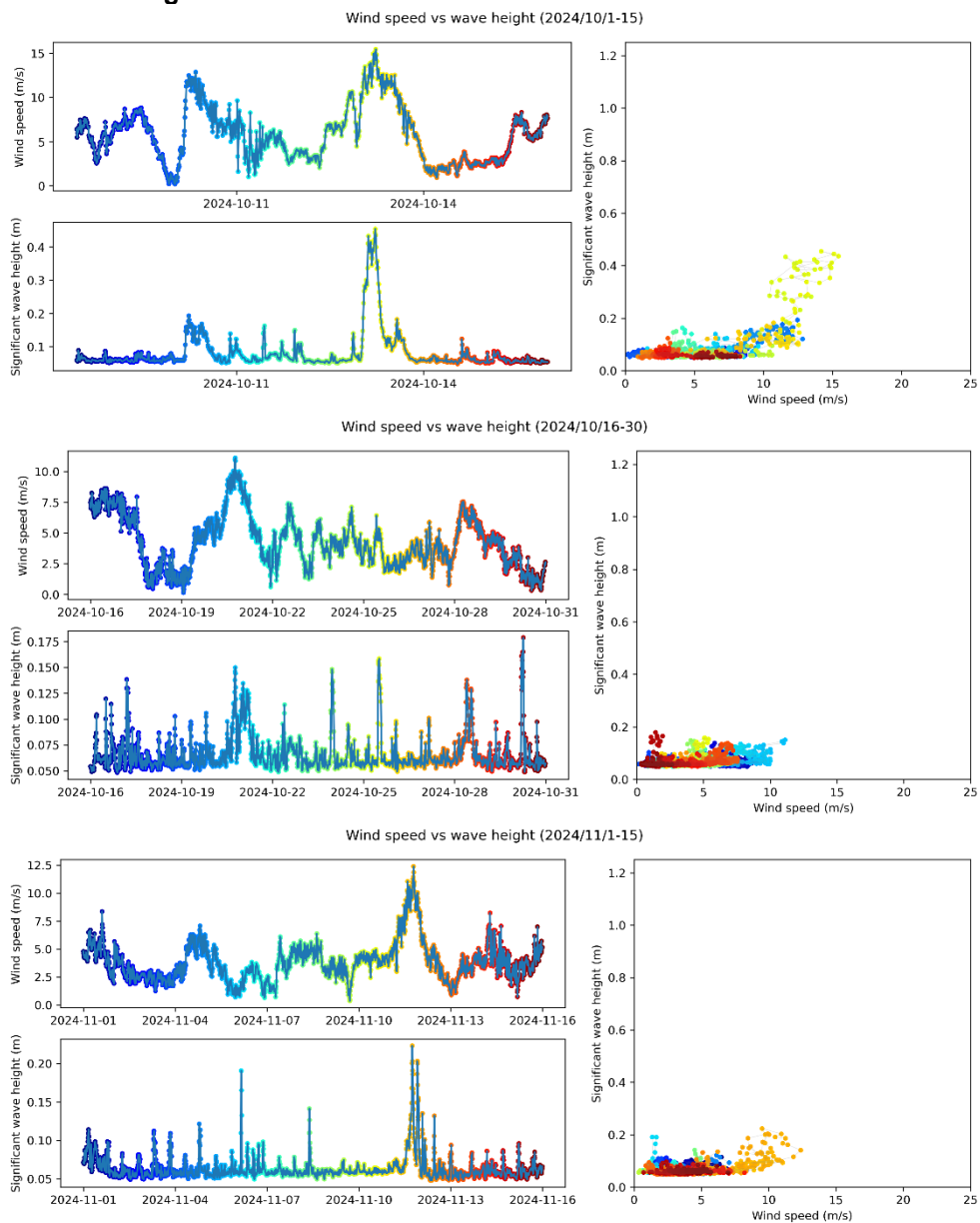


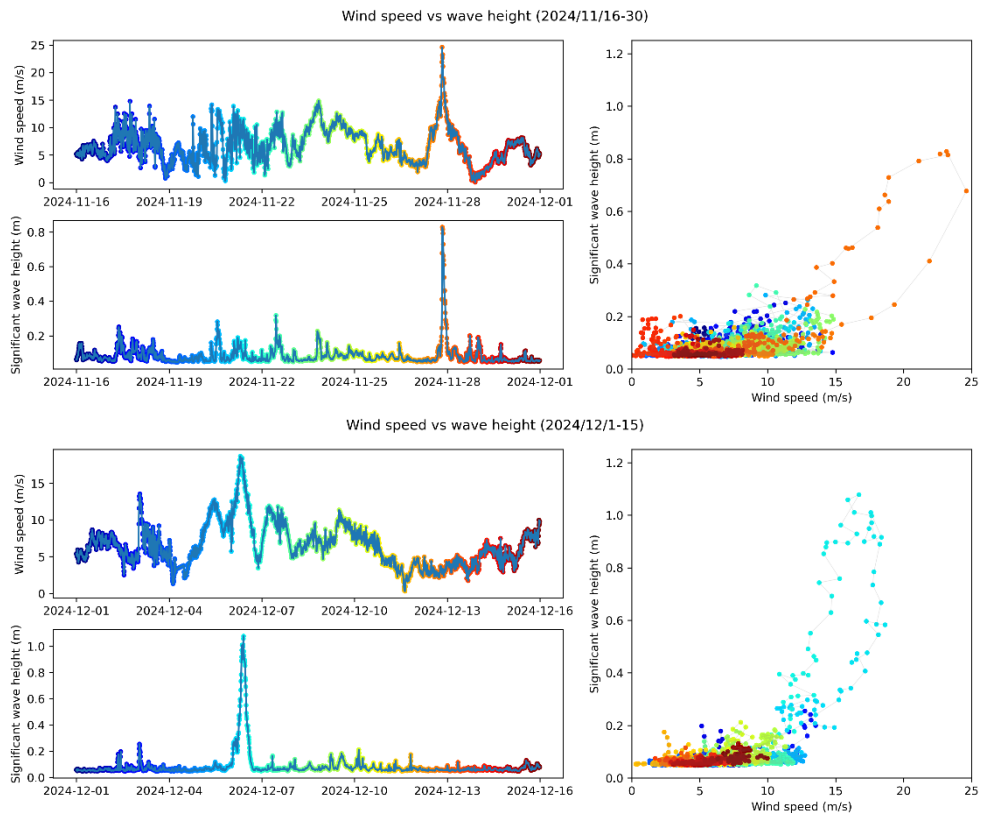
Figuur C-8: Grootte en oriëntatie (d.w.z., stroomrichting) van de gemeten snelheidsvectoren op meetlocatie Boontjes zuid (F4) tijdens de gehele meetperiode. De kleur toont de gemeten SPM-waardes.

D Aanvullende resultaten wind en golven

D.1 Samenhang windsnelheid en golfhoogte

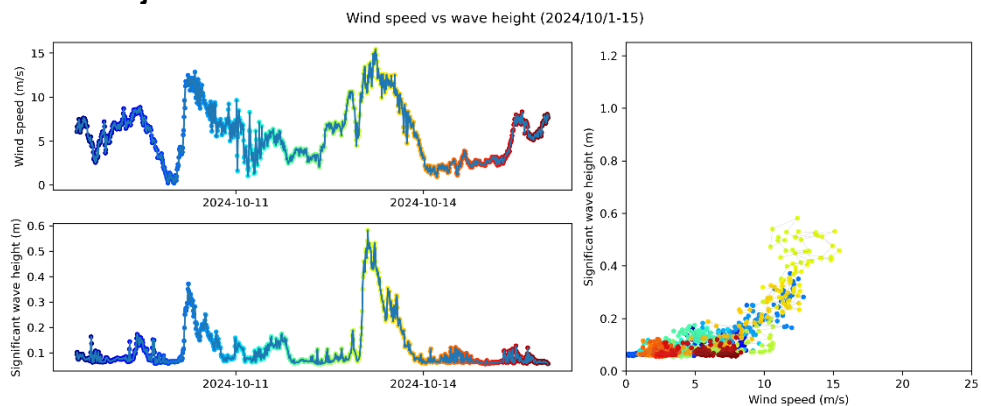
F2 – Kimstergat

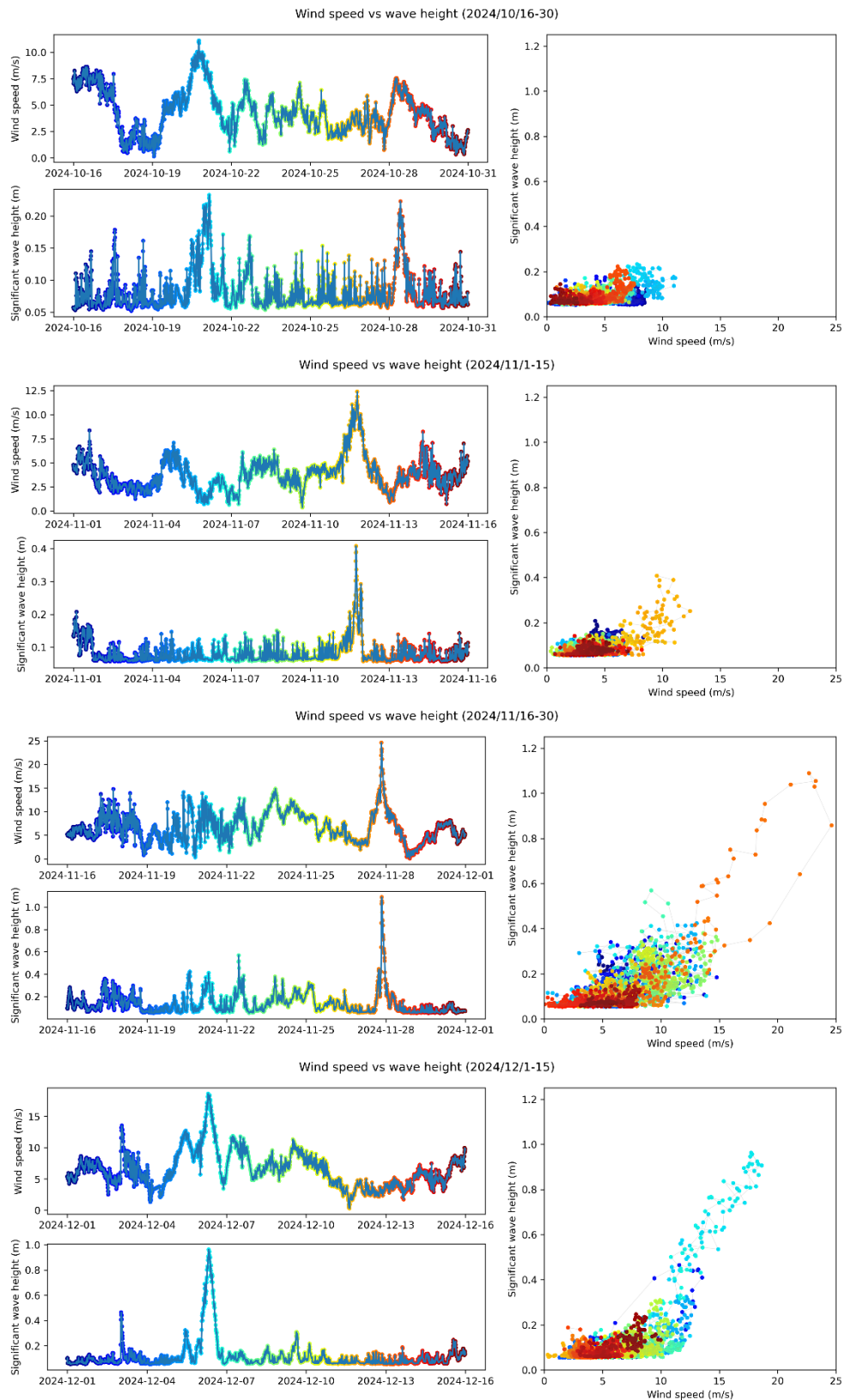




Figuur D-1: Samenhang tussen windsnelheid en golven bij meetlocatie Kimstergat (F2) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 oktober, 16-31 oktober, 1-15 november, 16-30 november en 1-15 december). Per figuur zijn links de tijdreeksen van windsnelheid (linksboven) en golfhoogte (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen windsnelheid en golfhoogte.

F3 – Boontjes noord

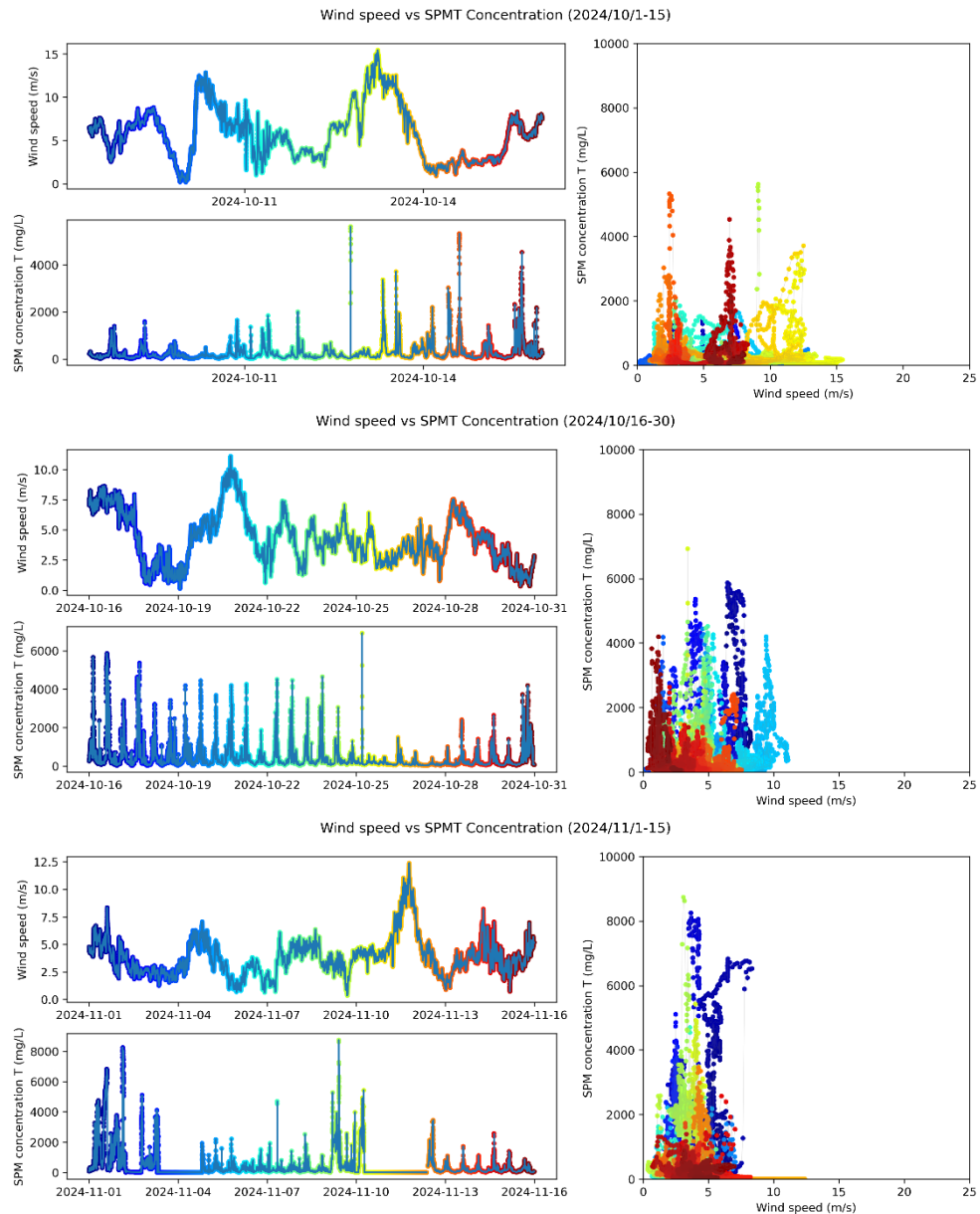


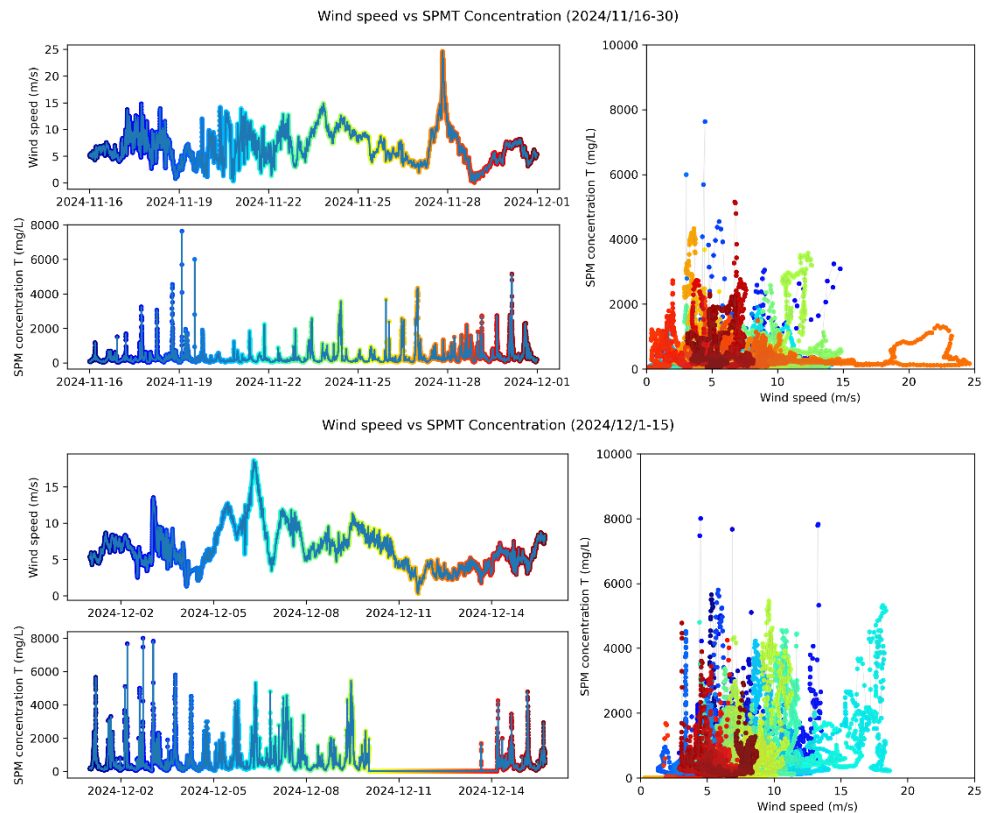


Figuur D-2: Samenhang tussen windsnelheid en golven bij meetlocatie Boontjes noord (F3 voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 oktober, 16-31 oktober, 1-15 november, 16-30 november en 1-15 december). Per figuur zijn links de tijdreeksen van windsnelheid (linksboven) en golfhogte (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen windsnelheid en golfhogte.

D.2 Samenhang wind en SPM

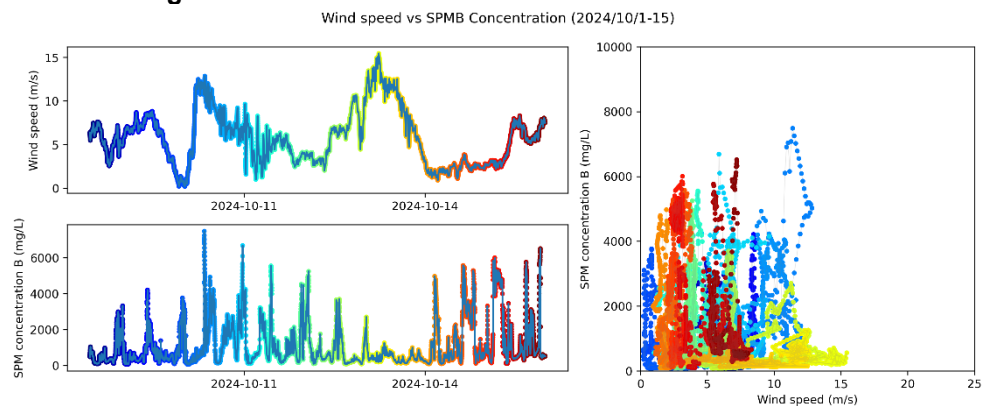
F1 – Blauwe Slenk

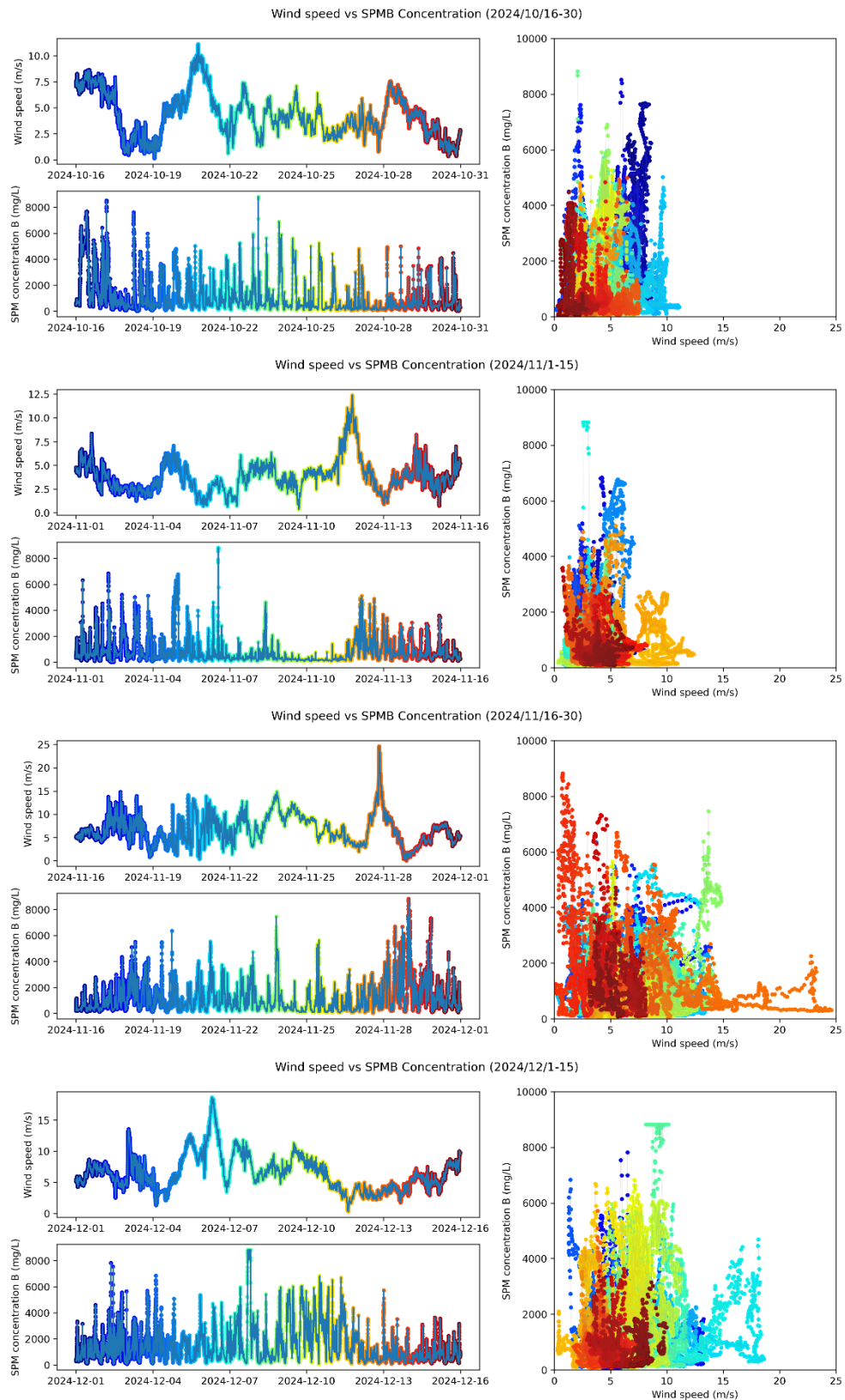




Figuur D-3: Samenhang tussen windsnelheid en SPM bij de bovenste OBS bij meetlocatie Blauwe Slenk (F1) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links tijdreeksen van windsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen windsnelheid en SPM.

F2 – Kimstergat

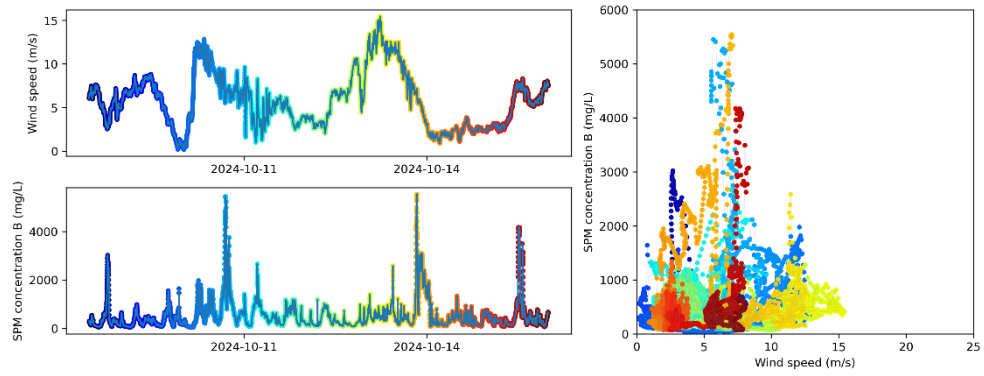




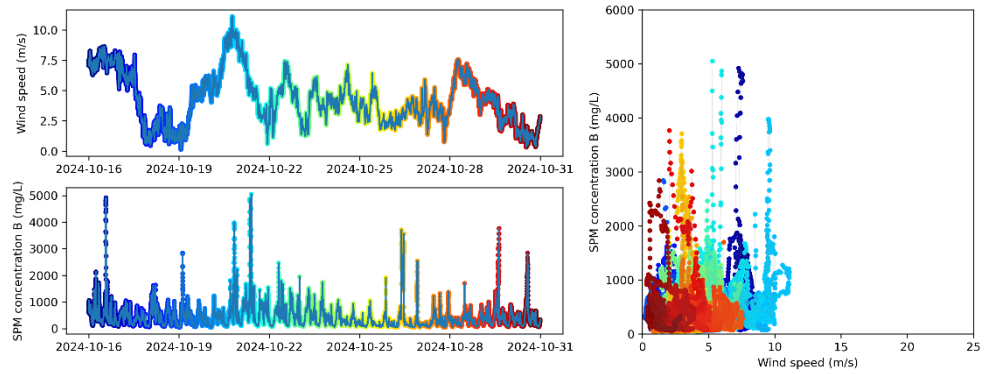
Figuur D-4: Samenhang tussen windsnelheid en SPM nabij de bodembij meetlocatie Kimstergat (F2) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links tijdreeksen van windsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen windsnelheid en SPM.

F3 – Boontjes noord

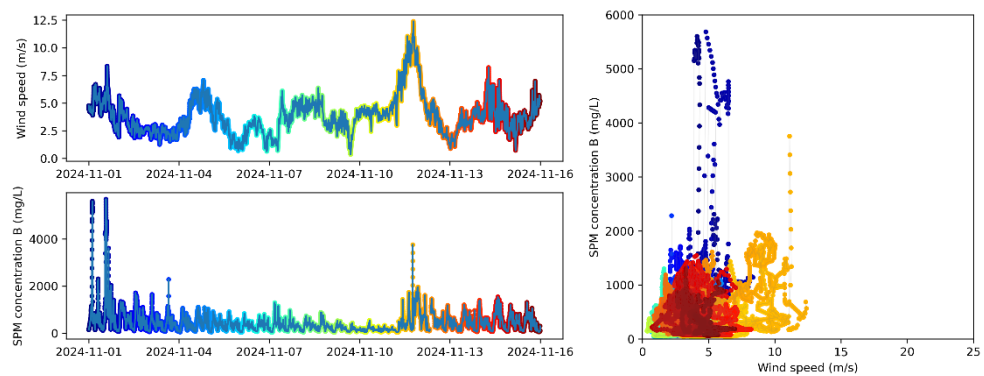
Wind speed vs SPMB Concentration (2024/10/1-15)

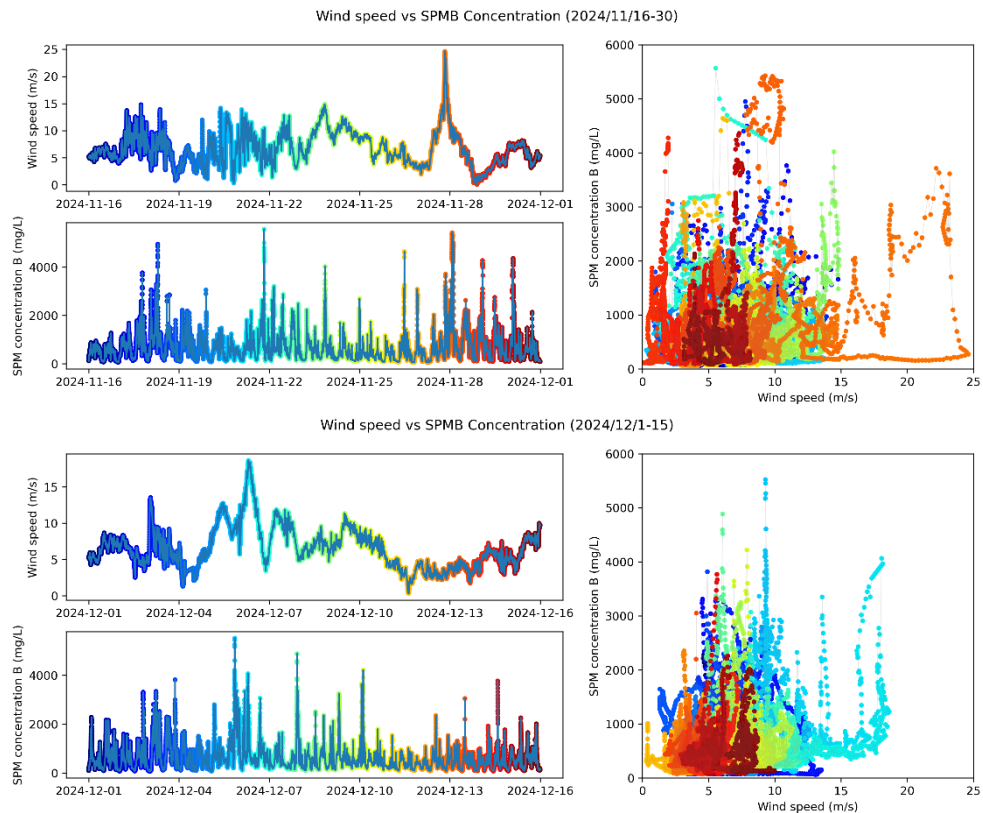


Wind speed vs SPMB Concentration (2024/10/16-30)



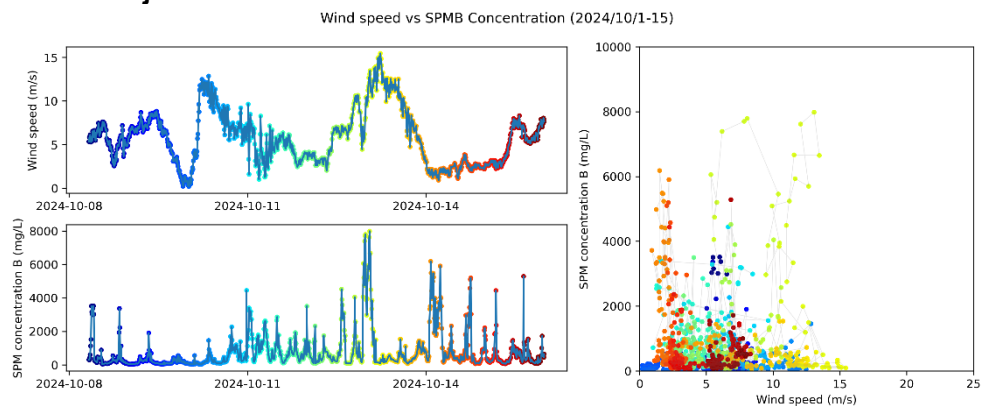
Wind speed vs SPMB Concentration (2024/11/1-15)

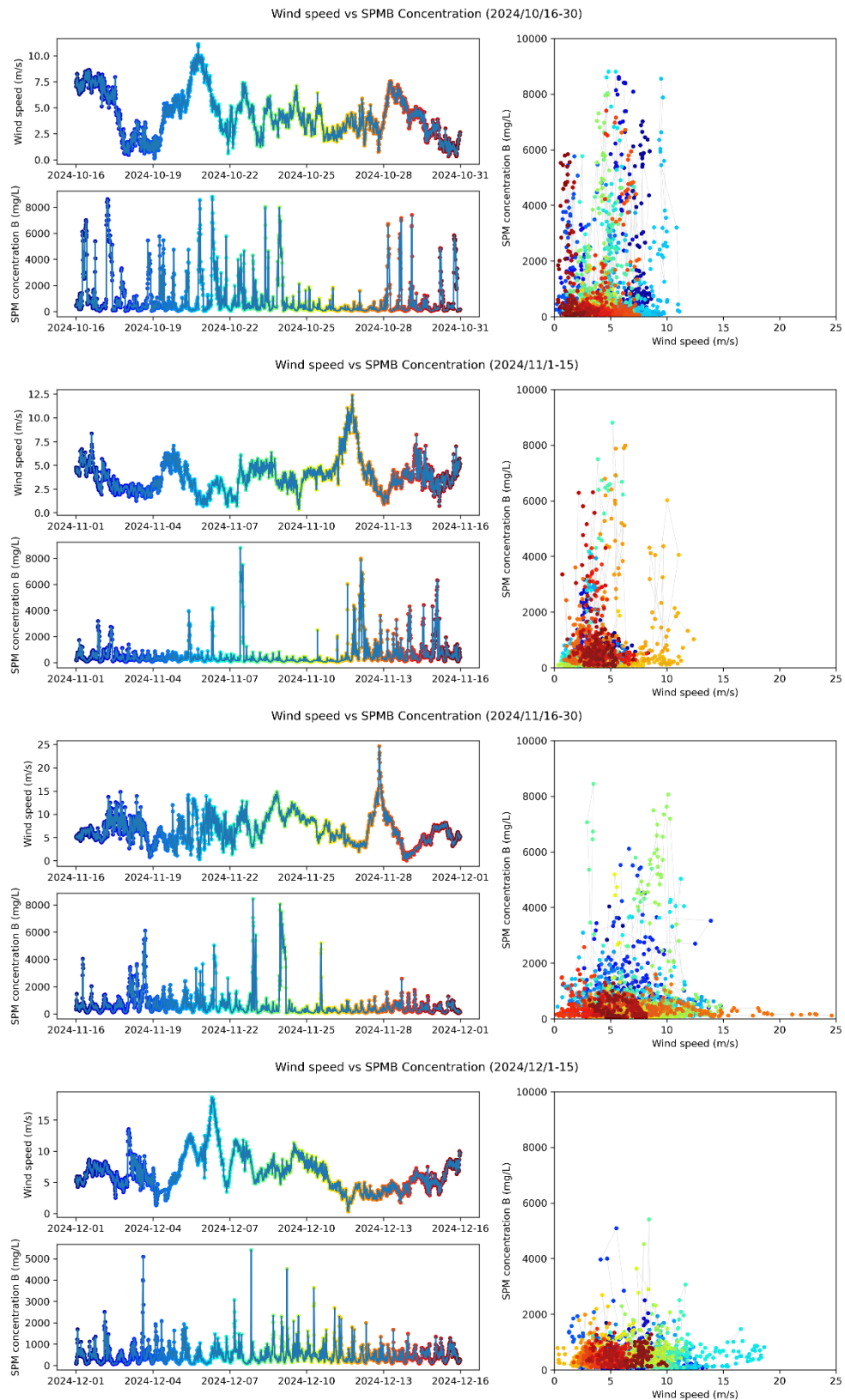




Figuur D-5: Samenhang tussen windsnelheid en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Boontjes noord (F3) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links tijdreeksen van windsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen windsnelheid en SPM.

F4 – Boontjes zuid

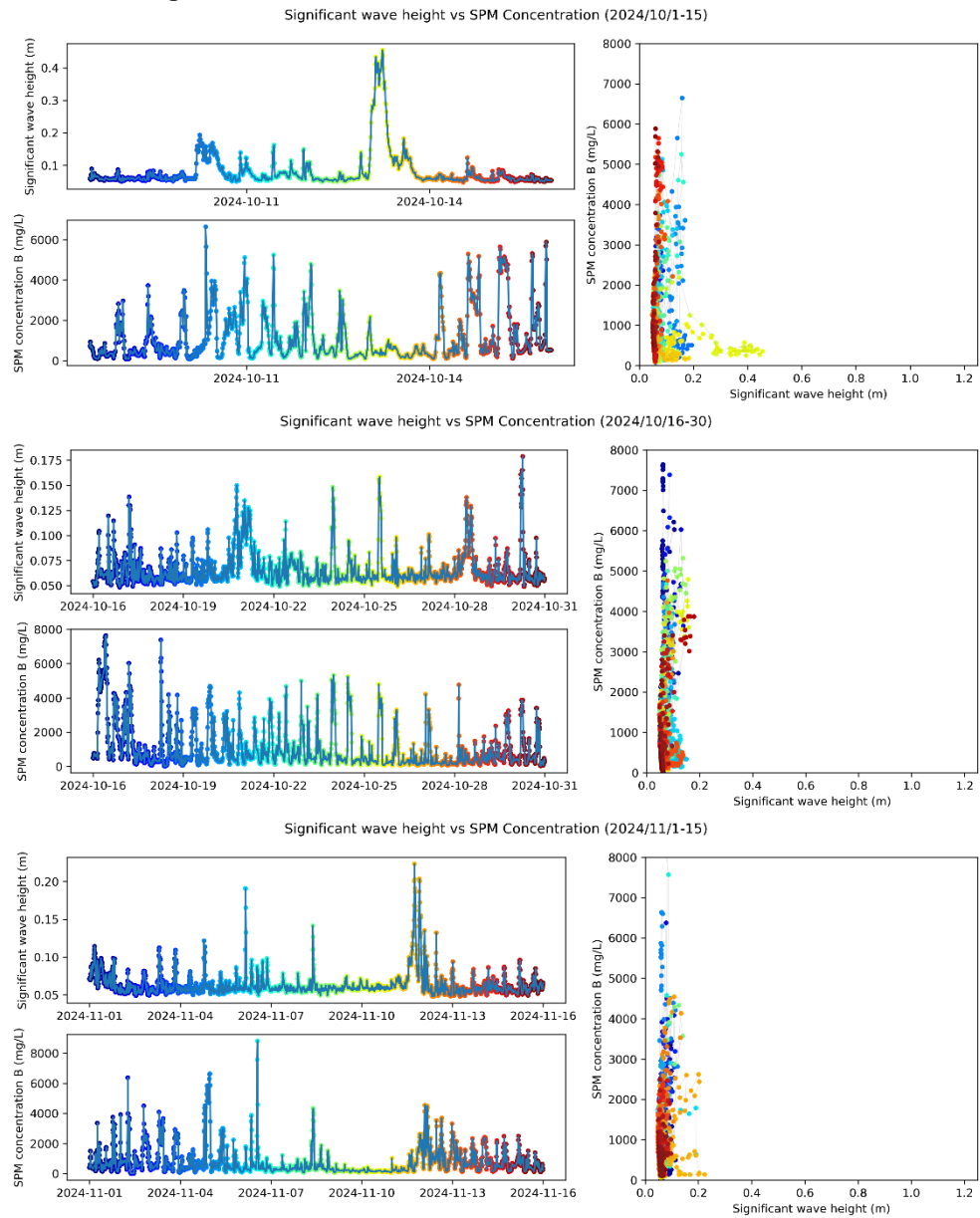


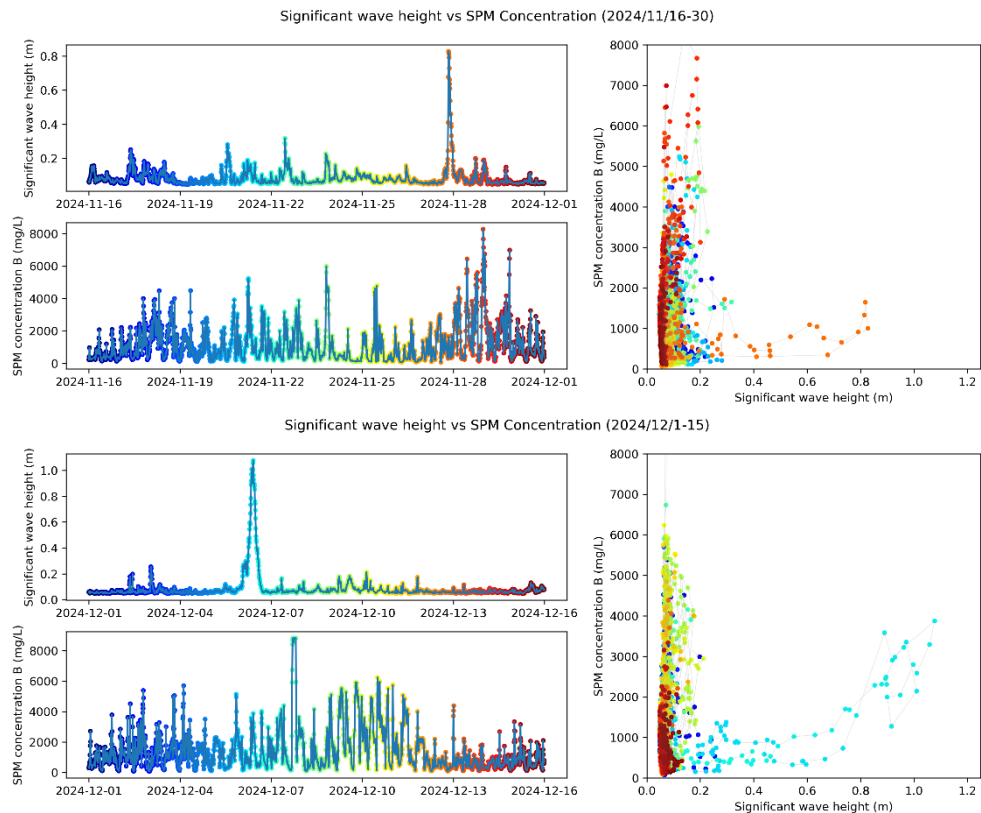


Figuur D-6: Samenhang tussen windsnelheid en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Boontjes zuid (F4) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links de tijdreeksen van windsnelheid (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen windsnelheid en SPM.

D.3 Samenhang golven en SPM

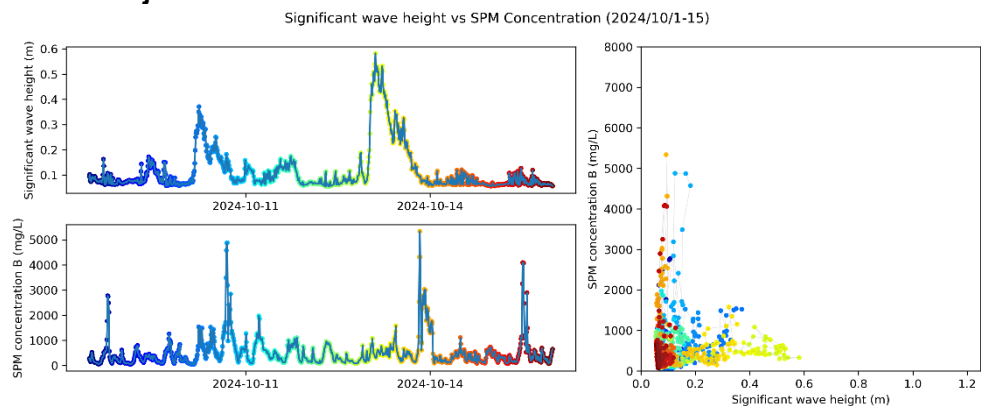
F2 – Kimstergat

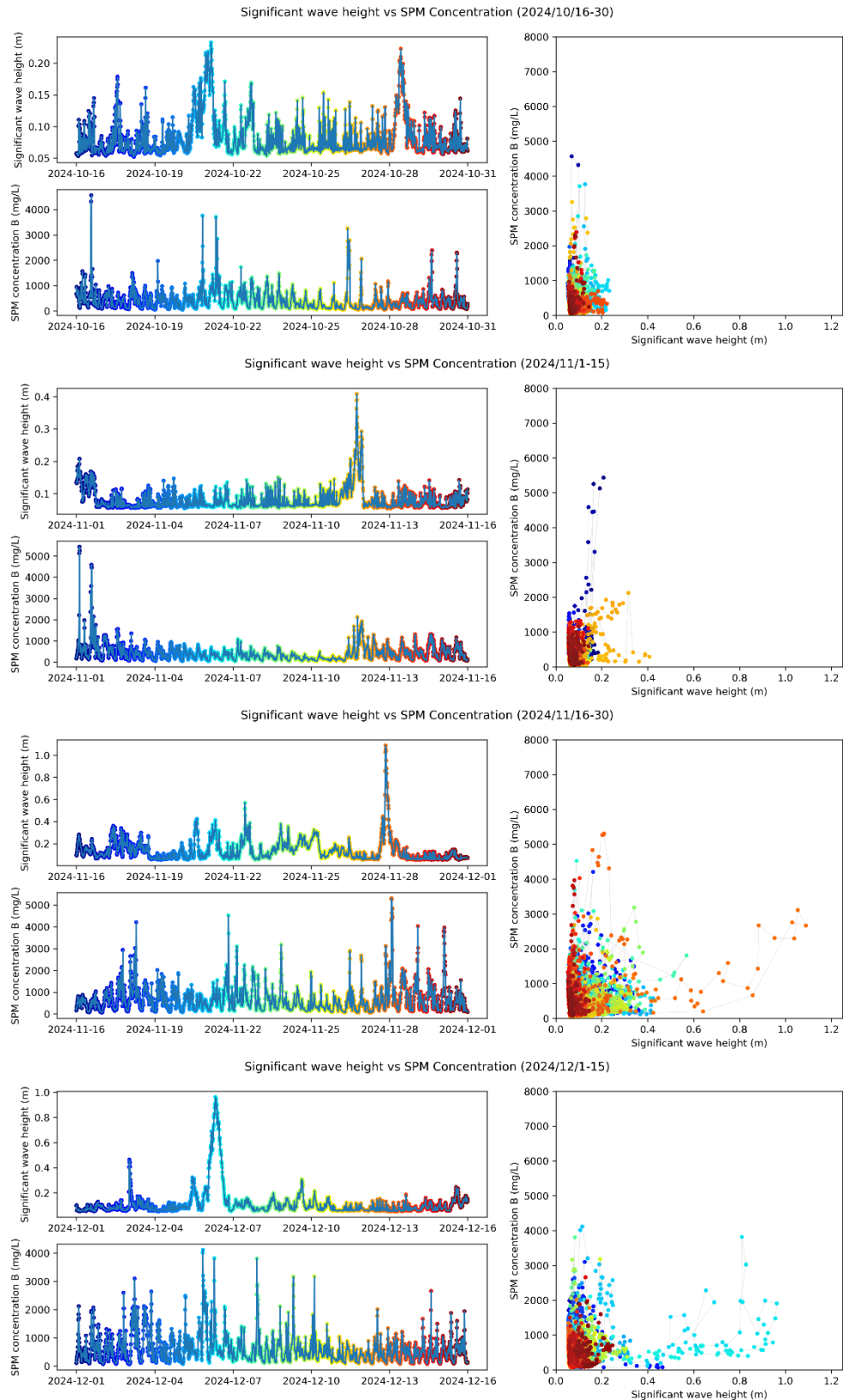




Figuur D-7: Samenhang tussen golven en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Kimstergat (F2) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links de tijdreeksen van golfhoogte (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen golfhoogte en SPM.

F3 – Boontjes noord

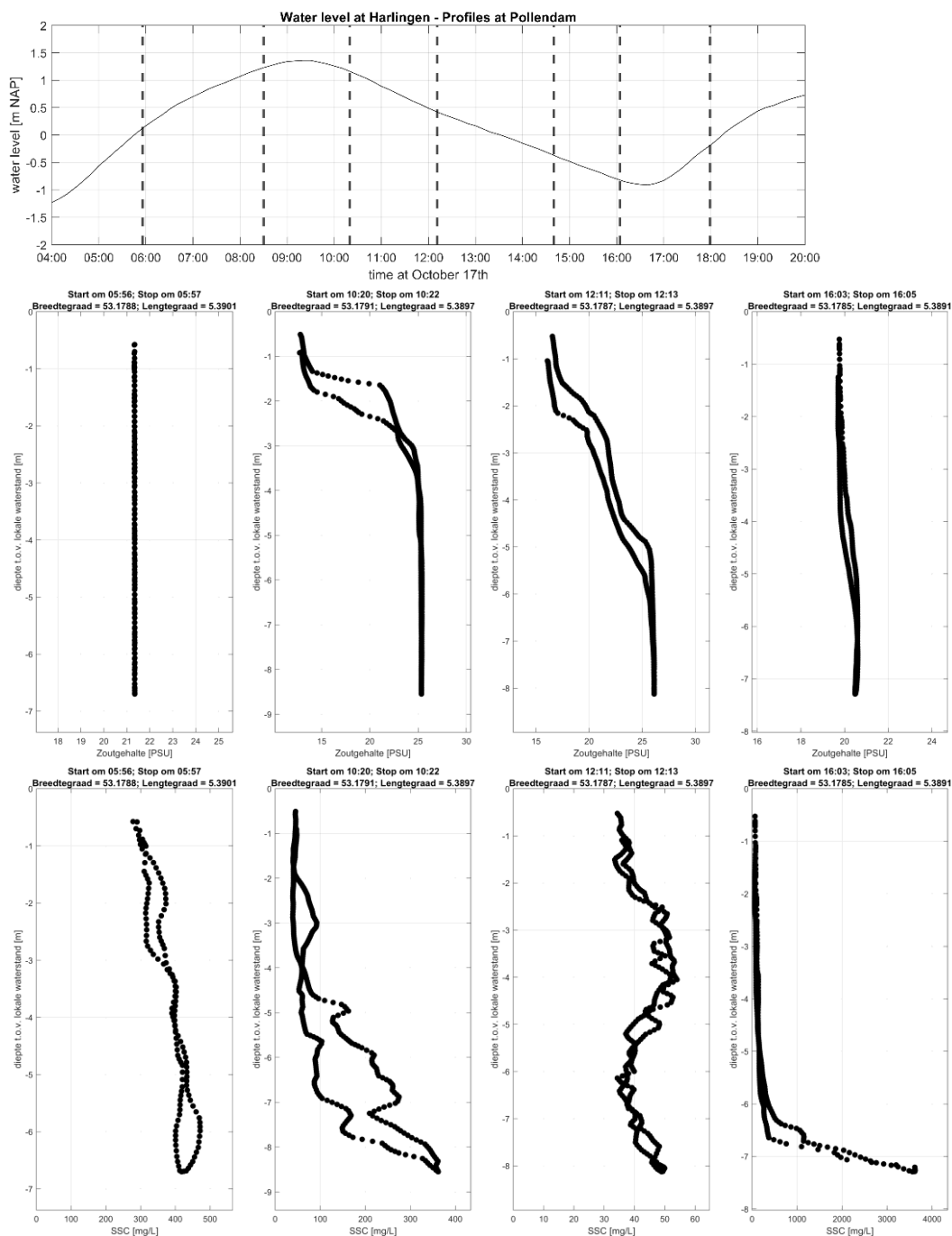




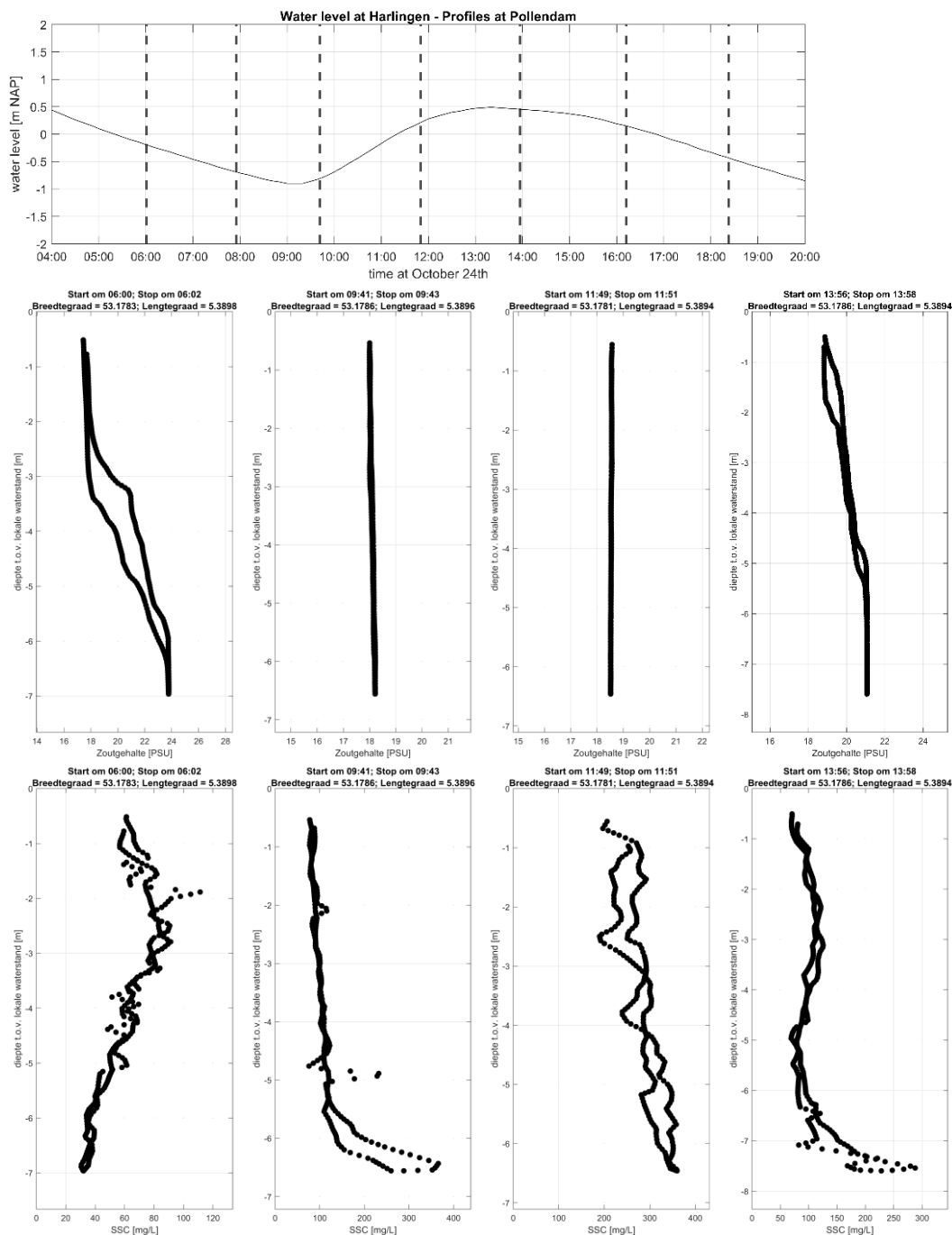
Figuur D-8: Samenhang tussen golven en SPM nabij de bodem bij meetlocatie Boontjes noord (F3) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links de tijdreeksen van golfhoogte (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen golfhoogte en SPM.

E Aanvullende resultaten stratificatie en gravitatiecirculatie

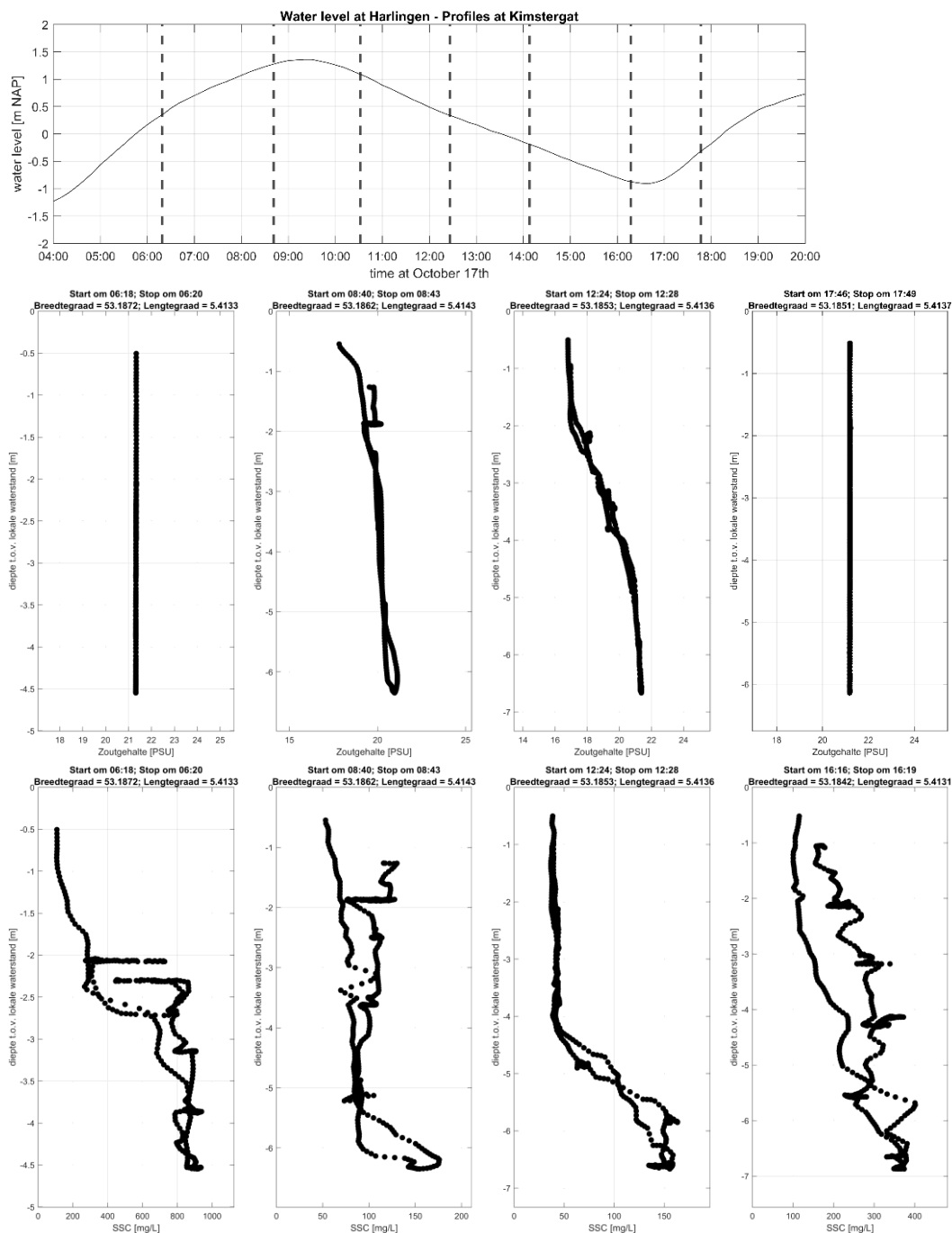
E.1 Verticale profielen zoutgehalte en SPM



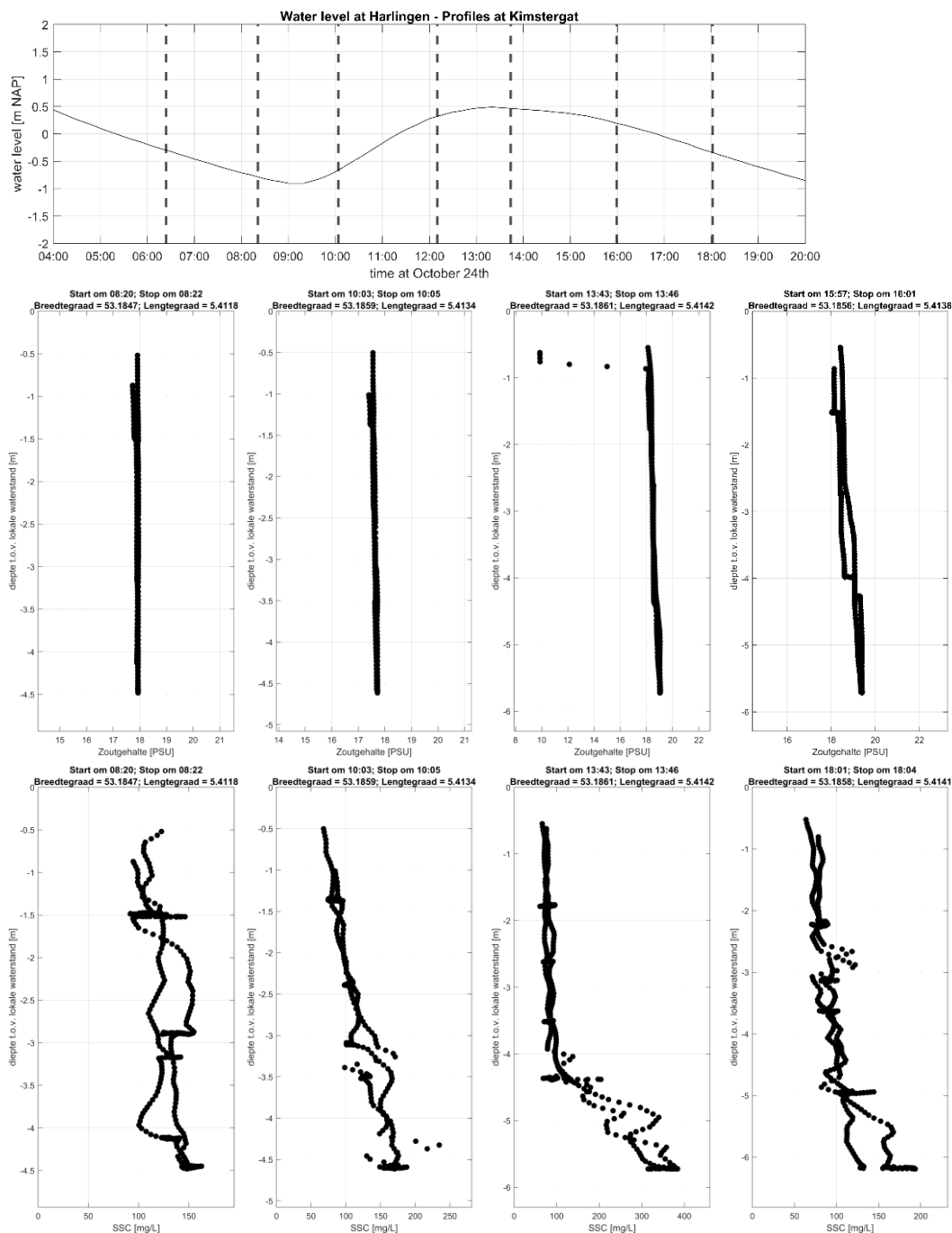
Figuur E-1: Bovenste paneel: tijdreeks waterstand Harlingen met tijdstippen profielen (stippellijnen). Daaronder zoutprofielen (middelste panelen) en sedimentconcentratie (onderste panelen) over de waterdiepte in de Geul langs Pollendam op 17 okt. om 5:56, 10:20, 12:11 en 16:03 uur.



Figuur E-2: Bovenste paneel: tijdreeks waterstand Harlingen met tijdstippen profielen (stippellijnen). Daaronder zoutprofielen (middelste panelen) en sedimentconcentratie (onderste panelen) over de waterdiepte in de Geul langs Pollendam op 24 okt. om 6:00, 9:40, 11:49 en 13:56 uur.

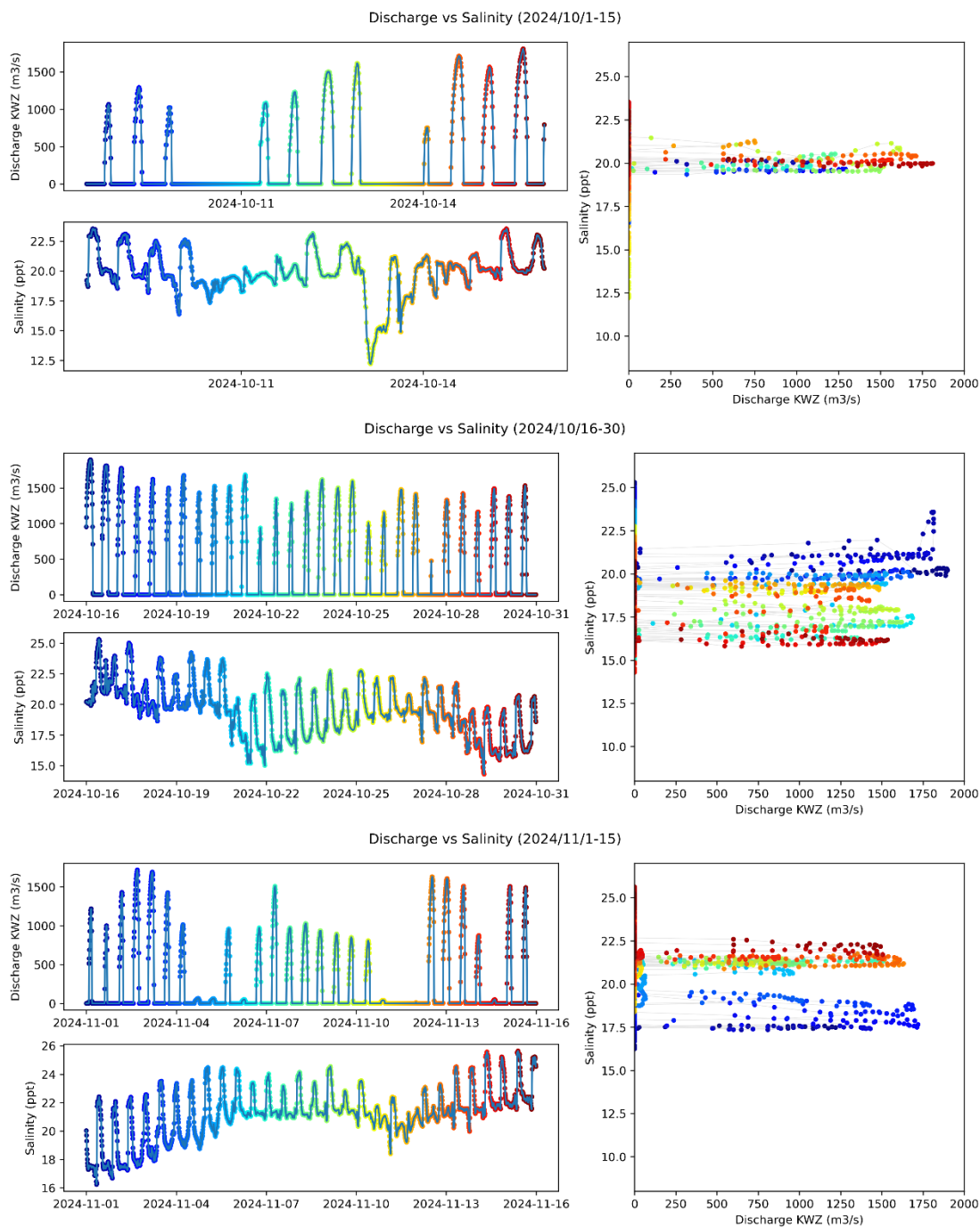


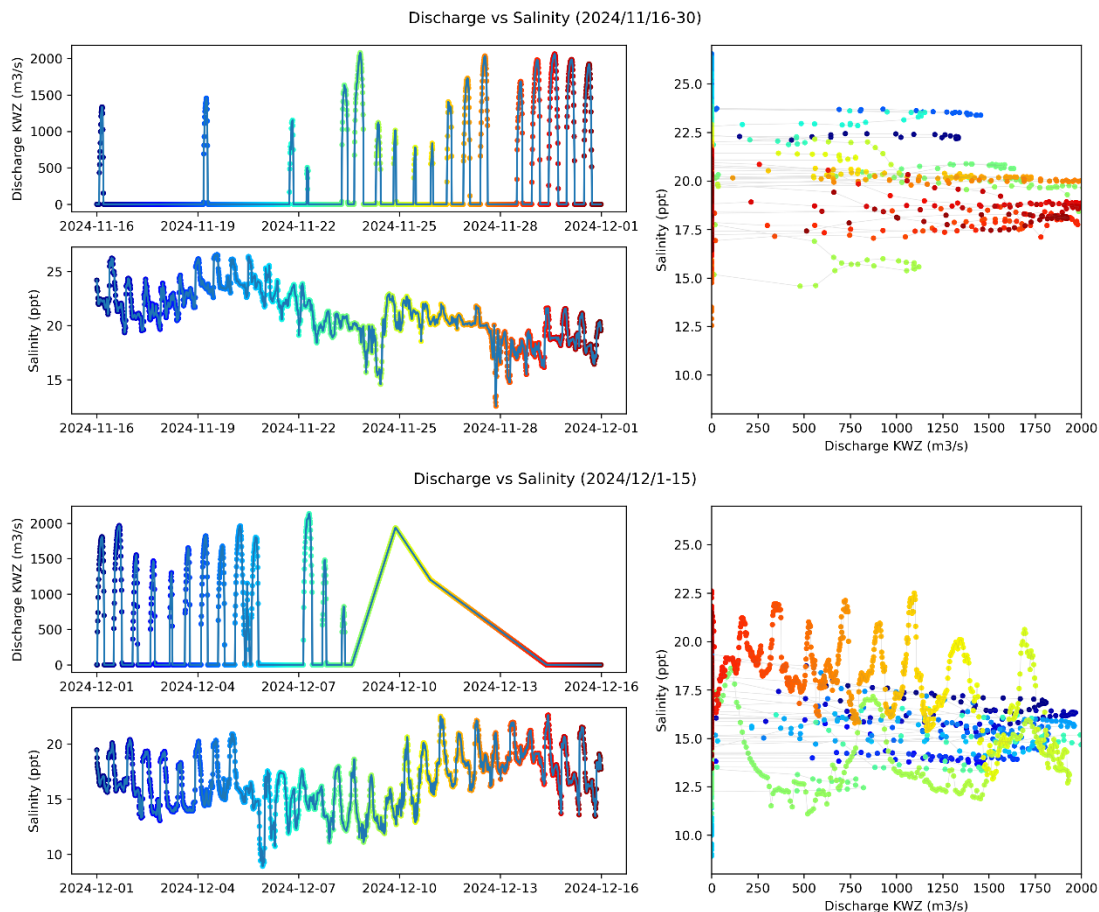
Figuur E-3: Bovenste paneel: tijdreeks waterstand Harlingen met tijdstippen profielen (stippellijnen). Daaronder zoutprofielen (middelste panelen) en sedimentconcentratie (onderste panelen) over de waterdiepte in het Kimstergat op 17 okt. om (v.l.n.r.) 6:18, 8:40, 12:24 en 16:16 uur.



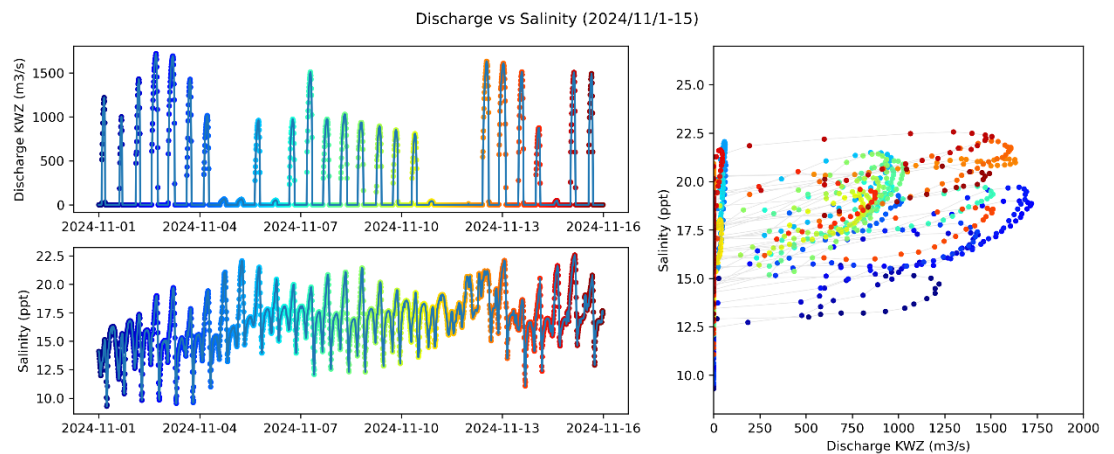
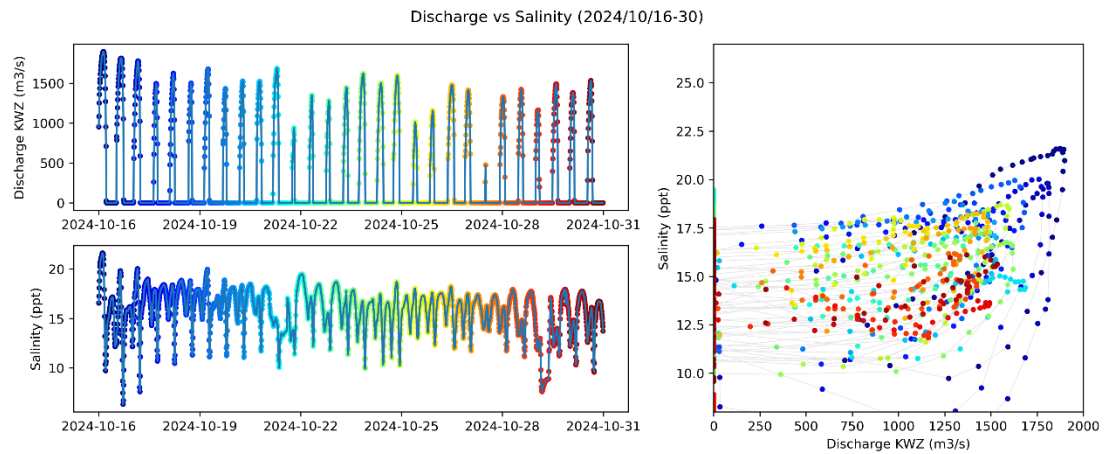
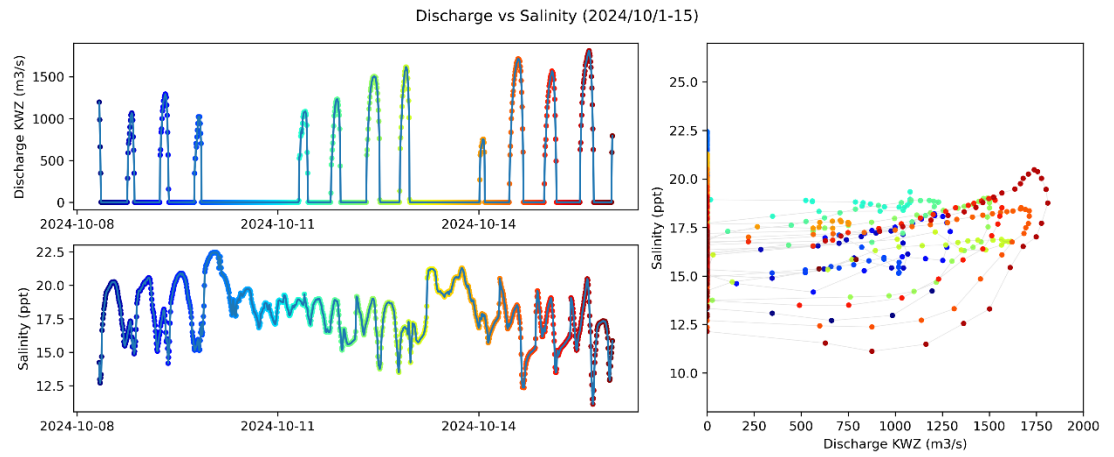
Figuur E-4: Bovenste paneel: tijdreeks waterstand Harlingen met tijdstippen profielen (stippellijnen). Daaronder zoutprofielen (middelste panelen) en sedimentconcentratie (onderste panelen) over de waterdiepte in het Kimstergat op 24 okt. om 8:20, 10:03, 13:43 en 15:57 uur.

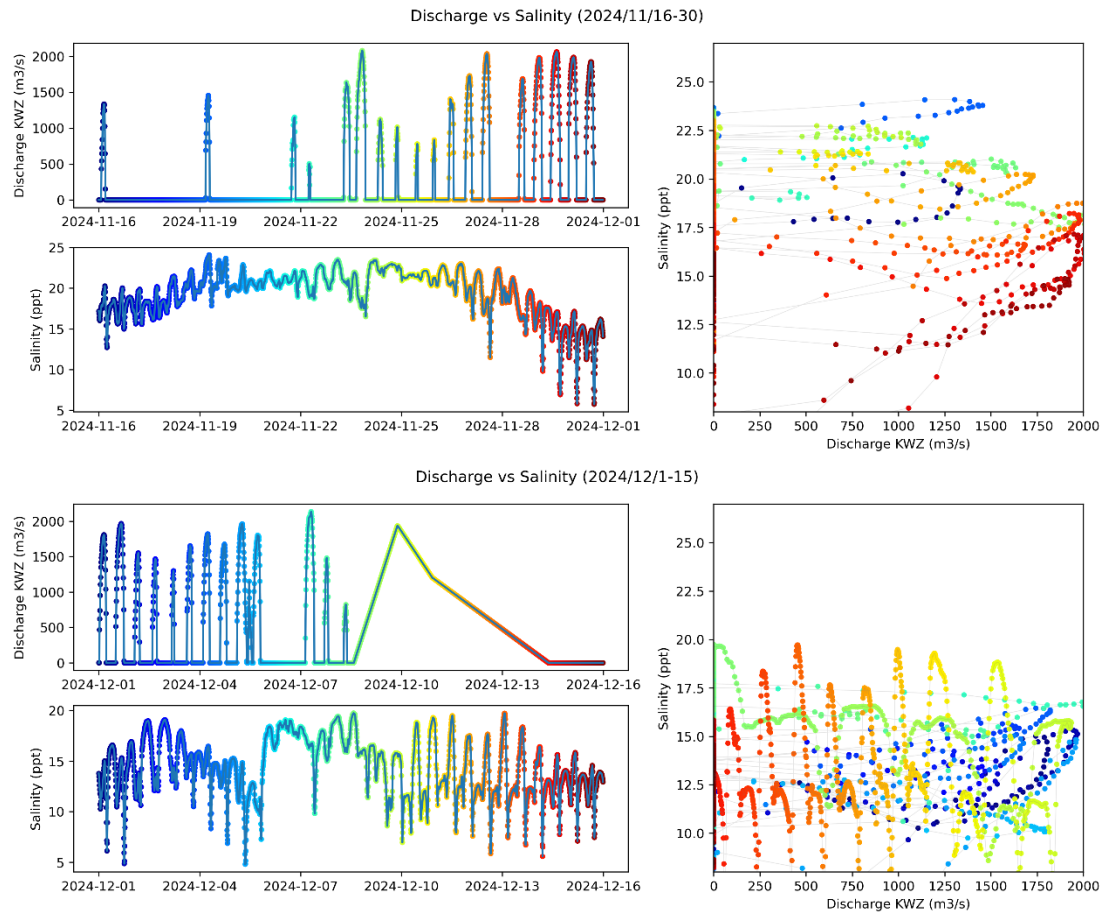
E.2 Samenhang zoutgehalte en spuidebiet Kornwerderzand





Figuur E-5 Samenhang van spuidebiet Kornwerderzand met gemeten zoutgehalte op meetlocatie Boontjes noord (F3) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links de tijdreeksen van golfhoogte (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen golfhoogte en SPM. Merk op dat het spuidebiet in het onderste figuur een fout lijkt te bevatten met lineair verloop van spuidebiet over een periode van een week, waardoor ook de scatter plot onrealistische samenhang weergeeft.

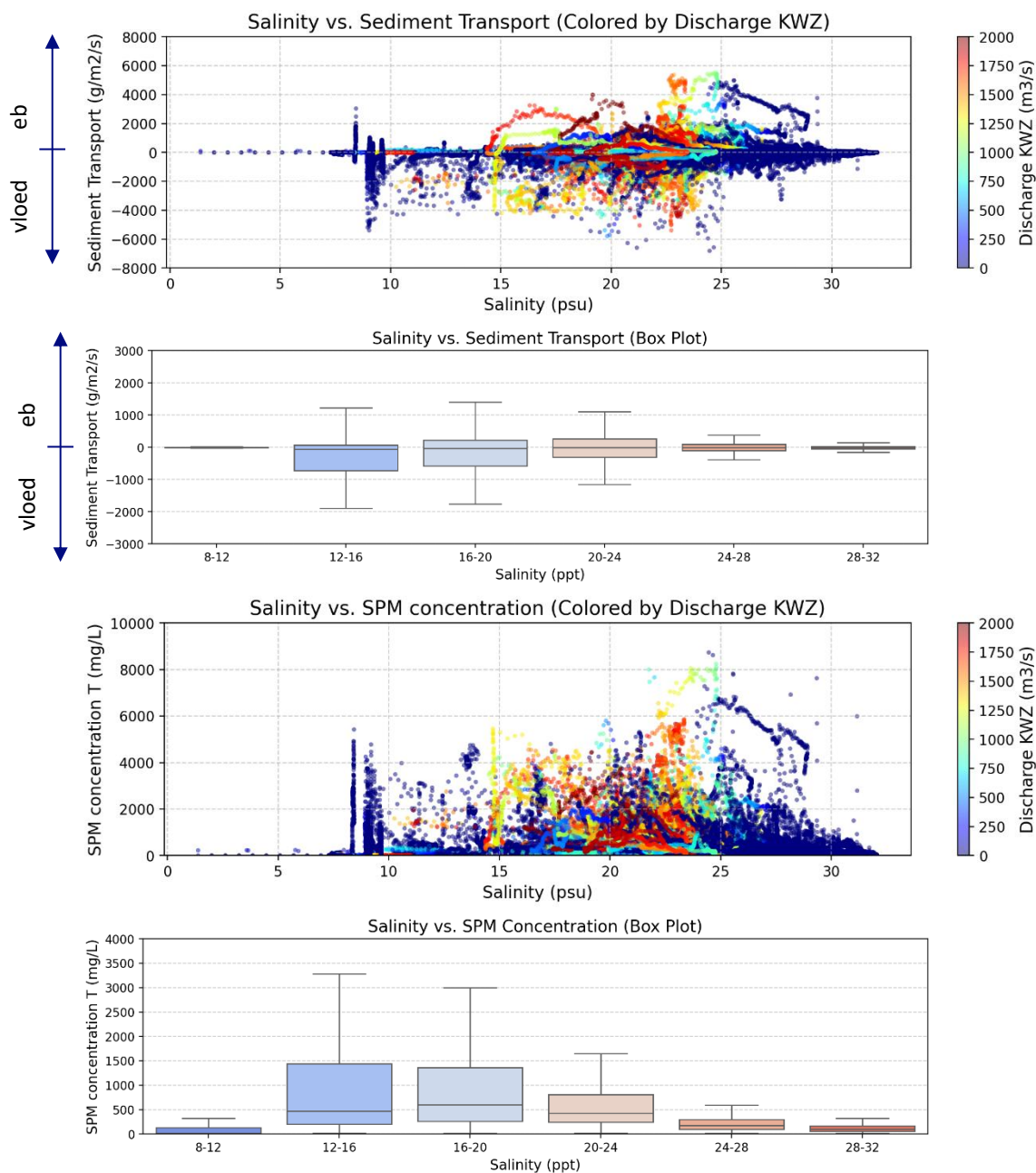




Figuur E-6: Samenhang van spuidebiet Kornwerderzand met gemeten zoutgehalte op meetlocatie Boontjes zuid (F4) voor verschillende periodes (van boven naar beneden: 1-15 okt, 16-31 okt, 1-15 nov, 16-30 nov en 1-15 dec). Per figuur zijn links de tijdreeksen van golfhoogte (linksboven) en SPM (linksonder) voor een periode van twee weken weergegeven en rechts de scatter plot tussen golfhoogte en SPM. Merk op dat het spuidebiet in het onderste figuur een fout lijkt te bevatten met lineair verloop van spuidebiet over een periode van een week, waardoor ook de scatter plot onrealistische samenhang weergeeft.

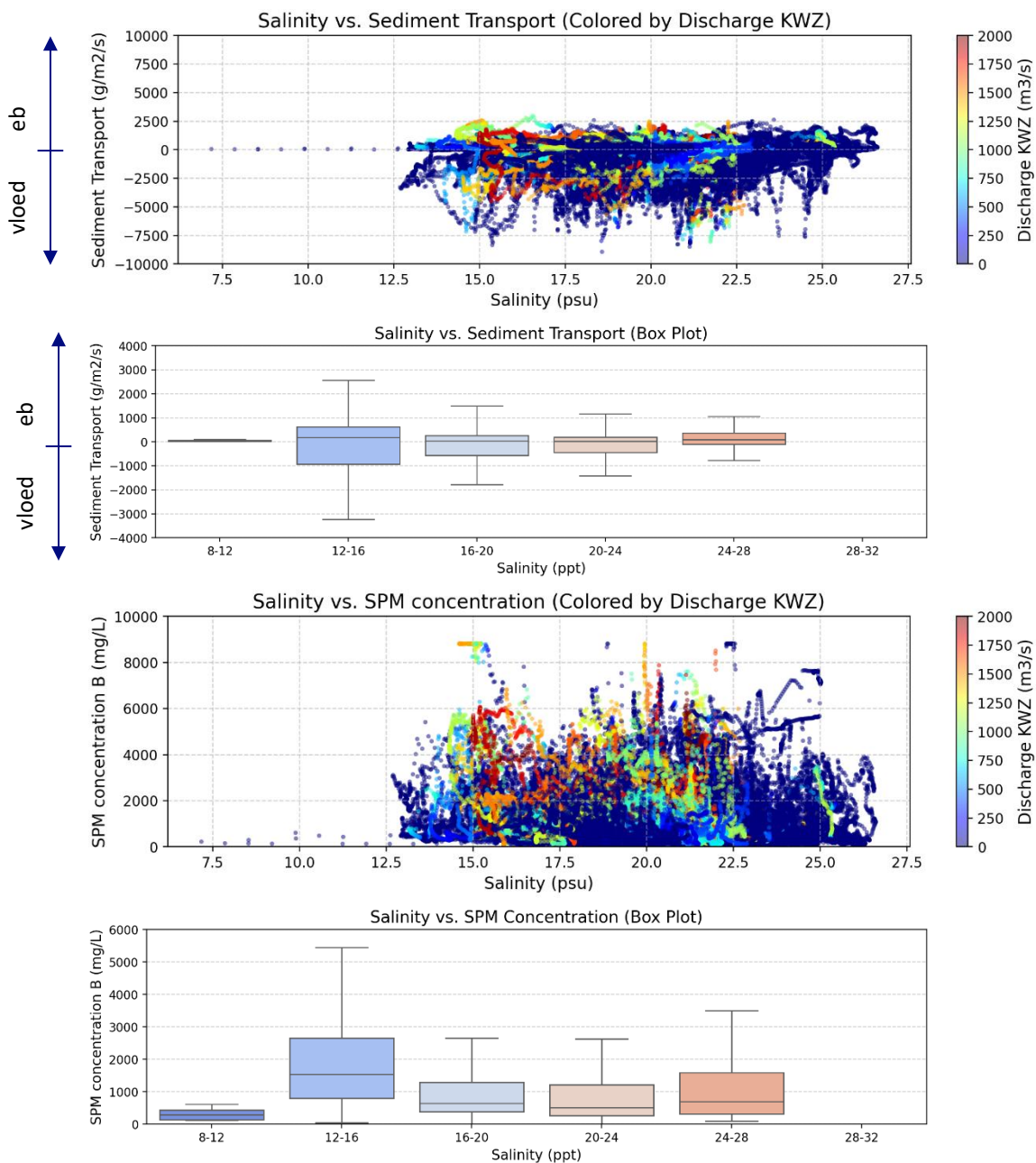
E.3 Samenhang zoutgehalte, sedimenttransport en SPM

F1 - Blauwe Slenk



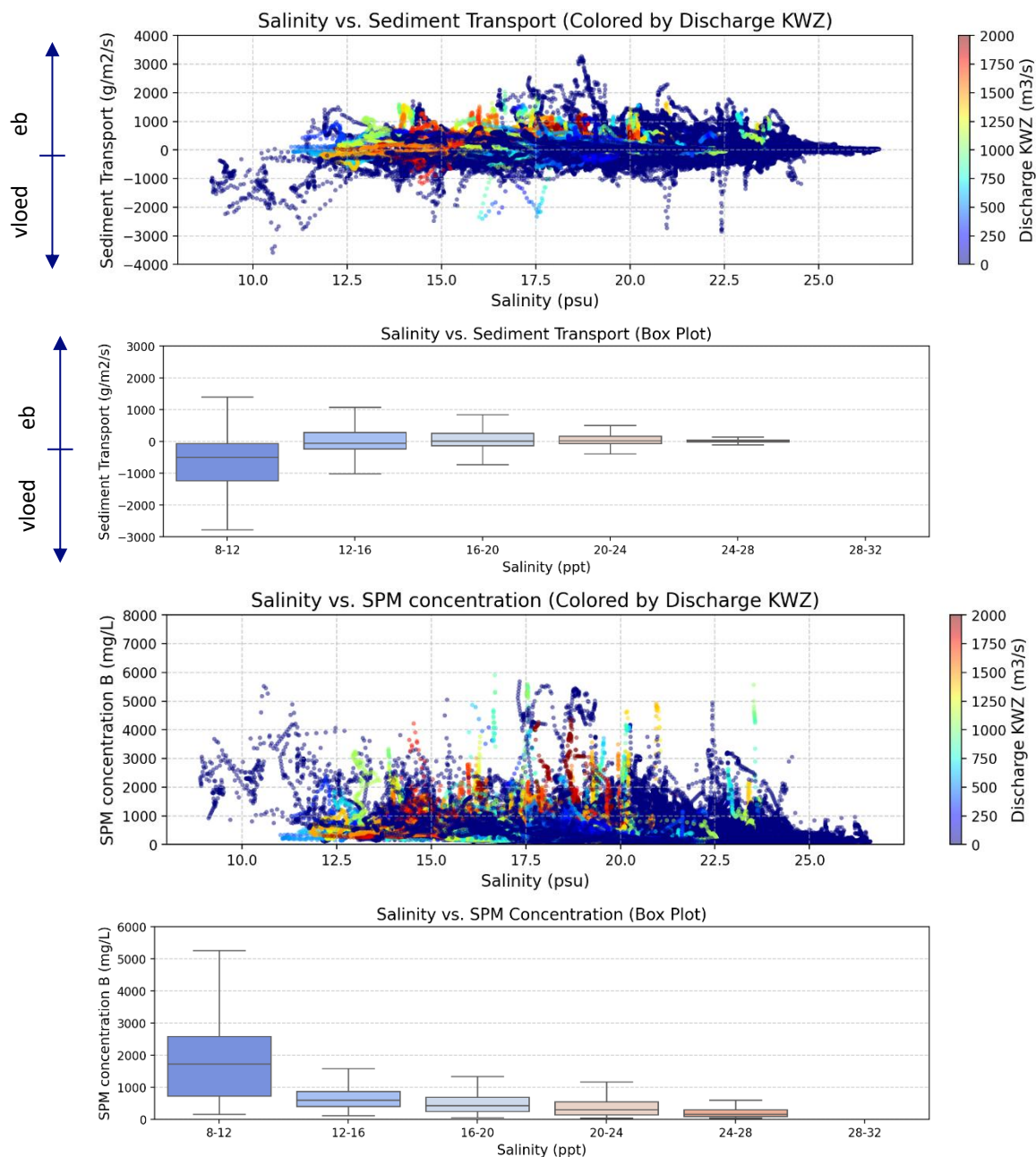
Figuur E-7: Samenhang zoutgehalte met sedimenttransport en SPM bij de bovenste OBS op meetlocatie Blauwe Slenk. Van boven naar beneden: (a) scatter plot zoutgehalte t.o.v. (bruto) sediment transport, (b) boxplot zoutgehalte t.o.v. (bruto) sediment transport, (c) scatter plot zoutgehalte t.o.v. SPM en (d) boxplot zoutgehalte t.o.v. SPM. De kleuren in de scatterplots geven het spuidebiet bij Kornwerderzand. De kleuren in de boxplots hebben geen betekenis.

F2 – Kimstergat



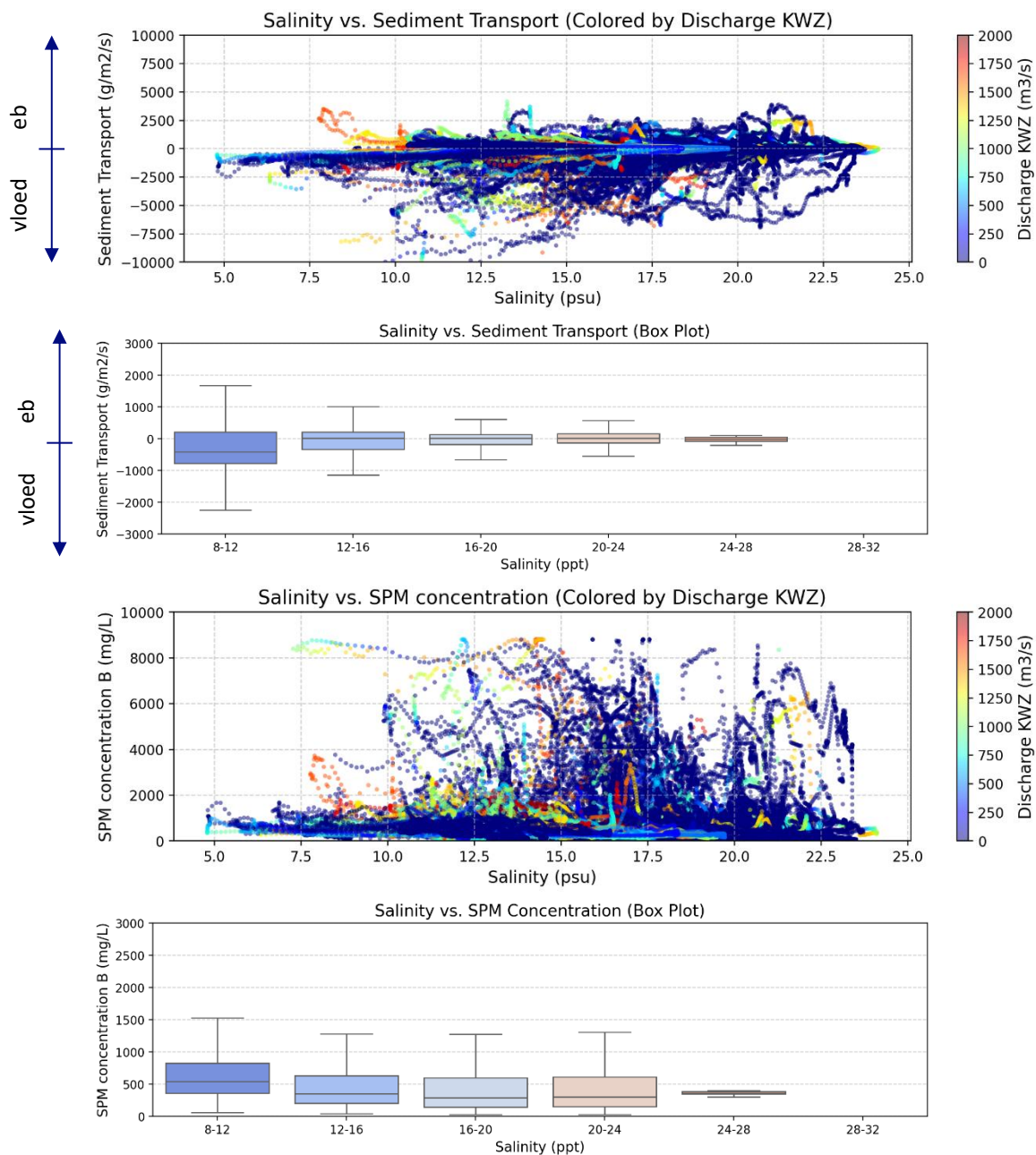
Figuur E-8: Samenhang zoutgehalte met sedimenttransport en SPM nabij de bodem op meetlocatie Kimstergat. Van boven naar beneden: (a) scatter plot zoutgehalte t.o.v. (bruto) sediment transport, (b) boxplot zoutgehalte t.o.v. (bruto) sediment transport, (c) scatter plot zoutgehalte t.o.v. SPM en (d) boxplot zoutgehalte t.o.v. SPM. De kleuren in de scatterplots geven het spuidebiet bij Kornwerderzand. De kleuren in de boxplots hebben geen betekenis.

F3 – Boontjes noord



Figuur E-9: Samenhang zoutgehalte met sedimenttransport en SPM nabij de bodem op meetlocatie Boontjes noord. Van boven naar beneden: (a) scatter plot zoutgehalte t.o.v. (bruto) sediment transport, (b) boxplot zoutgehalte t.o.v. (bruto) sediment transport, (c) scatter plot zoutgehalte t.o.v. SPM en (d) boxplot zoutgehalte t.o.v. SPM. De kleuren in de scatterplots geven het spuidebiet bij Kornwerderzand. De kleuren in de boxplots hebben geen betekenis.

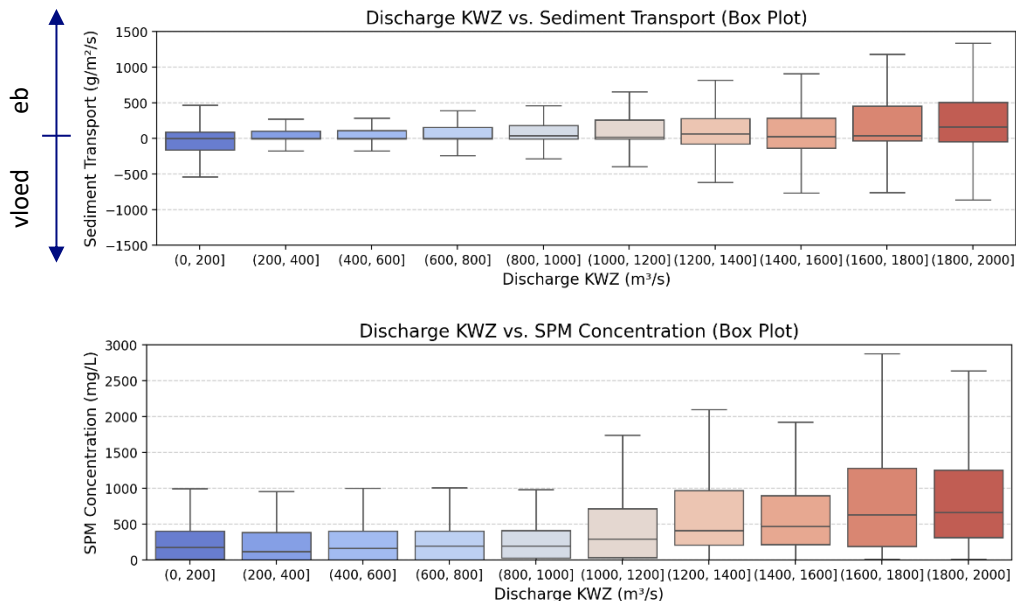
F4 – Boontjes zuid



Figuur E-10: Samenhang zoutgehalte met sedimenttransport en SPM nabij de bodem op meetlocatie Boontjes zuid. Van boven naar beneden: (a) scatter plot zoutgehalte t.o.v. (bruto) sediment transport, (b) boxplot zoutgehalte t.o.v. (bruto) sediment transport, (c) scatter plot zoutgehalte t.o.v. SPM en (d) boxplot zoutgehalte t.o.v. SPM. De kleuren in de scatterplots geven het spuidebiet bij Kornwerderzand. De kleuren in de boxplots hebben geen betekenis.

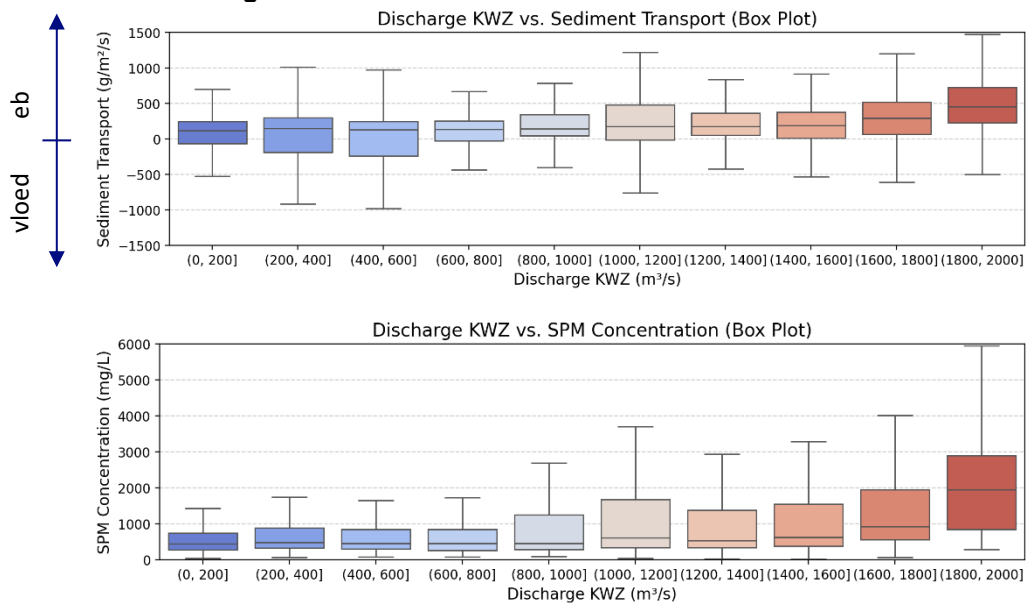
E.4 Samenhang spuidebiet Kornwerderzand, sedimenttransport en SPM

F1 - Blauwe Slenk



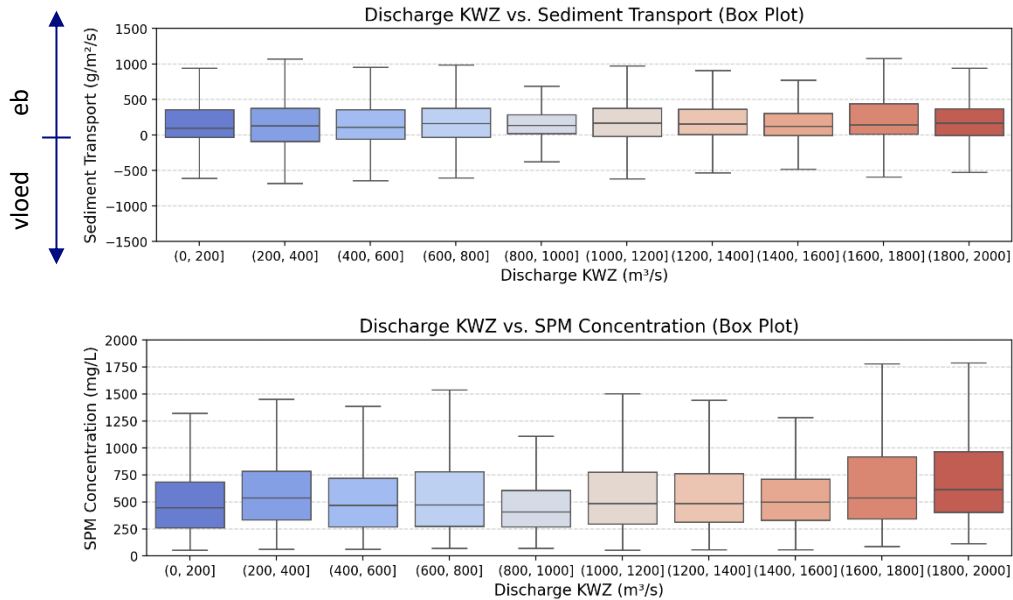
Figuur E-11: Samenhang spuidebiet Kornwerderzand met (boven) sedimenttransport en (onder) SPM bij de bovenste OBS op meetlocatie Blauwe Slenk.

F2 - Kimstergat



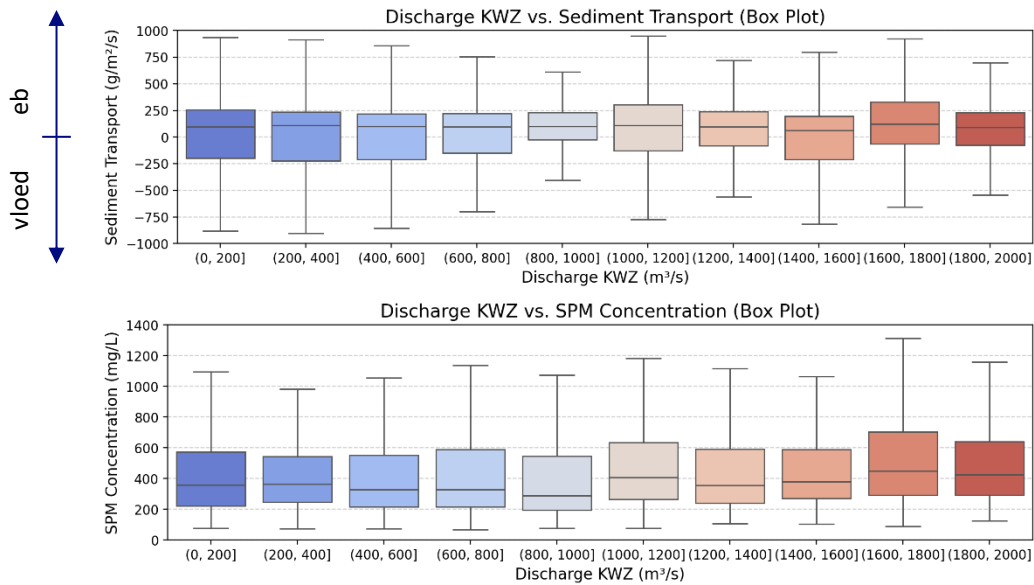
Figuur E-12: Samenhang spuidebiet Kornwerderzand met (boven) sedimenttransport en (onder) SPM nabij de bodem op meetlocatie Kimstergat.

F3 – Boontjes noord



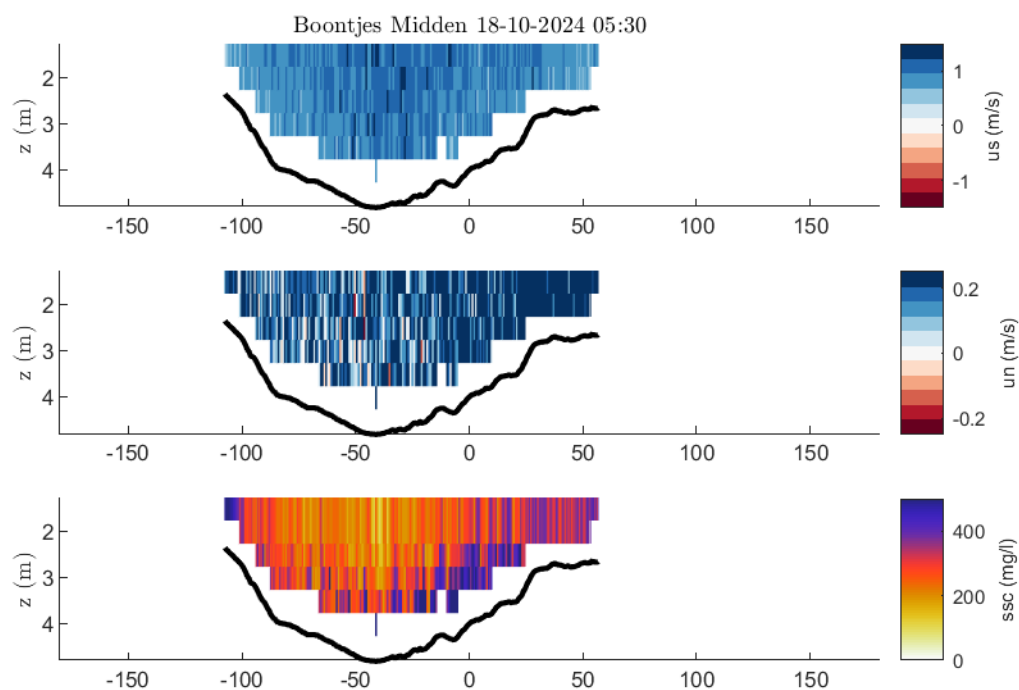
Figuur E-13: Samenhang spuidebiet Kornwerderzand met (boven) sedimenttransport en (onder) SPM nabij de bodem op meetlocatie Boontjes noord.

F4 – Boontjes zuid

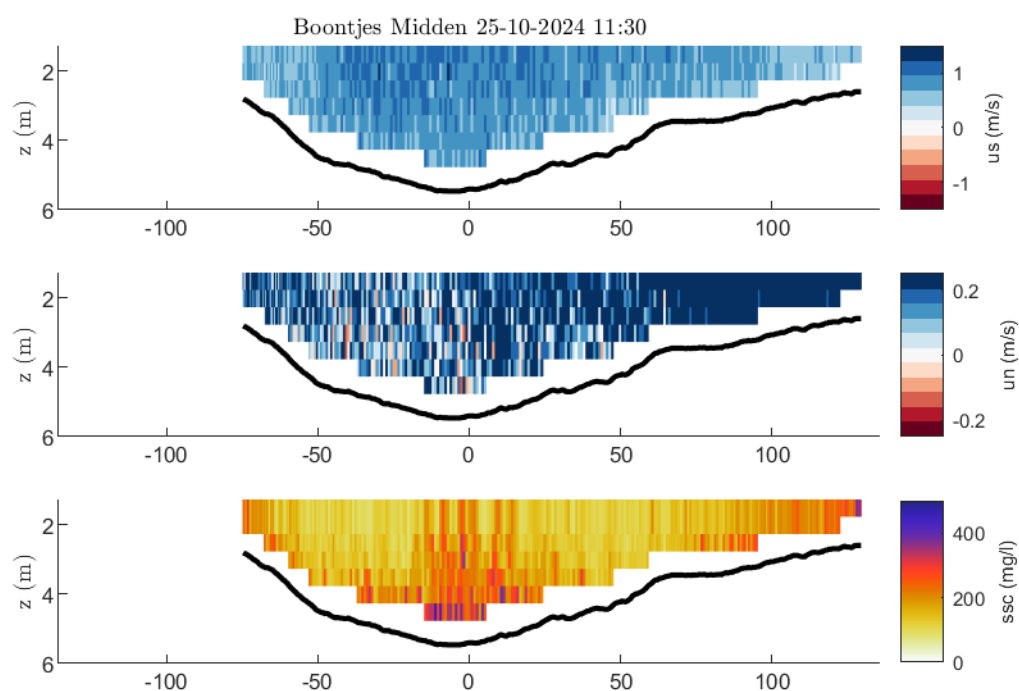


Figuur E-14: Samenhang spuidebiet Kornwerderzand met (boven) sedimenttransport en (onder) SPM nabij de bodem op meetlocatie Boontjes zuid.

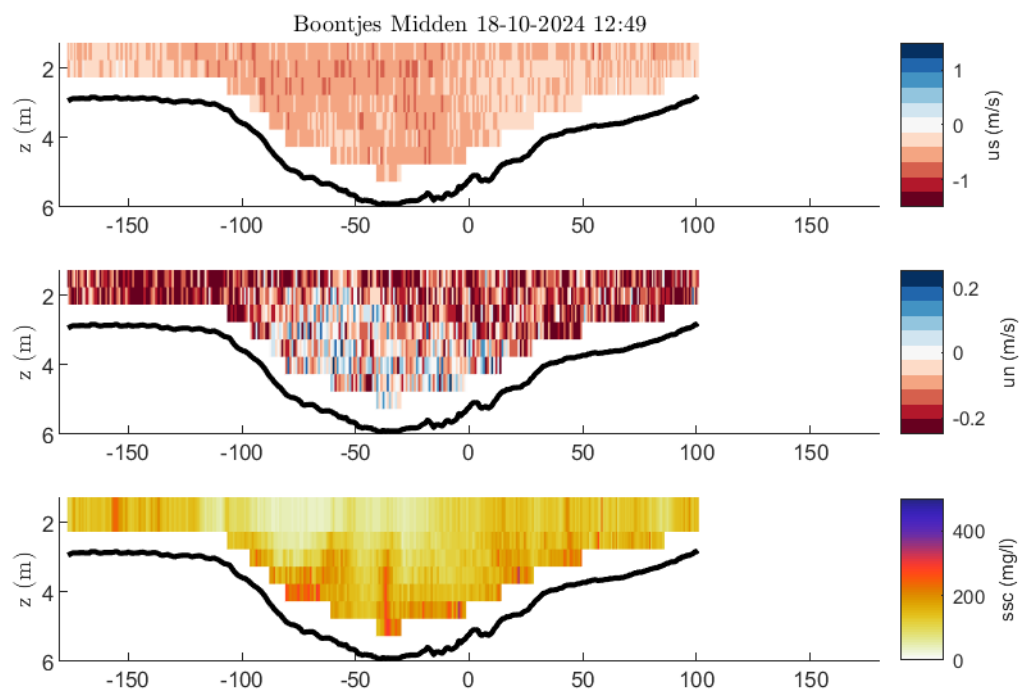
F Varende metingen



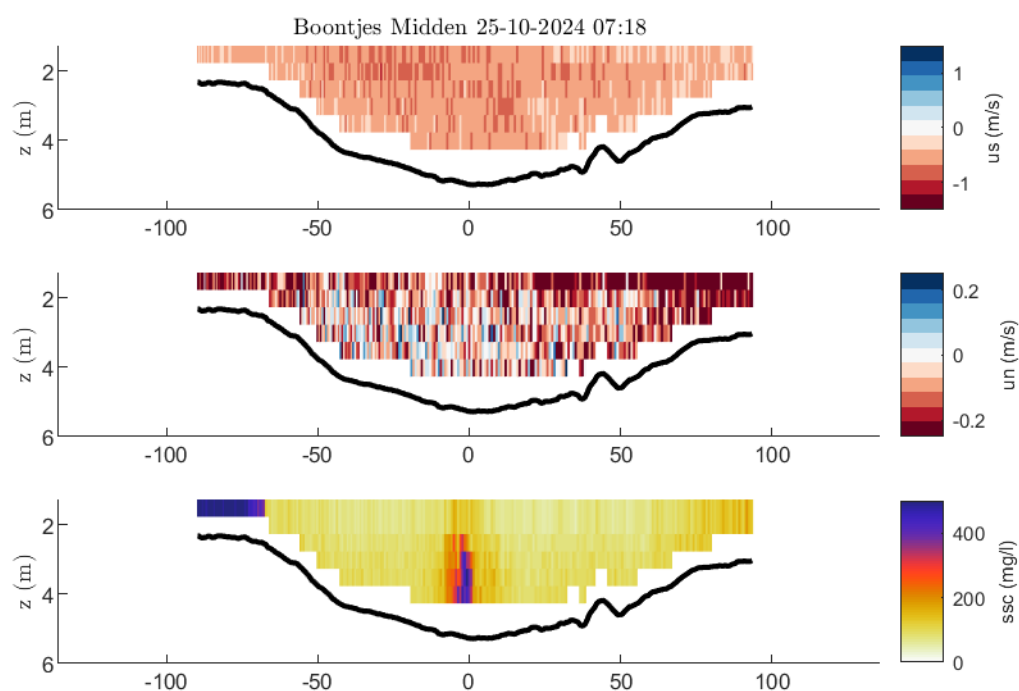
Figuur F-1: Resultaten van varende metingen bij Boontjes midden tijdens piek vloedstroming op 18 oktober 2024. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.



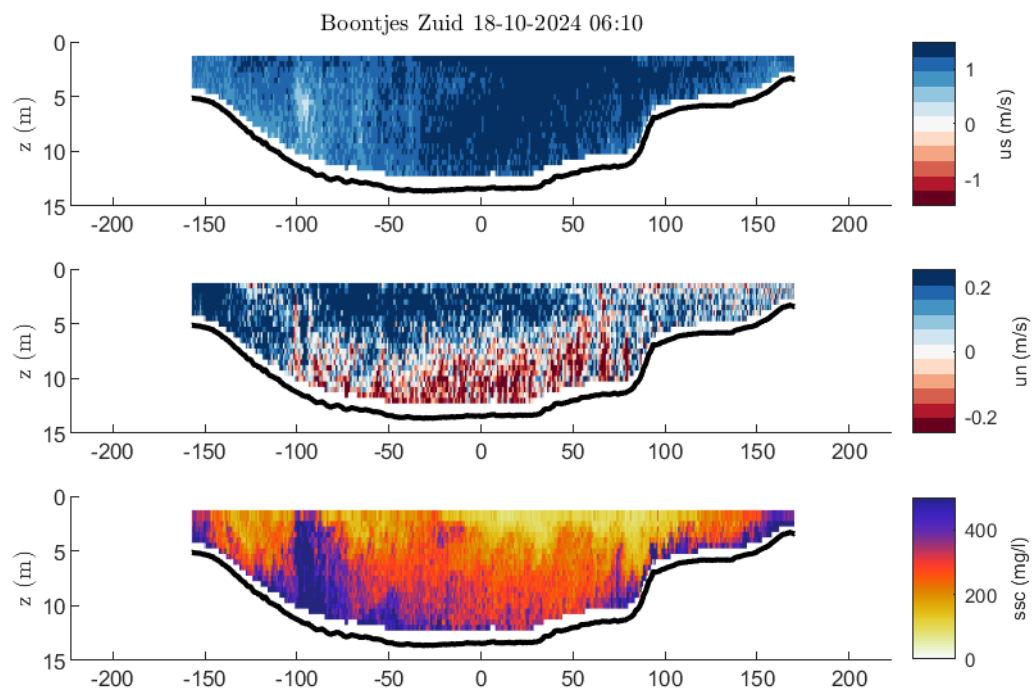
Figuur F-2: Resultaten van varende metingen bij Boontjes midden tijdens piek vloedstroming op 25 oktober 2024. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.



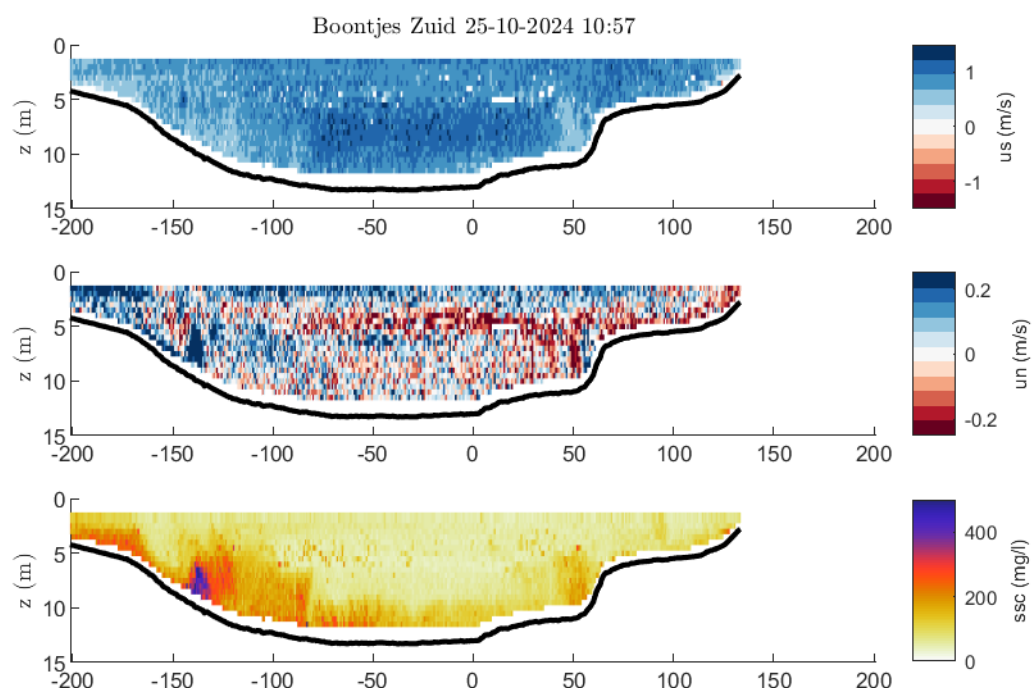
Figuur F-3: Resultaten van varende metingen bij Boontjes midden tijdens piek ebstroming op 18 oktober 2024. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.



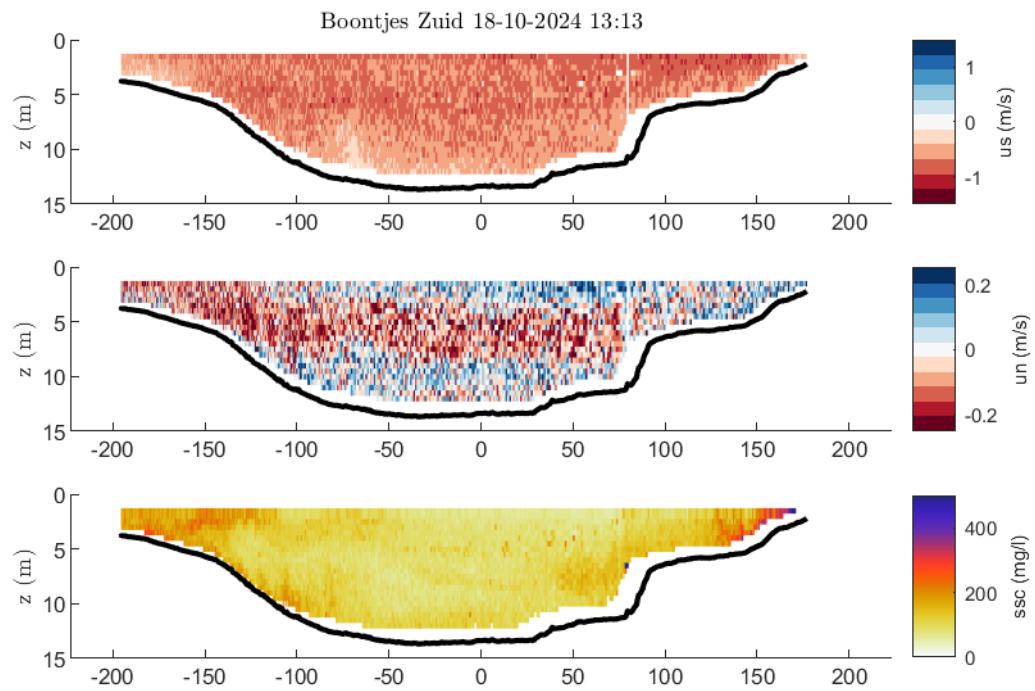
Figuur F-4: Resultaten van varende metingen bij Boontjes midden tijdens piek ebstroming op 25 oktober 2024. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.



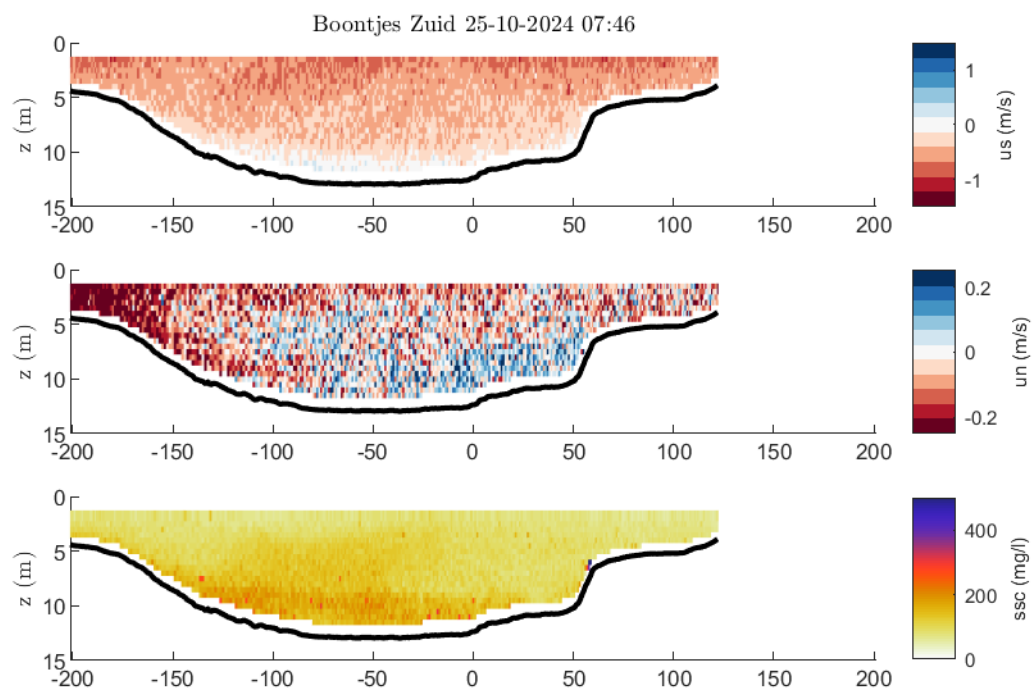
Figuur F-5: Resultaten van varende metingen bij Boontjes zuid tijdens piek vloedstroming op 18 oktober 2024. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.



Figuur F-6: Resultaten van varende metingen bij Boontjes zuid tijdens piek vloedstroming op 25 oktober 2024. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.

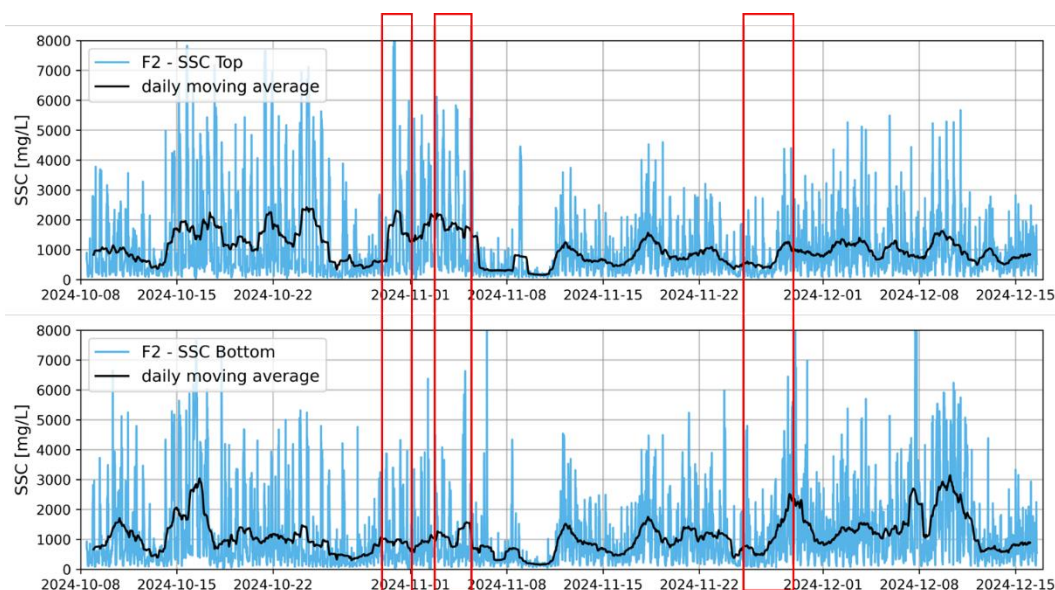


Figuur F-7: Resultaten van varende metingen bij Boontjes zuid tijdens piek ebstroming op 18 oktober 2024. Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.

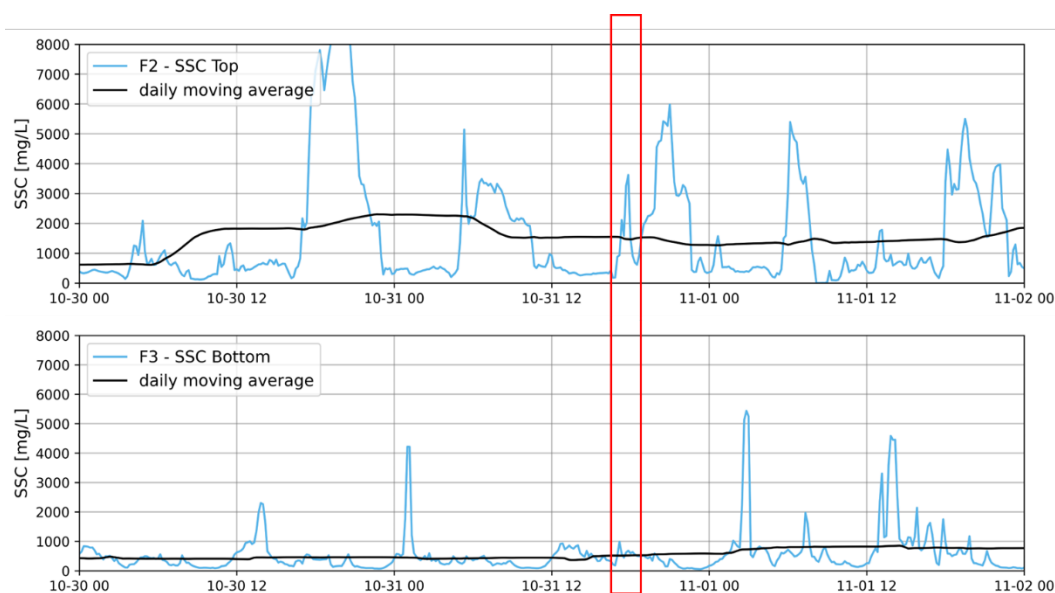


Figuur F-8: Resultaten van varende metingen bij Boontjes zuid tijdens piek ebstroming op 25 oktober 2024 (kopie van Figuur 6-5). Voor alle panelen is links het noordwesten en rechts het zuidoosten. De bovenste twee panelen tonen stroomsnelheden in respectievelijk de langsrichting en dwarsrichting van de geul (positief in resp. vloedrichting en zuidoostwaarts). Het onderste paneel toont sedimentconcentraties in mg/l.

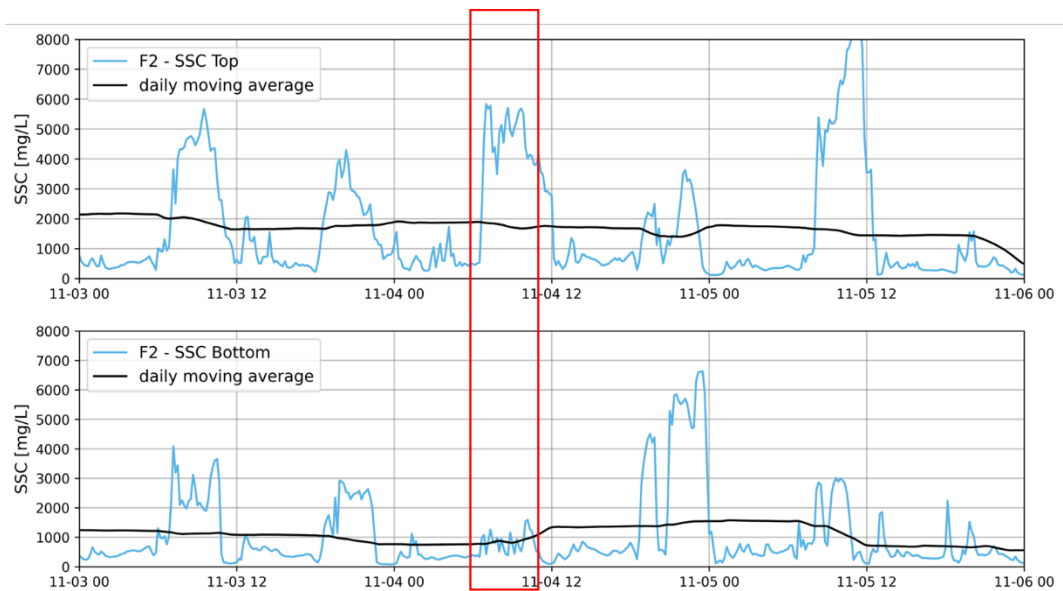
G SPM-metingen tijdens verspreiding baggerspecie



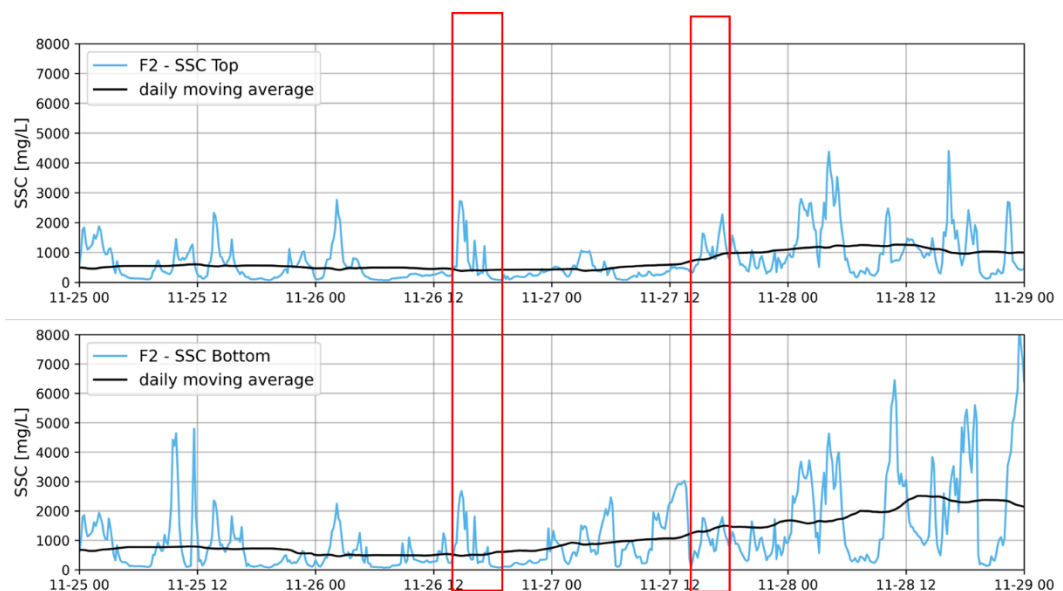
Figuur G-1: SPM-metingen Kimstergat met verspreidingsmomenten baggerspecie uit de noordelijke Boontjes aangegeven met rood.



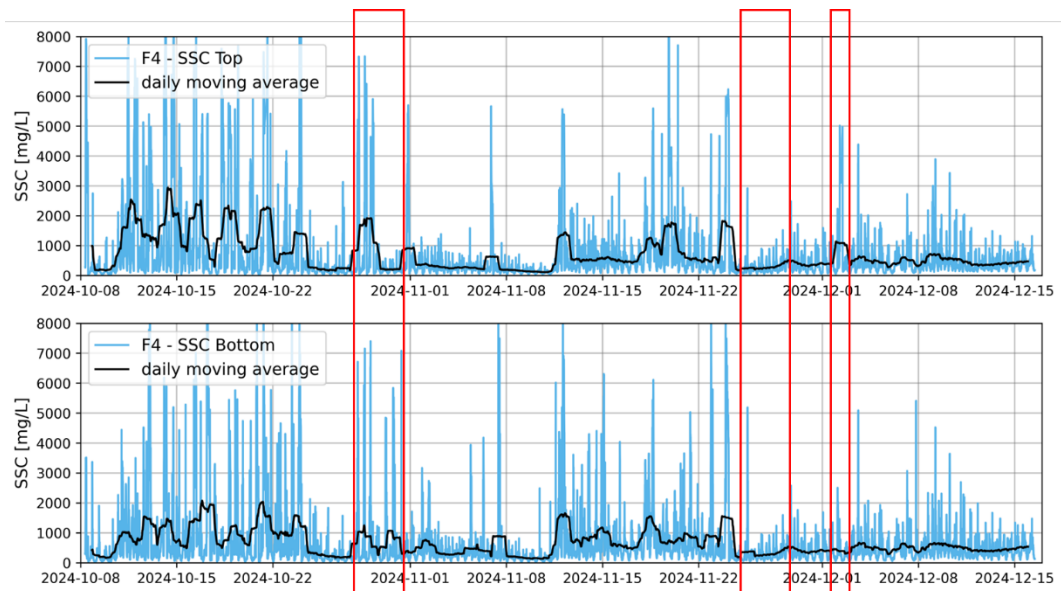
Figuur G-2: SPM-metingen Kimstergat rond 31 oktober 2024, waarop 827 m³ baggerspecie werd verspreid rond 16:00 uur.



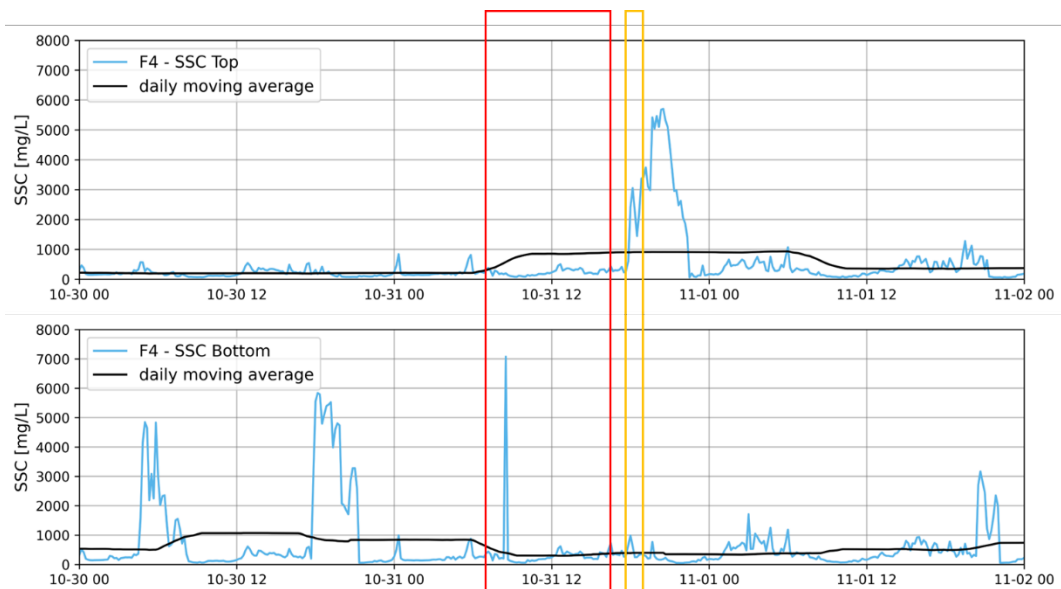
Figuur G-3: SPM-metingen Kimstergat rond 4 november 2024, waarop 3293 m³ baggerspecie werd verspreid tussen 7:00 en 10:00 uur.



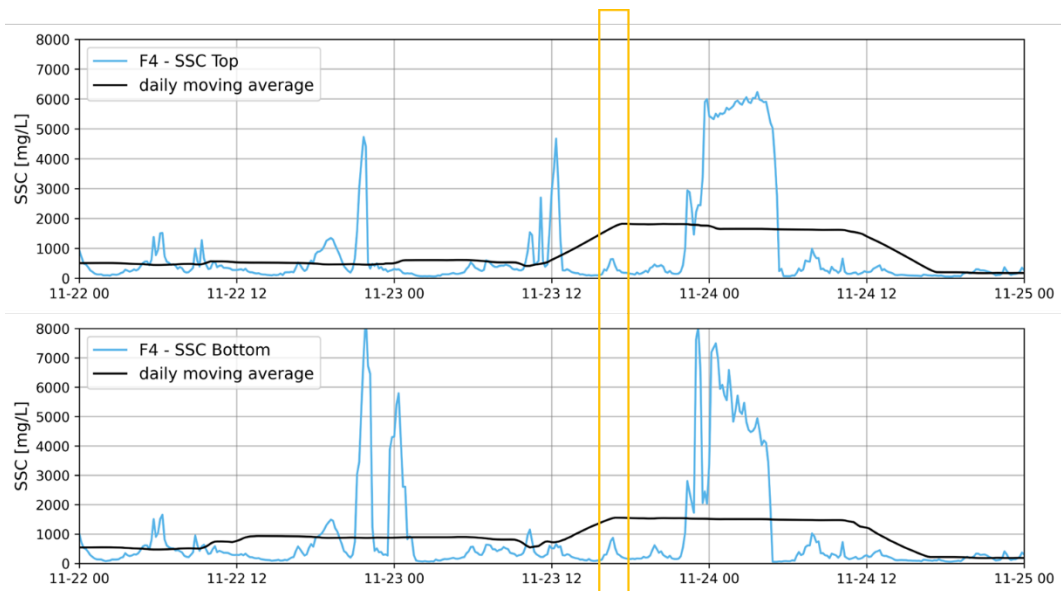
Figuur G-4: SPM-metingen Kimstergat rond 26-27 november 2024, waarop resp. 6505 m³ (26 nov 14:00--18:00 uur) en 827 m³ (27 nov rond 16:00 uur) baggerspecie werd verspreid.



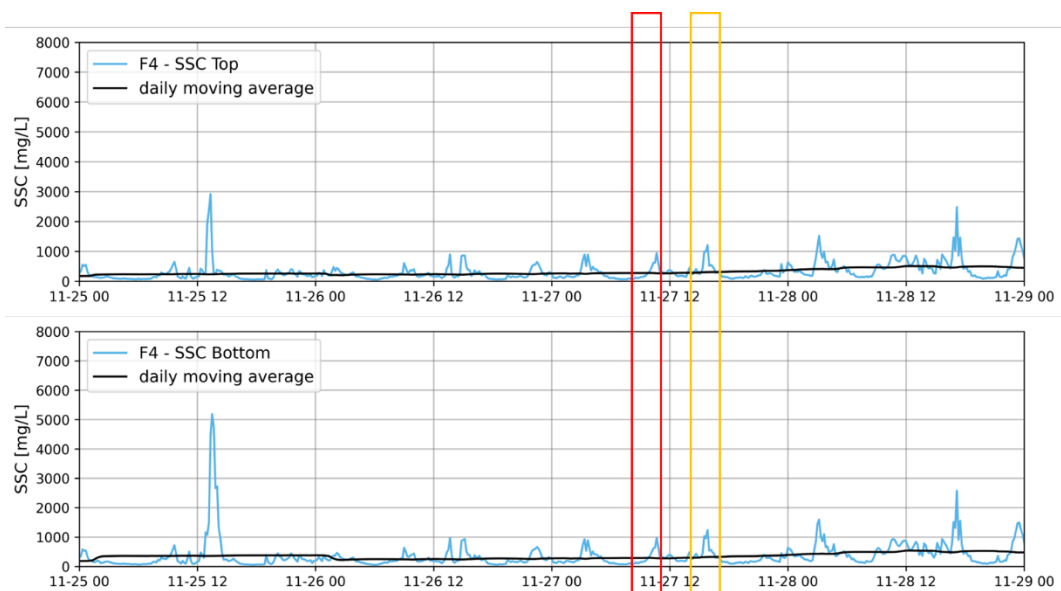
Figuur G-5: SPM-metingen Boontjes zuid met verspreidingsmomenten baggerspecie uit de zuidelijke Boontjes aangegeven met rood.



Figuur G-6: SPM-metingen Boontjes zuid rond 31 oktober 2024, waarop 4912 m³ baggerspecie werd verspreid in verspreidingsvak Boontjes (nabij Kornwerderzand) tussen 8:30 en 14:30 uur en daarnaast 163 m³ agitatiebaggeren in het baggervak rond 16:00 uur.



Figuur G-7: SPM-metingen Boontjes zuid rond 23 november 2024, waarop 1000 m³ sediment middels agitatiebaggeren in het baggervak 'op stroom gezet' is rond 17:00 uur.



Figuur G-8: SPM-metingen Boontjes zuid rond 27 november 2024, waarop 2115 m³ baggerspecie werd verspreid in verspreidingsvak Boontjes (nabij Kornwerderzand) tussen 8:40 en 10:15 uur en daarnaast 525 m³ agitatiebaggeren in het baggervak rond 14:00 uur.

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