



Zandsuppleties voor natuur op de Roggenplaat (Oosterschelde): beschrijving en analyse van de morfologische en ecologische ontwikkelingen over de eerste 5 jaar na aanleg

Auteur(s): Jim van Belzen* ***, Susanne van Donk*, Vincent Escaravage*, Nienke Vermeer-Schiettekatte**, Anouk de Bakker**, Tim Grandjean***, Jebbe van de Werf** en Lodewijk de Vet**

* Wageningen Marine Research

** Deltares

*** NIOZ

Wageningen Marine Research

Rapport: C095/25

Zandsuppleties voor natuur op de Roggenplaat (Oosterschelde): beschrijving en analyse van de morfologische en ecologische ontwikkelingen over de eerste 5 jaar na aanleg

Auteur(s): Jim van Belzen* ***, Susanne van Donk*, Vincent Escaravage*, Nienke Vermeer-Schiettekatte**, Anouk de Bakker**, Tim Grandjean***, Jebbe van de Werf** en Lodewijk de Vet**

* Wageningen Marine Research

** Deltares

*** NIOZ

Wageningen Marine Research
Yerseke, november 2025

Wageningen Marine Research rapport: C095/25

Keywords: Oosterschelde, Roggenplaat, zandsuppletie, monitoring, morfologie, ecologie, bodemdieren, steltlopers, schelpdieren, oesterriffen, zeehonden.

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Zee & Delta
T.a.v.: Harry de Looff, Kerst Buis & Rutger Blok
Poelendaelesingel 18
4335 JA Middelburg

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/704576>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Foto omslag: Marieke Stuijt

© Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut binnen de
rechtspersoon Stichting Wageningen Research,
hierbij vertegenwoordigd door
Drs.ir. M.T. van Manen, directeur bedrijfsvoering

KvK nr. 09098104,
WMR BTW nr. NL 8065.11.618.B01.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

Wageningen Marine Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor
gevolg schade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de
resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van Wageningen
Marine Research. Opdrachtgever vrijwaart Wageningen Marine Research van
aanspraken van derden in verband met deze toepassing.
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag weergegeven en/of
gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt
worden zonder schriftelijke toestemming van de uitgever of auteur.

Inhoud

Inhoud	3	
Samenvatting		6
Leeswijzer		11
1	Inleiding	12
1.1	Achtergrond	12
1.1.1	Zandhonger	12
1.1.2	Suppletiestrategie en de Roggenplaat	12
1.2	Projectbeschrijving	14
1.2.1	Doel en fasering	14
1.2.2	Evaluatie- en kennisvragen	15
1.2.3	Opzet monitoring	16
1.2.4	Rolverdeling en verantwoording	20
2	Beantwoording evaluatievragen	21
2.1	Morfologie	21
2.2	Bodemdieren	24
2.3	Vogels	25
2.4	Natuurlijke riffen	28
2.5	Zeehonden	28
3	Beantwoording kennisvragen	29
3.1	Morfologie	29
3.2	Bodemdieren	34
3.3	Vogels	37
4	Synthese van de eco-morfologische ontwikkeling vanuit perspectief van de vogels	42
4.1	Inleiding	42
4.2	Aanpak en methodiek	42
4.3	Integrale analyse	43
4.3.1	Vogelprofielen	43
4.3.2	Functionele vogeleigenschappen	43
4.3.3	Kwalitatieve toetsing waarnemingen aan vogelprofielen	46
4.3.4	Reflectie op randvoorwaarden en ontwerpprincipes vanuit perspectief van vogels	48
5	Reflectie op suppletiedoelstelling inclusief prognose tot 2035	52
5.1	Morfologisch doelbereik	52
5.1.1	Ontwikkelingen van de morfologische doelindicator tot dusver	52
5.1.2	Onderliggende mechanismen die de lange termijn ontwikkeling van de doelindicator sturen	54
5.1.3	Verkennde extrapolatie droogvalduurontwikkeling	57

5.1.4	Reflectie morfologisch doelbereik	58
5.2	Ecologisch doelbereik	59
5.2.1	Relatie tussen morfologie en ecologisch potentieel	60
5.2.2	Ontwikkeling van bodemdieren	60
5.2.3	Gebruik door foeragerende vogels	60
5.2.4	Samenvatting ecologisch doelbereik en doorzicht naar 2035	61
6	Conclusies, kennisleemtes en aanbevelingen	63
6.1	Inleiding	63
6.2	Conclusies	63
6.2.1	Hoofdconclusies over vijf jaar eco-morfologische ontwikkeling (2020-2024)	63
6.2.2	Betekenis van de waargenomen ontwikkelingen voor de ontwikkeling van het foerageerhabitat tot aan het doeljaar 2035	65
6.2.3	Kennisontwikkeling	66
6.3	Kennisleemtes en aanbevelingen	66
	Literatuur	69
	Kwaliteitsborging	77
	Verantwoording	78
Bijlage 1	Morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat en de suppletie-elementen	79
B1.1	Inleiding	80
B1.2	Methodologie	82
B1.3	Achtergrond: historische ontwikkeling Roggenplaat voor suppleren (tot 2019)	92
B1.4	Achtergrond: wind-, golf-, en waterstandcondities tijdens de monitoringscampagne	97
B1.5	Evaluatie ontwikkeling Roggenplaatcomplex	103
B1.6	Evaluatie ontwikkeling suppletie-elementen	109
B1.7	Verdiepend morfologisch procesbegrip	119
Bijlage 2	De ontwikkeling van bodemdieren op de Roggenplaat en de suppleties	161
B2.1	Inleiding	162
B2.2	Methodologie	162
B2.3	De ontwikkeling van de voedselbeschikbaarheid voor vogels (d.w.z. bodemdieren) op de Roggenplaat ná aanleg van de suppleties	166
B2.4	Ecologische ontwikkelingen op de suppleties	174
Bijlage 3	De ontwikkeling van benthos-etende vogels op de Roggenplaat en de suppleties	193
B3.1	Opbouw hoofdstuk	194
B3.2	Methodologie	194
B3.3	Evaluatievraag 1	200
Bijlage 4	De ontwikkeling van de zeehondenpopulatie op de Roggenplaat tussen 2018 en 2022	240
B4.1	Opbouw hoofdstuk	240
B4.2	Methodologie	240
B4.3	Evaluatie ontwikkeling zeehondenpopulatie	240

Bijlage 5	Effect van het 'primen' op de herkolonisationsnelheid van een suppletie	242
Bijlage 6	Inzicht in de veranderingen van het dagelijkse bodemniveau van een intergetijdenzandplaat na een suppletie	246
	Samenvatting	246
	B6.1 Inleiding	246
	B6.2 Methoden	248
	B6.3 Resultaten	254
	B6.4 Discussie	263
Bijlage 7	Functionele vogelprofielen en eco-morfologische niches van kustvogels	266
	B7.1 Inleiding	266
	B7.2 Methodiek: opstellen en analyseren van vogelprofielen	266
	B7.3 Resultaten	271
	B7.4 Discussie en synthese	275
Bijlage 8	Kennisdeling en outreach	276

Samenvatting

Aanleiding

Sinds de aanleg van de Oosterscheldekering en de compartimenteringsdammen kampt de Oosterschelde met zandhonger: door de afgenomen getijdewerking verplaatst sediment zich van de hogere droogvallende delen naar de dieper gelegen geulen. Hierdoor neemt het areaal aan intergetijdengebieden (platen, slikken en schorren) geleidelijk af. Dat heeft gevolgen voor de waterveiligheid (door toename van waterdiepte en daarmee sterkere golfaanval op de dijken) en voor de ecologische kwaliteit van de Oosterschelde, onder meer voor een aantal N2000-doelsoorten.

De Roggenplaat is een van de belangrijkste intergetijdengebieden van de Oosterschelde. Gemiddeld foerageren er bij laagwater circa 20.000 vogels die foerageren op bodemdieren, met name steltlopers en bergeenden, aangevuld met soorten zoals rotganzen, lepelaars en reigers. De beschikbaarheid en kwaliteit van het foerageergebied hangen nauw samen met droogvalduur, sedimenteigenschappen en de aanwezigheid van bodemdieren. Vogels beginnen hun foerageeractiviteit doorgaans op de hoger gelegen delen die vroeg droogvallen, en bewegen vervolgens mee met het wegtrekkende water naar lagere zones. Zo vindt elke vogelsoort binnen het gebied en het ritme van het getij de plekken waar ze het beste kan foerageren.

Omdat zandhonger direct leidt tot afname van dit cruciale foerageergebied, is op de Roggenplaat in het najaar van 2019 een suppletie aangebracht van in totaal 1,1 miljoen m³ sediment. Deze suppletie is verdeeld over zeven suppletie-elementen met een gezamenlijk oppervlak van 211 hectare, en de suppletie-elementen hebben een gemiddelde dikte tussen de 30 en 80 cm. Hiermee wordt beoogd het areaal en de kwaliteit van het foerageergebied voor vooral steltlopers en bergeenden te behouden.

Doelstelling

Het doel van de suppletie op de Roggenplaat is drievoudig: (1) het behoud van de foerageerfunctie van het Roggenplaat-Neeltje Jans complex voor de komende 25 jaar; (2) het beperken van de golfaanval op de zuidkust van Schouwen; en (3) het ontwikkelen van kennis voor flexibel, klimaatbestendig en kosteneffectief suppleren voor natuur en waterveiligheid. Voorliggende rapportage is gericht op doelstellingen 1 en 3.

Opzet monitoring

Om te beoordelen in hoeverre deze doelen van de Roggenplaat-suppletie worden bereikt, is een meerjarig monitoringsprogramma opgezet. Rijkswaterstaat heeft samen met Wageningen Marine Research (WMR), Deltares, het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ), Deltamilieu Projecten en HZ University of Applied Sciences tot vijf jaar na aanleg de ontwikkelingen gevolgd. De monitoring bestaat uit drie pijlers:

- Morfologie (droogvallende delen waar vogels foerageren): veranderingen in droogvalduur van het intergetijdengebied, sedimentatie- en erosiepatronen, sedimentsamenstelling en waterbeweging;
- Bodemdieren (benthos; voedsel voor de vogels): trends in biomassa, soortensamenstelling en beschikbaarheid van bodemdieren als prooi voor vogels;
- Vogels: aantallen, foeragegedrag, habitatgebruik en ontwikkeling van doelsoorten.

Daarnaast zijn als aanvullende onderdelen de monitoring van oesterriffen, tellingen van zeehonden en het uitvoeren van experimenten om de ontwikkeling bodemdiergemeenschappen te versnellen (priming) uitgevoerd.

Deze eindrapportage van de vijfjarige projectmonitoring vormt de geïntegreerde eindevaluatie van de eco-morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat, gebaseerd op monitoring van eind 2019 tot eind 2024. In dit rapport beoordelen we in hoeverre de suppletie heeft bijgedragen aan het realiseren van de gestelde doelen (doelstellingen 1 en 3). Door de gecombineerde analyse van morfologische veranderingen, bodemdierontwikkeling en vogelgebruik ontstaat een samenhangend beeld van het functioneren van de Roggenplaat en gesuppleerde delen. De inzichten uit deze evaluatie bieden handvatten voor het optimaliseren van toekomstige suppletieontwerpen voor natuur en waterveiligheid in de Oosterschelde.

Hoofdbevinding van vijf jaar monitoring

De vijfjarige monitoring laat zien dat de Roggenplaat als geheel haar functie als foerageer- en rustgebied voor vogels en zehonden heeft behouden. De suppletie-elementen hebben hier aantoonbaar aan bijgedragen: door gerichte te suppleren en grote delen van de plaat onaangetast te laten, is de draagkracht op systeemniveau in stand gebleven.

De eco-morfologische ontwikkeling laat een samenhangend beeld zien. Op de suppletie-elementen ontwikkelen bodemhoogte, sedimenteigenschappen en bodemdiergemeenschappen zich in grote lijnen overeenkomstig de veranderde droogvalduur. Dit vertaalt zich in een geleidelijke toename van de doelsoorten, de steltlopers en bergeenden, vooral in de zones waar sedimentatie optreedt en de bodemeigenschappen en -dieren zich herstellen. In de meer dynamische zuidelijke delen, waar erosie sterker doorwerkt, blijft de ontwikkeling iets achter, maar ook daar is sprake van herstel ten opzichte van de situatie net na aanleg.

De resultaten bevestigen daarmee dat de aanpak, het combineren van morfologische ingrepen met behoud van natuurlijke processen, effectief is voor het borgen van ecologische functies. Tegelijkertijd laat de monitoring zien waar optimalisatie mogelijk is, bijvoorbeeld in zones waar veel erosie optreedt en in de snelheid waarmee bodemdieren terugkeren op nieuwe suppleties. Deze inzichten vormen een belangrijke basis voor toekomstige suppleties in de Oosterschelde en elders.

Morfologie

Met de aanleg van de suppletie is het voor vogels waardevolle 50-80% droogvalduurareaal op de plaat direct na de suppletie in 2019 met 124 ha toegenomen (een toename van 21%). In de eerste vijf jaar na aanleg (2020-2024) is het 50-80% droogvalduurareaal weer met 4% afgenomen. Dit komt door erosie van de niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat. Tot en met 50 m afstand van de suppletie is deze areaalklasse, door uitvlakking van de suppletie, tot dusver juist enigszins (6 ha) uitgebreid. Het hoge 70-80% droogvalduurareaal is op de Roggenplaat over deze eerste vijf jaar veel substantiëler (78%) afgenomen, mede omdat juist de hoge delen van de suppletie verlaagden.

Tussen de eerste meting na suppleren (februari 2020) en de laatste meting (juni 2024) is het suppletievolume met 17% afgenomen. Ongeveer 42% van deze volumeafname is sediment dat in de nabijheid (tot 50 m) van de suppletie terecht is gekomen (hoofdzakelijk een migratie in lijn met de dominante windrichting). Verder is ingeschat dat ongeveer 28% van deze volumeafname kan worden toegeschreven aan zettingen van de ondergrond. De rest, orde 30% van de afname van het suppletievolume, betreft sediment dat elders op de plaat of in de geulen is beland.

De grootste hoogteveranderingen op de suppletie vonden in het eerste jaar na aanleg plaats door uitzonderlijke stormen en initieel relatief grote verschillen in de hoogte van de suppletie-elementen en de hiernaast gelegen gebieden. Ook is het microreliëf, dat direct na suppleren aanwezig was, uitgevlakt. Hierna erodeert de suppletie gestaag. Dit omdat niet alleen extreme weersomstandigheden, maar ook vaker voorkomende windsnelheden en golven in combinatie met het getij bijdragen aan de lange termijn ontwikkeling.

Het ontwerp van de suppletie-elementen beïnvloedt de mate van morfologische veranderingen. Zoals in het ontwerp was voorzien, is er een duidelijk onderscheid in de morfologische ontwikkeling tussen de zuidelijke en noordelijke suppletie-elementen. Tussen februari 2020 (net na aanleg) en juni 2024 zijn de noordelijke suppletie-elementen gemiddeld met 4 tot 7 cm in hoogte afgenomen, terwijl de zuidelijke suppletie-elementen gemiddeld 11 tot 23 cm lager zijn geworden. Dit komt omdat de zuidelijke suppletie-elementen zijn blootgesteld aan relatief veel golfaanval en hoger zijn aangelegd. Daarmee zijn de zuidelijke suppletie-elementen onderhevig aan grote ruimtelijke variaties in het sedimenttransport.

De niet-gesuppleerde gebieden op de Roggenplaat, als ook het Middengeultje, hebben beperkte veranderingen in morfologische ontwikkeling ondergaan tussen 2019 en 2024. Er is geen grootschalige, eenduidige verandering in dieptegemiddelde stroomsnelheid opgetreden door aanleg van de suppletie, maar lokaal op bepaalde plekken tussen of naast suppletie-elementen zijn de snelheden enigszins (tot 0,4 m/s) veranderd (hoofdzakelijk afnamen op de suppletie en toenamen tussen of naast de suppletie-elementen).

Het aangebrachte suppletie-materiaal is bij aanleg grover (250-350 μm), waardoor de suppletie-elementen aanvankelijk grover zijn dan de omliggende delen van de Roggenplaat (175-225 μm). Het zuid-noord onderscheid tussen de suppletie-elementen uit zich ook in verschillen in korrelgrootteontwikkelingen. Waar de noordelijke suppletie-elementen na aanleg enigszins verfijnen en slib invangen, blijven de zuidelijke suppletie-elementen overwegend grof.

Bodemdieren (benthos, voedsel voor vogels)

In de bodem van de niet-gesuppleerde gebieden (droogvalduurklassen 50-60% en 60%-70%) blijven de totale bodemdierdichtheid, -biomassa en aantal soorten door de jaren heen op peil en vrij stabiel. De bodemhoogte en korrelgrootte van het sediment hebben een sterke invloed op de verspreiding van de bodemdieren in zowel de niet-gesuppleerde gebieden als op de suppletie-elementen. Suppletie-elementen verschillen in aanlegdikte en mediane korrelgrootte. Herkolonisatie van bodemdieren gaat sneller op de dunnere suppletie-elementen die gemiddeld een kleinere mediane korrelgrootte hebben. Borstelwormen domineren de bodemdierbiomassa op de meeste suppletie-elementen tot in het jaar 2022, in tegenstelling tot de meeste referentie-locaties buiten de gesuppleerde gebieden, waar schelpdieren het grootste deel van de biomassa uitmaken. Vijf jaar na aanleg is de bodemdiersamenstelling in de meest suppletie-elementen vergelijkbaar met de referentie-locaties.

Om de gevoeligheid van bodemdieren voor hydrodynamische omstandigheden beter te duiden, zijn de suppletie-elementen gecategoriseerd als: beschutte suppletie-elementen, matig erosieve suppletie-elementen en sterk erosieve suppletie-elementen. Door aanleg van de suppletie-elementen was de dichtheid, biomassa en soortenrijkdom van bodemdieren aanvankelijk laag. Het herstel verliep gefaseerd en verschilde per suppletie-element en suppletie-categorie. Voor de beschutte noordelijke suppletie-elementen herstelden de dichtheid en samenstelling (zowel wormsoorten als schelpdieren) binnen twee jaar tot niveaus vergelijkbaar met de omliggende plaat. Bij de matig erosieve suppletie-elementen werden vergelijkbare waarden pas na circa vijf jaar bereikt. Voor de sterk erosieve zuidelijke suppletie-elementen bleef herstel beperkt; de bodemdiergemeenschap wordt nog steeds gedomineerd door wormensoorten en schelpdieren komen in beperkte mate voor. Deze resultaten wijzen erop dat het herstel van bodemdiergemeenschappen sterk samenhangt met de lokale morfologische stabiliteit en blootstelling aan golven. Suppletie-elementen met geringe erosie en een fijnere sedimentsamenstelling blijken gunstiger voor ecologisch herstel.

Vogels

Na de aanleg van de suppletie-elementen in 2019 nam het gebruik door vogels van de nieuwe suppletie-elementen sterk af. Dit resulteerde in een tijdelijk lagere foerageertijd (de mate waarin vogels het gebied benutten, bepaald door hun aantal en de tijd die zij foerageren) op de suppletie-elementen terwijl de rest van de plaat in zijn geheel de foerageertijd in uren per hectare stabiel bleef. In de eerste jaren na aanleg concentreerde het foerageren zich daarom vooral op de niet-gesuppleerde delen van de plaat. Geleidelijk namen de vogels de suppletie-elementen weer in gebruik naarmate de bodemdiergemeenschappen en sedimenten zich herstelden. Toch worden juist twee zuidelijk gelegen suppletie-elementen welke achterblijven in bodemdierontwikkeling weer goed gebruikt, terwijl een aantal meer beschutte suppletie-elementen iets achterblijven in foerageertijd. Naast sterkere erosie en grovere sedimentsamenstelling, liggen deze suppletie-elementen ook hoger en kunnen vogels eerder beginnen met foerageren.

De ruimtelijke verdeling van vogels op de suppletie-elementen is gewijzigd ten opzichte van de situatie voor de aanleg. Sinds de aanleg benutten veel vogels de suppletie-elementen eerder in het getij omdat deze gebieden nu eerder droogvallen. Dit levert een dynamische verschuiving van foerageerlocaties op. De belangrijkste doelsoorten, waaronder bonte strandloper, scholekster, rosse grutto, wulp en zilverplevier, zijn teruggekeerd op de suppletie-elementen. Verschillen tussen soorten blijven bestaan; bijvoorbeeld de kanoet en rosse grutto, die een voorkeur hebben voor fijner sediment of lagergelegen delen van de plaat, foerageren nog minder intensief op sommige suppletie-elementen, terwijl de bonte strandloper juist frequent gebruikmaakt van de nieuwe ophoogde delen van de plaat.

Aanvullende ecologische inzichten

De aanvullende ecologische monitoring laat zien dat zeehonden een duidelijke seizoenvariatie vertonen, met hogere aantallen tussen juni en augustus. De aanleg van de suppletie-elementen heeft geen aantoonbaar effect op de populatie gehad. Oesterriffen zijn gedeeltelijk bedekt tijdens de aanleg van de suppletie-

elementen, maar de resterende natuurlijke riffen zijn stabiel gebleven, wat wijst op een robuustheid van deze habitats. Het experimenteel toepassen van een laag gebiedseigen sediment tegen een van de suppletie-elementen aan (priming) blijkt de snelheid van herkolonisatie door bodemdieren te bevorderen. Daarentegen heeft het transplanteren van kokkels op hetzelfde element geen merkbaar effect op de kolonisationsnelheid.

Synthese vanuit vogelperspectief

Om te beoordelen hoe goed de Roggenplaat aansluit bij de behoeften van foeragerende vogelsoorten zijn de drie pijlers onder het monitoringsprogramma – morfologie, bodemdieren en vogels – geïntegreerd. Daarbij is gebruikgemaakt van vogelprofielen opgesteld op basis van literatuur en kennis over de fysieke omstandigheden en voedselvoorkeuren waarop vogelsoorten het best gedijen. Dit wordt ook wel hun ecologische niche genoemd: de combinatie van omstandigheden (zoals droogvalduur, sediment en beschikbaar voedsel) waarin een vogelsoort optimaal kan leven en foerageren.

De toetsing van deze profielen aan het daadwerkelijke gebruik van de plaat laat zien dat vogels zich flexibel kunnen aanpassen aan de veranderde omstandigheden op de plaat, maar dat hun gebruik van suppletie-elementen sterk wordt bepaald door de samenhang tussen hoogteligging (en dus droogvalduur), ontwikkeling van bodemdieren en sedimentsamenstelling. Suppletie-elementen met weinig sedimentverfijning kunnen toch intensief worden gebruikt vanwege hun hogere ligging; sommige suppletie-elementen met verfijnd sediment maar lagere ligging worden juist minder benut. Dit benadrukt dat er geen enkelvoudige stuurvariabele bestaat.

Reflectie op de suppletiedoelstellingen en prognose

De primaire doelstelling van de Roggenplaat-suppletie is het behoud van de foerageerfunctie voor 25 jaar ten opzichte van het referentiejaar 2010. In de ontwerpstudie is deze doelstelling uitgedrukt in een morfologische doelindicator: behoud van het 50–80% droogvalduurareaal. Een verkennende extrapolatie van de waargenomen morfologische ontwikkelingen wijst erop dat het 50–80% droogvalduurareaal in het doeljaar 2035 mogelijk lager gaat uitvallen dan in het referentiejaar 2010. Hier past echter de nuance dat ook lagergelegen delen op de plaat, die buiten deze doelindicator vallen, bijdragen aan de foerageerfunctie en dat er minder is gesuppleerd dan in de ontwerpfase was voorzien. Bovendien is het nog onzeker hoe de suppletie-elementen en de niet-gesuppleerde gebieden (73% van het 50–80% droogvalduurareaal) zich verder gaan ontwikkelen.

Het ecologische doel, op de tijdschaal van 5 jaar, is grotendeels behaald: het gebruik door vogels is slechts beperkt beïnvloed en de Roggenplaat wordt nog steeds voldoende benut als foerageergebied, ondanks dat het herstel van de bodemdieren tot vijf jaar heeft geduurd. Naar verwachting zal de foerageerhabitat gestaag eroderen, waardoor het doelbereik op langere termijn afhankelijk is van de snelheid van deze morfologische ontwikkelingen.

Vanuit beleidsmatig perspectief wijst de analyse van de vogelprofielen erop dat het belangrijk is om bij ontwerp en evaluatie niet uitsluitend te focussen op één droogvalklasse zoals de huidige 50–80%-indicator, maar om te zorgen voor voldoende variatie in fysieke omstandigheden binnen en tussen suppletie-elementen. Verschillende vogelsoorten hebben net andere voorkeuren, en een gevarieerd mozaïek aan hoogten, droogvalduren en sedimentsamenstellingen biedt de grootste kans dat meerdere soorten blijvend aansluiten op hun niche en foerageergedrag. Dit pleit voor een suppletiestrategie die inzet op diversiteit als robuustheidsprincipe in plaats van op één uniform doelbereik.

Vervolgmonitoring

Vanwege de onzekerheden in de morfologische dynamiek op langere termijn, die bepalend is voor de beschikbaarheid van droogvallend habitat en het voorkomen van bodemdieren, is een beperkte maar gerichte vorm van vervolgmonitoring nodig. Het advies is om de komende jaren de ontwikkeling van bodemhoogte, droogvalduur en vogelgebruik te blijven volgen. Dit maakt het mogelijk om tijdig trends te signaleren die kunnen duiden op verminderde habitatkwaliteit en om waar nodig aanvullende maatregelen te verkennen.

Kennisontwikkeling

Het project heeft belangrijke inzichten opgeleverd voor het ontwerp van toekomstige suppleties en zijn ook al benut voor het ontwerp van de aanstaande suppleties op de Galgeplaat en de Slikken van den Dortsman. De introductie van vogelprofielen, die fysieke condities koppelen aan soortspecifiek foerageergedrag, biedt een praktisch instrument om ecologische kennis direct te vertalen naar ontwerp- en sedimentkeuzes. Een belangrijke les is dat suppletie-ontwerpen niet moeten sturen op één uniforme droogvalduur, maar op een variatie aan hoogtes en sedimenttypen, zodat verschillende soorten voldoende passend habitat vinden. Dit rapport vormt daarmee een waardevolle basis voor toekomstig adaptief, natuurgericht suppleren.

Leeswijzer

Dit eindrapport bevat de resultaten van vijf jaar monitoring (2019–2024) van de Roggenplaatsuppletie in de Oosterschelde en markeert de afronding van het project. Het eindrapport bouwt voort op de eerdere rapportages over de uitgangssituatie (T0) en de ontwikkelingen in de eerste jaren na aanleg (T1–T3) (Wallès et al., 2021a, 2021b; Escaravage et al., 2024). Waar de eerdere rapportages zich richtten op afzonderlijke disciplines en korte-termijnontwikkelingen, biedt dit eindrapport een geïntegreerde synthese van vijf jaar monitoring, met speciale aandacht voor de samenhang tussen morfologie, ecologie en de foerageerfunctie van de getijdenplaat door vogels.

De hoofdstukindeling is als volgt:

Hoofdstuk 1 geeft een inleiding en kadert de doelstellingen, onderzoeksvragen en opzet van de monitoring.

Hoofdstuk 2 bevat een samenvattende beantwoording van de evaluatievragen, op basis van de monitoringgegevens over morfologie, bodemdieren, oesterriffen, vogels en zeehonden. De onderliggende analyses zijn in detail terug te vinden in de bijlagen.

Hoofdstuk 3 gaat in op de kennisvragen. Hierin worden de waarnemingen en trends verdiept en wordt een samenhang geschetst tussen morfologische en ecologische ontwikkelingen. De bijlagen geven ook voor deze onderzoeksvragen de onderliggende analyses.

Hoofdstuk 4 brengt de inzichten uit de voorgaande hoofdstukken samen tot een geïntegreerd beeld van vijf jaar eco-morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat. Daarbij ligt de nadruk op de samenhang tussen hydromorfologie, sedimentdynamiek en bodemdieren vanuit het perspectief van de vogels welke de getijdenplaat als foerageergebied gebruiken.

Hoofdstuk 5 reflecteert op de oorspronkelijke suppletiedoelstellingen en bevat voor zo ver als mogelijk een prognose tot 2035.

Hoofdstuk 6 sluit af met conclusies en aanbevelingen voor toekomstige suppleties voor natuur en kennisontwikkeling.

De **bijlagen** bevatten de uitgebreide analyses waarop de samenvattende resultaten in het hoofdrapport zijn gebaseerd. Per discipline (morfologie, bodemdieren, vogels, zeehonden, priming, sediment dynamiek en vogelprofielen) zijn de volledige methoden, datasets en uitwerkingen beschikbaar.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Roggenplaatsuppletie is een uniek project in Nederland, zowel qua schaal als doelstelling. Waar zandsuppleties doorgaans worden toegepast om kustlijnen te beschermen of infrastructuur te beveiligen, stond hier één primair doel centraal: het behoud en herstel van foerageerhabitat voor kust- en wadvogels in de Oosterschelde. Deze suppletie vormt daarmee een voorbeeld van zand als natuurbehoudmaatregel: een grootschalige ingreep om het verlies van intergetijdengebied door erosie tegen te gaan (van der Werf et al., 2016b).

De Oosterschelde is vanwege haar uitzonderlijke ecologische waarde aangewezen als Ramsar Wetland, Natura 2000-gebied, en sinds 2002 ook als Nationaal Park. Het gebied is van internationaal belang als broed- en overwinteringsgebied voor kust- en moerasvogels én als essentiële tussenstop voor trekvogels. Binnen de habitatrictlijn valt de Oosterschelde onder habitatype H1160 "Grote baaien": open water met droogvallende platen en slikken, een habitat dat in Nederland uitsluitend in de Oosterschelde voorkomt (<https://www.natura2000.nl/gebieden>). Het behoud van getijdennatuur en de foerageerfunctie binnen de Oosterschelde is daarom van groot nationaal en internationaal belang.

1.1.1 Zandhonger

Met de aanleg van de stormvloedkering en compartimenteringsdammen in de jaren tachtig is de hydrodynamiek in de Oosterschelde ingrijpend veranderd. Het getijdenvolume nam sterk af en het debiet werd door de stormvloedkering aanzienlijk gereduceerd. Als gevolg hiervan daalden de stroomsnelheden in de geulen, waardoor het natuurlijke evenwicht tussen erosie en sedimentatie verstoord raakte: dit verschijnsel wordt zandhonger genoemd (de Ronde et al., 2013; van Zanten & Adriaanse, 2008).

Door de afname van het transportvermogen van het water wordt onvoldoende sediment van lagere naar hogere delen verplaatst. Bij rustig weer is de sedimentatie ontoereikend om de slikken en platen op te bouwen, terwijl stormen wél voor afbraak zorgen. Het nettoresultaat is er structureel meer erosie optreedt ten opzichte van sedimentatie. Deze morfologische onbalans vertaalt zich in een geleidelijke verlaging van de intergetijdengebieden met ongeveer 1 cm per jaar, waardoor steeds meer delen onder de laagwaterlijn verdwijnen (zie historische ontwikkeling Roggenplaat in B1.3). In termen van oppervlakte komt dit overeen met een verlies van circa 80 tot 100 hectare intergetijdengebied per jaar (van Zanten & Adriaanse, 2008). Hierdoor nemen zowel het totale areaal als de gemiddelde droogvalduur van de platen af.

Vooraf de zones die 50–80% van de tijd droogvallen —belangrijke foerageergebieden voor steltlopers (Zwarts et al., 2011; van Zanten & Adriaanse, 2008)— nemen sterk af. De Roggenplaat vertoont zelfs een snellere afname van areaal met deze droogvalduur dan andere deelgebieden in de Oosterschelde (de Ronde et al., 2013; Witteveen+Bos, 2011). Dit leidt niet alleen tot verlies van foerageerhabitat voor vogels, maar tast op termijn ook de waterveiligheidsfunctie van de platen aan. Door afname van ondiepe, golfdempende voorlanden worden golven minder geremd (Zandvoort et al., 2019).

1.1.2 Suppletiestrategie en de Roggenplaat

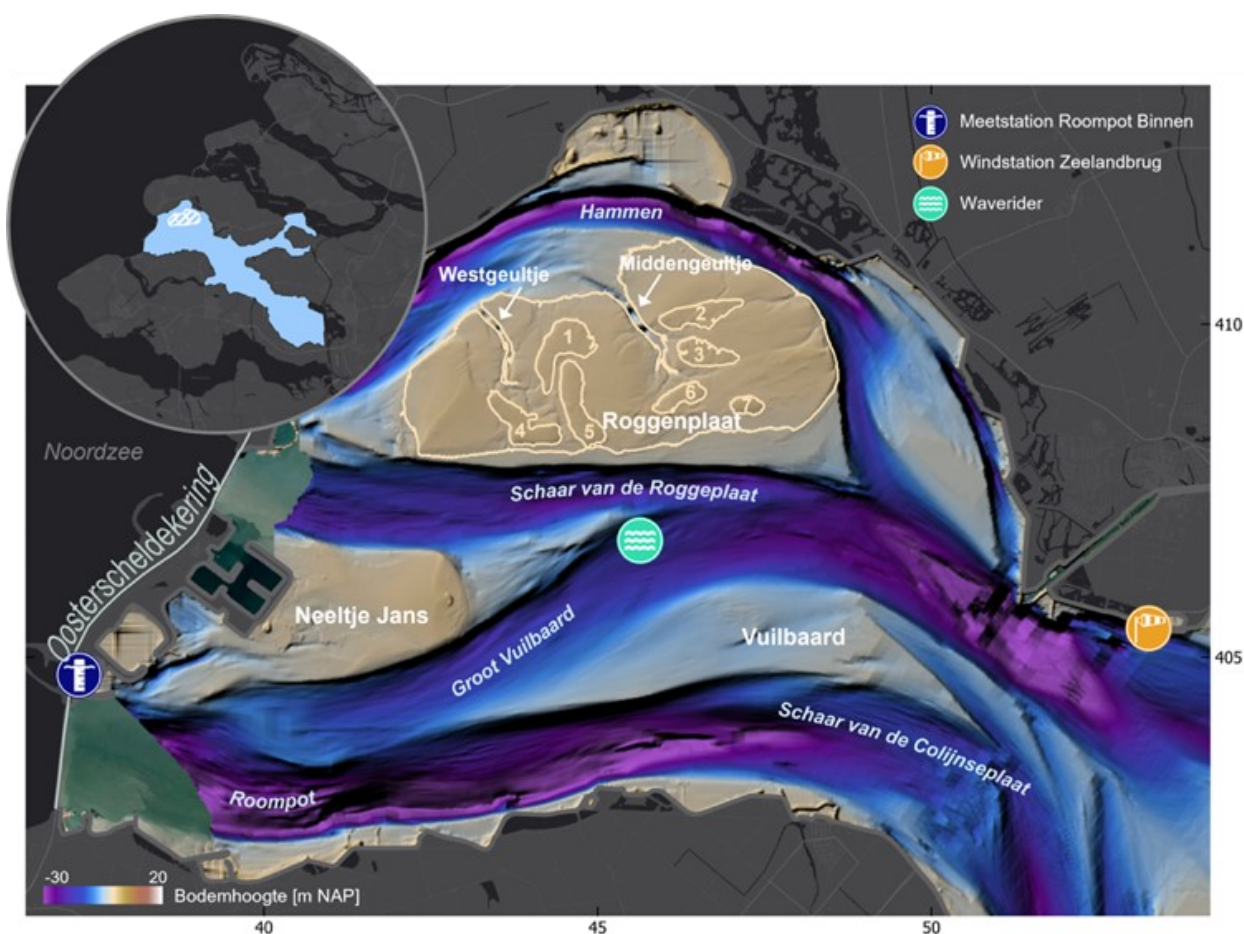
Om de negatieve trend van zandhonger te keren, gaven het Ministerie van Infrastructuur & Milieu en het Ministerie van Economische Zaken in 2007 opdracht tot de MIRT-verkenning Zandhonger Oosterschelde (Witteveen+Bos, 2011). Uit deze verkenning volgde dat grootschalige zandsuppleties op korte termijn de enige realistische en maatschappelijk breed gedragen maatregel vormden om de foerageerfunctie van de Oosterschelde voor steltlopers te behouden. Tegelijkertijd werd geconcludeerd dat aanvullende kennis noodzakelijk was om suppleties zodanig vorm te geven dat niet alleen de natuurfunctie, maar ook de ecologische kwaliteit en lange-termijnduurzaamheid gewaarborgd blijven.

Eerdere pilots, zoals de Proefsuppletie Galgeplaat (van der Werf et al., 2015), de Cascadeproef Schelphoek, en de Veiligheidsbuffer Oesterdam (Boersema et al., 2018), leverden waardevolle inzichten op over het ontwerp, de uitvoering- en de morfodynamische effecten van suppleties in intergetijdengebieden.

Gezien de urgentie door afname van het areaal foerageergebied is in 2014 besloten de Roggenplaat als eerste grootschalig te suppleren (Bestuurlijk Overleg MIRT Zeeland, 2014). In het najaar van 2019 werd in totaal 1,1 miljoen m³ zand aangebracht, verdeeld over zeven suppletie-elementen met een gezamenlijke oppervlakte van 211 hectare en een dikte tussen de 30 en 80 cm (Wallis et al., 2021b).

De doelstellingen van de Roggenplaat-suppletie zijn driedig (van der Werf et al., 2016b):

1. Behoud van de huidige foerageerfunctie van het Roggenplaat/Neeltje Jans-complex voor de komende 25 jaar;
2. Voorkomen van een ongewenste golfaanval op de zuidkust van Schouwen.;
3. Ontwikkelen van kennis voor flexibel, klimaatbestendig en kosteneffectief kustmanagement.



Figuur 1-1. Overzichtsfiguur van de Roggenplaat en omgeving op basis van de Vaklodingen uit 2021. De laagwatercontour (-1.2 m NAP) van de Roggenplaat is weergegeven, evenals de contouren van de zeven suppletie-elementen. De locatie van het waterstandsstation Roompot Binnen, het windmeetstation Zeelandbrug en de golfmeetlocatie Waverider zijn weergegeven. De namen van geulen en platen zijn aangegeven.

1.2 Projectbeschrijving
















1.2.1 Doel en fasering

Het hoofddoel van de Roggenplaat-suppletie is vastgelegd als:

“Behoud van de huidige foerageerfunctie van het Roggenplaat/Neeltje Jans-complex voor de komende 25 jaar” (van der Werf et al. 2016b)

De term ‘*huidige foerageerfunctie*’ verwijst naar de situatie in het referentiejaar 2010. Deze foerageerfunctie richt zich in het bijzonder op de Natura 2000-doelsoorten: veertien benthos-etende vogelsoorten (Tabel 1-1, dertien steltlopers en de bergeend) die grotendeels afhankelijk zijn van droogvallende getijdenplaten voor hun voedsel (van der Werf et al., 2016b). Ook andere kustvogels kunnen profiteren van de suppletie-elementen, en worden daarom meegenomen in de monitoring. Daarnaast wordt, op basis van de opgedane kennis, gewerkt aan de verdere kennisontwikkeling voor flexibel, klimaatbestendig en kosteneffectief management van foerageergebieden (doel 3).

Tabel 1-1. Overzicht van de Natura 2000 doelsoorten. Bron silhouetten: www.phylopic.org

Naam	
steenloper (<i>Arenaria interpres</i>)	
bonte strandloper (<i>Calidris alpina</i>)	
kanoet (<i>Calidris canutus</i>)	
strandplevier (<i>Charadrius alexandrinus</i>)	
bontbekplevier (<i>Charadrius hiaticula</i>)	
scholekster (<i>Haematopus ostralegus</i>)	
rosse grutto (<i>Limosa lapponica</i>)	
wulp (<i>Numenius arquata</i>)	
zilverplevier (<i>Pluvialis squatarola</i>)	
kluut (<i>Recurvirostra avosetta</i>)	
bergeend (<i>Tadorna tadorna</i>)	
zwarte ruiter (<i>Tringa erythropus</i>)	
groenpootruiter (<i>Tringa nebularia</i>)	
tureluur (<i>Tringa totanus</i>)	

Om het hoofddoel, het behouden van de foerageerfunctie van het Roggenplaat–Neeltje Jans-complex, te kunnen beoordelen, is de monitoring gericht op twee samenhangende doelbereiken: een morfologisch doelbereik en een ecologisch doelbereik. Deze doelbereiken zijn niet als formele normen vastgelegd in het projectplan, maar volgen uit de functionele eisen die in de ontwerp- en achtergrondstudies zijn beschreven (van der Werf et al., 2016b).

Morfologisch doelbereik – voldoende droogvallend oppervlak

Voor een goed functionerend foerageergebied is een areaal droogvallende platen van toereikende omvang essentieel. In de ontwerpfase is hiervoor gewerkt met een functionele morfologische indicator: een droogvalduur van 50–80% van de getijdencyclus. Deze bandbreedte is gekozen omdat steltlopers – en vooral de kleinere soorten zoals bonte strandloper en kanoet – een substantieel deel van de laagwaterperiode nodig hebben om effectief te foerageren. Een verdere verlaging van de plaat zou leiden tot verkorting van de beschikbare foerageertijd en daarmee tot een verminderd draagvlak voor de

vogelpopulaties. Het morfologisch doelbereik richt zich daarom op het herstel en behoud van voldoende areaal hooggelegen intergetijdengebied, zodat voldoende tijd hebben om te foerageren.

Ecologisch doelbereik – behoud van draagkracht voor benthos-etende vogels

De ecologische toetsing richt zich op de vraag of de Roggenplaat na de suppletie haar functie behoudt als voedselgebied voor de doelsoorten (Tabel 1-1). Omdat de foerageerfunctie uiteindelijk wordt bepaald door het samenspel van bodemhoogte, droogvalduur, benthosaanbod en verstoring, is ervoor gekozen de vogelaantallen als sleutelindicator te gebruiken. Het ecologische doelbereik wordt daarmee gedefinieerd als: het behoud van de aantallen benthos-etende kustvogels op het niveau van vóór de suppletie (referentie 2010). Constante of herstellende aantallen worden geïnterpreteerd als een aanwijzing dat de draagkracht van het systeem, de beschikbaarheid en benutbaarheid van voedsel, op peil blijft.

Samen vormen deze twee doelbereiken het toetsingskader voor de monitoring in de eerste vijf jaar en de vervoljaren. Zij beschrijven de fysieke randvoorwaarden (morfologie) en de functionele uitkomst (ecologie) die gezamenlijk bepalen of de foerageerfunctie van de Roggenplaat behouden blijft. Om deze doelbereiken in de tijd te kunnen volgen en beoordelen, is het suppletieproject ingericht met een meerjarig monitoring- en evaluatieopzet.

Het suppletieproject bestond uit drie fasen:

- Planfase (2015–2016): ontwerp, vergunningen en T0-monitoring;
- Uitvoering (2019): aanleg van de suppletie;
- Evaluatie (2019–2024): monitoring van morfologie, bodemdieren en vogels.

Het voorliggende eindrapport bevat de resultaten van vijf jaar monitoring en vormt de afsluiting van de laatste fase van het suppletieproject.

1.2.2 Evaluatie- en kennisvragen

Om de vastgestelde doelstellingen te evalueren, zijn er twee type vragen opgesteld: de evaluatievragen en kennisvragen. De evaluatievragen zijn bedoeld om hoofddoelstelling 1 te toetsen en om te bepalen of het beoogde morfologisch en ecologisch doelbereik is gerealiseerd. De kennisvragen richten zich op hoofddoelstelling 3: ze bieden inzicht in de onderliggende processen die de ontwikkeling van de Roggenplaat en de suppletie-elementen bepalen, en helpen verklaren waarom bepaalde uitkomsten optreden. In deze sectie worden beide type vragen expliciet beschreven, zodat in de rest van het rapport kan worden teruggegrepen op de resultaten en inzichten die zij opleveren.

Gedurende het monitoringproject zijn de oorspronkelijke evaluatie- en kennisvragen (vastgelegd in het monitoringsplan; Ysebaert et al., 2016) aangescherpt. Evaluatie- en kennisvragen zijn, indien relevant, samengevoegd of verder verfijnd, en waar nodig zijn er nieuwe vragen toegevoegd. Dit heeft geleid tot de set vragen die in dit eindrapport wordt gepresenteerd (Tabel 1-2) en in de volgende hoofdstukken worden beantwoord.

Tabel 1-2. Overzicht van de evaluatie- (E) en kennisvragen (K) behandeld in deze rapportage voor de verschillende onderdelen (morfologie, voedselbeschikbaarheid voor vogels, natuurlijke oesterriffen, steltlopers en zeehonden).

Morfologie	
E	<p>1. Hoe verandert het areaal droogvalduur op de gehele Roggenplaat in de jaren vóór en in de eerste vijf jaar na aanleg van de suppletie?</p> <p>2. Hoe ontwikkelen de suppletie-elementen zich morfologisch en is dit afhankelijk van de locatie op de Roggenplaat?</p>
K	<p>1. Welke processen liggen ten grondslag aan de morfologische veranderingen van de Roggenplaat en specifiek de suppletie-elementen?</p> <p>1.1. Wanneer en waar treedt vooral erosie op (bijvoorbeeld bij stormen)?</p> <p>1.2. Blijft het geërodeerde suppletiesediment in de nabijheid van de suppletie-elementen of komt het (ook) elders terecht?</p> <p>1.3. Hoe is de sedimentsamenstelling op de Roggenplaat en specifiek de suppletie-elementen veranderd?</p> <p>1.4. Zijn er niet-gesuppleerde gebieden (geulen, intergetijdengebied) die beïnvloed worden door de aanwezigheid van de suppletie-elementen, vindt er bijvoorbeeld geulvorming plaats?</p> <p>1.5. Hoe is de stroming en afwatering op de Roggenplaat en in de oostelijke geul (het Middengeultje) veranderd door de aanleg van de suppletie-elementen?</p>

	<p>1.6. <i>Hebben oesterriffen een rol in het vasthouden van (gesuppleerd) sediment op de Roggenplaat?</i></p> <p>2. <i>Zijn er ruimtelijke verschillen in de orde van grootte van de dagelijkse sedimentdynamiek op de Roggenplaat en specifiek rondom de suppletie-elementen?</i></p> <p>2.1. <i>Wat is de invloed van golven en getijden op de dagelijkse sedimentdynamiek, en worden de suppletie-elementen anders beïnvloed vergeleken met de niet-gesuppleerde gebieden?</i></p>
--	--

Bodemdieren (voedselbeschikbaarheid voor vogels)

E	1. Hoe ontwikkelt de voedselbeschikbaarheid voor vogels (i.e. bodemdieren) zich op de Roggenplaat na uitvoering van de suppletie?
	2. Hoe ontwikkelt de bodemdiergemeenschap zich op de afzonderlijke suppletie-elementen?
K	1. <i>Wat is de relatie tussen het voorkomen van bodemdieren op de Roggenplaat en de factoren droogvalduur, hydrodynamica en/of sedimentsamenstelling?</i>
	2. <i>Is de ontwikkeling van de bodemdiengemeenschappen op de suppletie-elementen gerelateerd aan veranderingen in droogvalduur, hydrodynamica, sedimentsamenstelling, etc.?</i>
	3. <i>Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie?</i>
	3.1. <i>Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie met gebiedseigen sediment en een (gedeeltelijk) levende bodemdiergemeenschap ('priming')?</i>
	3.2. <i>Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie met het transplanteren van kokkels ('kokkelpriming')?</i>

Vogels

E	1. Hoe wordt de Roggenplaat gebruikt door benthos-etende vogels_in ruimte en tijd?
	2. Welke soorten komen voor en in welke aantallen?
K	1. <i>Is de verspreiding van benthos-etende vogels gerelateerd aan factoren zoals droogvalduur, sedimentsamenstelling (vochtgehalte) en voedselbeschikbaarheid?</i>
	2. <i>Hoe worden de suppletie-elementen benut door benthos-etende vogels in vergelijking tot niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat?</i>

Natuurlijke riffen

E	1. Hoe ontwikkelen de natuurlijke oesterriffen zich in de periode 2018-2024 op de Roggeplaat?
K	1. <i>Hebben natuurlijke oesterriffen een rol in het vasthouden van (gesuppleerd) sediment op de Roggenplaat (ondergebracht bij kennisvragen morfologie 1.6)</i>

Zeehonden

E	1. Hoe ontwikkelt de zeehondenpopulatie zich op de Roggenplaat sinds 2018 (in vergelijking met de Oosterschelde populatie)
---	---

1.2.3 Opzet monitoring

Het monitoringsprogramma is specifiek ontworpen om het behoud van de foerageerfunctie van de Roggenplaat-suppletie systematisch te evalueren (doelstelling 1) en tegelijk nieuwe kennis te ontwikkelen voor toekomstig beheer en ontwerp (doelstelling 3). Voor de beantwoording van de evaluatie- en kennisvragen is een combinatie van morfologische en ecologische metingen uitgevoerd. Zo werd het mogelijk gemaakt om zowel veranderingen in plaatvorm en dynamiek als de gevolgen voor foerageergebieden en ecologische functies nauwkeurig te volgen.

De monitoring op de Roggenplaat is uitgevoerd door Rijkswaterstaat, Wageningen Marine Research (WMR), Deltares, het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ), Deltamilieu Projecten en de HZ University of Applied Sciences. Gezamenlijk verzamelden deze partijen een brede set fysische en ecologische gegevens (Tabel 1-3), variërend van bodemhoogte, sedimentopbouw en hydrodynamiek tot bodemdieren, vogels, oesterriffen en zeehonden. Deze informatie is cruciaal voor het beoordelen van de effecten van de suppletie-elementen op de ontwikkelingen van de plaat en voor het vergroten van de kennisbasis voor

toekomstige maatregelen, zoals de geplande suppletie in het Middengebied van de Oosterschelde (De Vet et al., 2023).

De dataverzameling op de Roggenplaat is in meerdere opzichten uniek. Het programma omvat een groot aantal meetlocaties, bestrijkt een uitzonderlijk brede reeks parameters, van stroming en golven tot macrofauna en vogels, en loopt over voldoende jaren om zowel suppletiegerelateerde veranderingen als natuurlijke variabiliteit betrouwbaar te onderscheiden. Samen vormt dit een ongekend rijke dataset die als referentie kan dienen voor toekomstige suppleties binnen de Oosterschelde en vergelijkbare systemen elders.

Morfologische monitoring

De morfologische monitoring (Tabel 1-3, Figuur 1-2) richt zich op de ontwikkeling van de hoogte, vorm en dynamiek van de Roggenplaat en de suppletie-elementen. Hierbij zijn verschillende technieken geïntegreerd:

- LIDAR (jaarlijks) biedt een volledig hoogtebeeld van de gehele plaat.
- RTK-raaimetingen (viermaal per jaar in 2020–2022, tweemaal per jaar in 2023–2024) worden ingezet voor kalibratie en validatie van LIDAR en geven gedetailleerd inzicht in veranderingen langs vaste profielen.
- Zakbakens, geplaatst tijdens de aanleg, worden periodiek ingemeten om zettingen van het suppletiemateriaal te volgen.
- Stromingsmetingen en multibeam in het Middengeultje laten zien of de hydrodynamiek is gewijzigd door de suppletie-elementen en geven inzicht in erosie- en sedimentatieprocessen.
- SED-sensoren (Surface Elevation Dynamics) meten continu de dagelijkse sedimentatie- en erosiedynamiek, in combinatie met golfmetingen, om te bepalen bij welke omstandigheden hoogteveranderingen optreden.

Deze morfologische gegevens maken het mogelijk om trends vast te stellen zoals de structurele erosie en het verlies van intergetijdengebied per jaar, en om te bepalen in hoeverre de suppletie-elementen deze trends compenseren.

Ecologische monitoring

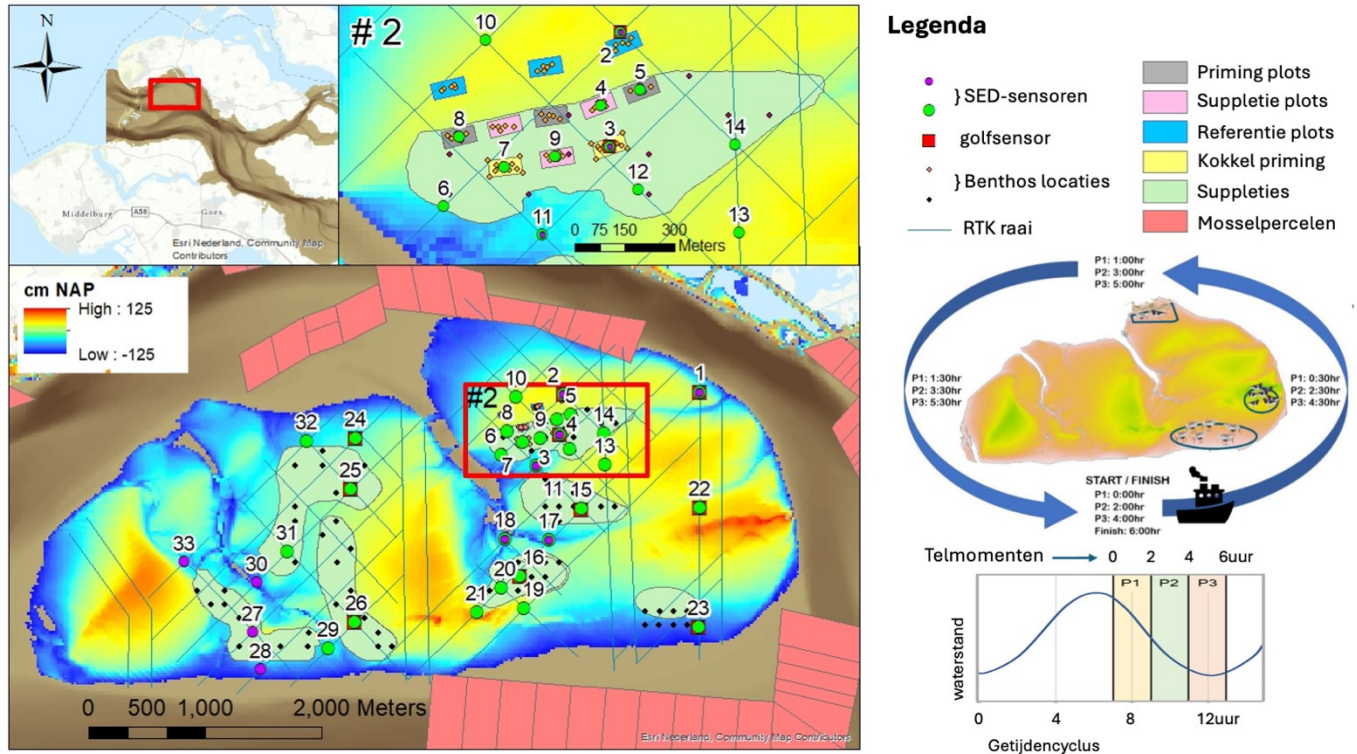
De ecologische monitoring (Tabel 1-3, Figuur 1-2) richt zich op de conditie van de voedselketen en het gebruik van de plaat door vogels en andere fauna:

- Benthosmonsters (jaarlijks op suppletie-elementen; op de hele Roggenplaat in 2022 en 2024) brengen biomassa, soortensamenstelling en herstelprocessen van bodemdieren in kaart.
- Kwalitatieve benthos-opnamen bieden aanvullende informatie over verspreiding en soortensamenstelling.
- Laagwatertellingen van vogels (8 keer per jaar) laten zien hoe verschillende vogelsoorten de suppletie-elementen benutten, en vormen de kernindicator voor het ecologische doelbereik.
- Oester- en kokkelmonitoring (WOT-programma) volgen natuurlijke riffen en schelpdierbestanden als onderdeel van het bredere ecosysteem.
- Zeehondentellingen monitoren eventuele neveneffecten van de ingreep op deze rust- en foerageerdieren.
- Priming-experiment is een innovatief onderdeel van de monitoring, waarbij gebiedseigen sediment tegen een suppletie-element is teruggebracht om herstel te versnellen en de voedselbeschikbaarheid eerder op niveau te brengen. Het experiment levert waardevolle kennis op over herstelprocessen en mogelijke toepassingen voor toekomstige suppletie-elementen.

Tabel 1-3. Overzicht van de monitoringactiviteiten.

Monitoring activiteit	Uitvoering	Beschrijving
Morfologie		
Stromingsmetingen	RWS	Stromingsmetingen zijn eenmalig na aanleg uitgevoerd in het Middengeultje en op de plaat (2021). Deze metingen zijn grotendeels op dezelfde locaties uitgevoerd als de metingen vóór aanleg (2015/2017).
LIDAR	RWS	LIDAR metingen voor de bepaling van de bodemhoogte zijn elk jaar eenmalig uitgevoerd met een aanvullende meting in het jaar na suppleren (2020).
RTK MLTW	RWS	De RTK MLTW metingen zijn bedoeld om de bodemhoogte in te meten over vaste raaien en worden binnen de reguliere RTK monitoring elk jaar eenmalig uitgevoerd in het voorjaar. In de vijfjarige opvolging van de suppletie-elementen is de frequentie van deze metingen verhoogd (gelijk aan de frequentie van de RTK extra metingen).
RTK extra	RWS	Binnen dit monitoringproject zijn extra RTK-raaimetingen uitgevoerd (zie Bijlage 1) en is de meetfrequentie verhoogd (viermaal per jaar in 2020-2022 en tweemaal per jaar in 2023-2024).
Zakbaken (m.b.v. RTK)	RWS	De zakbakens die bij aanleg van de suppletie-elementen zijn geplaatst, zijn ingemeten om zettingen van de suppletie-elementen te monitoren.
SED-sensoren	NIOZ	SED sensoren kunnen het hele jaar door Sedimentatie Erosie Dynamiek meten. De SED-sensoren zijn geplaatst op verschillende locaties en meten over de periode 2020 t/m 2024 continu.
Golven	NIOZ	Golfmetingen op de plaat hebben bijgedragen aan numerieke modellering. De golfmetingen zijn verder gebruikt om een relatie te leggen met de gemeten sedimentatie- en erosiedynamiek. Ook is een golfboei voor dit project uitgezet (sinds 2015) ten zuiden van de Roggenplaat.
Sedimentsamenstelling	WMR & NIOZ	Sedimentmonsters zijn jaarlijks, in september, tegelijkertijd met de benthosmonsters op de Roggenplaat en de suppletie-elementen genomen.
Multibeam	RWS	Multibeam metingen om de waterdiepte in het Middengeultje te bepalen zijn tot viermaal per jaar uitgevoerd. Het Westgeultje is eenmaal na aanleg ingemeten.
Ecologie		
Laagwater tellingen vogels	DPM	Vogeltellingen worden elk jaar gedaan in: Januari, Februari, Maart, Mei, Augustus, Oktober, November en December door DPM tijdens laagwater. Data analyse- wordt uitgevoerd door WMR.
Verspreiding bodemdieren	WMR	In 2022 en 2024 werd in september een bemonstering van de Roggenplaat uitgevoerd.
WOT-oesters	WMR	Elk jaar in februari en maart werd een lang lopende monitoring van het bestand van natuurlijke oesterriffen uitgevoerd. Afwisselend werd deze monitoring uitgevoerd middels luchtfoto's of het inlopen van transecten.
WOT-kokkels	WMR	Dit is al een lang lopende monitoring naar het kokkelbestand die elk jaar in februari en maart wordt uitgevoerd.
Benthos op suppletie-elementen	WMR	Benthos bemonsteringen op de suppletie-elementen werden elk jaar gedaan in september.

Kwalitatieve benthos opname	RWS	Kwalitatieve benthos opnames werden elk jaar gedaan in september.
Zeehonden MWTL	MWTL	Zeehonden tellingen worden maandelijks uitgevoerd in kader van MWTL, met uitzondering van de maanden september en oktober.
Benthos priming		
Priming	NIOZ	Een bemonstering van de benthos was voor 2020 elk kwartaal gepland en in 2022 en 2024 in september.



Figuur 1-2. Overzicht van de meetopzet op de Roggenplaat. Linksonder: Locaties van de verschillende metingen: SED-sensoren, golfloggers, benthos bemonstering en RTK raaien. In de inzet (middenboven) bij suppletie 2 zijn de verschillende experimentele plots weergegeven: grijs = geprimed met een toplaag omgevings sediment, roze = 'kale' suppletie, blauw = referentie/onverstoord gebied, geel = 'kale' suppletie geprimed met individuele kokkels. Ook zijn de locaties aangegeven waar benthosmonsters (incl. sedimentsamenstelling) zijn verzameld (zie Fig B1-3 voor meer details). Rechts: visualisatie van de laagwatertellingen voor vogels. De boot vaart driemaal tegen de klok in rond de plaat (ca. 2 uur per ronde), waarbij vogels per telling in polygonen worden ingetekend. Tellingen vinden plaats in de overgang van hoog naar laagwater (zie Fig B3-1 voor meer details).

Tot aan voorliggend T5-rapport zijn verschillende tussenresultaten beschreven: de T0- (2015-2019), en T1- (2020) monitoring zijn terug te vinden in Wallis et al., (2021); en de tussenresultaten voor T2- (2021) en T3- (2022) monitoring zijn te vinden in Escaravage et al., (2024). Dit voorliggende T5-rapport is het sluitstuk van de vijfjarige monitoring van de morfologische en ecologische ontwikkelingen van de Roggenplaat suppletie (2019 - 2024). Het rapport omvat een integrale interpretatie van de resultaten over de gehele periode. De nadruk in dit rapport daarom op synthese: we brengen samen wat er na vijf jaar monitoring is geleerd over het functioneren van de suppletie-elementen als foerageergebied voor kustvogels en trekken lessen voor toekomstige ingrepen in de Oosterschelde en daarbuiten.

1.2.4 Rolverdeling en verantwoording

WMR is in opdracht van Rijkswaterstaat penvoerder van het monitoringsproject, in samenwerking met de consortiumpartners Deltares, Deltamilieu Projecten en NIOZ. Rijkswaterstaat heeft in belangrijke mate bijgedragen aan de uitvoering en metingen (zie Tabel 1-3) en heeft actief meegedacht bij de integratie van de projectresultaten. In een eerdere fase van de monitoring was ook HZ University of Applied Sciences betrokken. Dit hoofdrapport is een gezamenlijk product van WMR en Deltares, waarbij WMR de penvoerder is.

Deltares is verantwoordelijk voor de analyses van de morfologische ontwikkelingen van de Roggenplaat, inclusief suppletie-elementen en de rol van de natuurlijke oesterriffen (Bijlage 1). NIOZ heeft bijgedragen met analyses van de dagelijkse sedimentdynamiek op basis van SED- en golfddata (centrale kennisvraag morfologie 2) en met de primingexperimenten (centrale kennisvraag bodemdieren 3). WMR is verantwoordelijk voor de analyse van het gebruik van de Roggenplaat en de suppletie-elementen door benthos-etende vogels, zoals steltlopers en bergeenden, en voor de ontwikkeling van bodemdieren (benthos) als voedsel voor vogels, oesterriffen en zehonden. Daarnaast evalueert WMR het experiment met priming op suppletie-element 2.

De kwaliteitsborging (interne review) is uitgevoerd onder de verantwoordelijkheid van WMR, met uitzondering van de morfologische analyses (paragrafen 2.1, 3.1 - behalve centrale kennisvraag morfologie 2 - en 5.1 evenals Bijlage 1), die intern zijn gereviewd door Deltares. Delen over de dagelijkse sedimentdynamiek met betrekking tot centrale kennisvraag morfologie 2 zijn door NIOZ opgesteld en gereviewd (Bijlage 6).

2 Beantwoording evaluatievragen

Dit hoofdstuk presenteert de beantwoording van de evaluatievragen (Tabel 1-2) op basis van de monitoringresultaten van de Roggenplaat in de eerste vijf jaar na aanleg (2020–2024). Per thema wordt een beknopt antwoord op de gestelde vragen gegeven, terwijl de uitgebreide analyses en onderbouwingen in de bijlagen van dit rapport te vinden zijn. Per evaluatievraag wordt verwezen naar de desbetreffende secties voor meer detail.

De bespreking volgt de opzet van de monitoring:

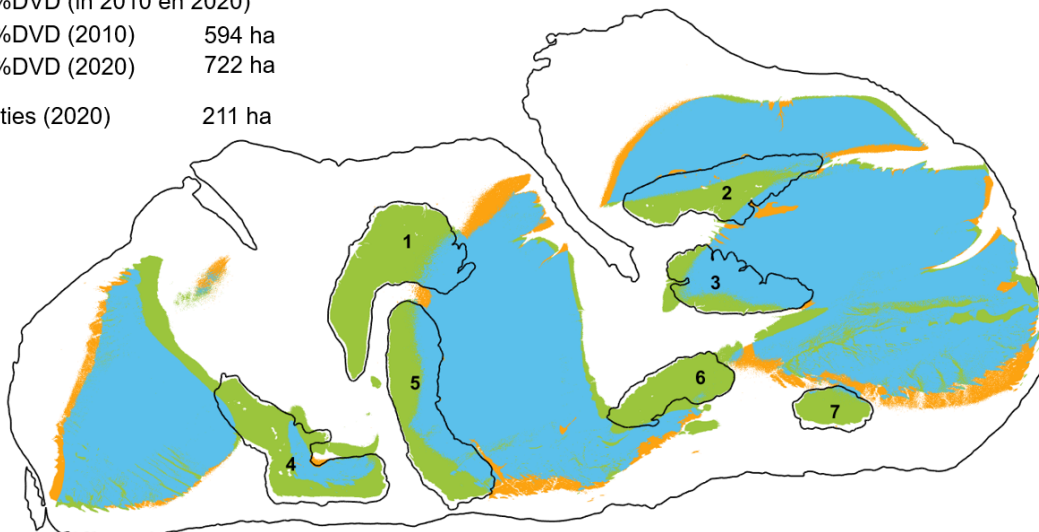
- Morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat en de suppletie-elementen (bijlage 1).
- Ontwikkeling van bodemdieren op zowel de plaat als de suppletie-elementen (bijlage 2).
- Gebruik door benthos-etende vogels in relatie tot de suppletie-elementen (bijlage 3).

De uitgebreide analyses in de bijlagen bieden een gedetailleerd inzicht in de eco-morfologische dynamiek van het gebied in de vijf jaar na aanleg. Deze inzichten vormen een belangrijke basis voor verdere evaluatie en leveren waardevolle handvatten voor het ontwerp van toekomstige suppletieprojecten.

2.1 Morfologie

De morfologische monitoring dient het evalueren van de projectdoelstellingen en het kunnen verklaren van de morfologische ontwikkelingen van de Roggenplaat(suppleties). Het primaire doel van de Roggenplaat-suppletie is het behoud van de foerageerfunctie van het Roggenplaat/Neeltje Jans-complex voor 25 jaar ten opzichte van het referentiejaar 2010. In de ontwerpfase (Van der Werf et al., 2016b) is deze doelstelling wat betreft de morfologische karakteristieken geconcretiseerd tot het behoud van het areaal met een droogvalduur van 50-80%. Figuur 2-1 geeft een overzicht van het aanwezige areaal met een droogvalduur van 50-80% vóór (2010; referentiejaar) en direct na (2020) suppleren. Daarnaast toont dit figuur de contouren van de zeven suppletie-elementen direct na suppleren (2020).

● 50-80%DVD (in 2010 én 2020)	
● 50-80%DVD (2010)	594 ha
● 50-80%DVD (2020)	722 ha
① suppleties (2020)	211 ha



Figuur 2-1. De zones op de Roggenplaat met een droogvalduur van 50-80% van september 2010 (referentiejaar), februari 2020 (direct na suppleren) en de overlappende zones (zowel in september 2010 als in februari 2020). De 7 suppletiecontouren zijn weergegeven op basis van de eerste bodemopname na suppleren (februari 2020). Opgemerkt wordt dat het areaal 50-80% droogvalduur van 2010 iets afwijkt van de waarde in de ontwerpstudie (606 ha; Van der Werf et al., 2016b). In deze gehele monitoringstudie wordt namelijk uitgegaan van LiDAR data na correctie met RTK-raaimetingen (Bijlage B1.2.4).

In hoeverre de suppletie erin slaagt het areaal met een droogvalduur van 50-80% op de Roggenplaat te behouden – en vooral ook hoe de suppletie zich ontwikkelt – is onderwerp van evaluatievragen morfologie 1 en 2 die in dit hoofdstuk beantwoord worden (op basis van de ontwikkelingen tot dusver) en van paragraaf 5.1 (op basis van een reflectie van het morfologisch doelbereik voor 2035). Uitvoerige analyses die ten grondslag liggen aan deze beantwoording van de evaluatievragen zijn te vinden in Bijlage 1. Paragraaf 3.1 geeft verklaringen voor de waargenomen ontwikkelingen en de bijbehorende begripsvorming, op basis van de beantwoording van de kennisvragen.

Evaluatievraag morfologie 1 (Bijlage B1.5)

Hoe verandert het areaal droogvalduur op de gehele Roggenplaat in de jaren vóór en in de eerste vijf jaar na aanleg van de suppletie?

De veranderingen in droogvalduur van de Roggenplaat hangen direct samen met de morfologische ontwikkelingen en de aanleg van de suppletie-elementen. In het jaar vóór aanleg van de suppletie-elementen (van 2018 tot eind 2019) waren de morfologische veranderingen beperkt, in lijn met de ontwikkeling (afname in hoogte) over het afgelopen decennium. Met de aanleg van de suppletie-elementen is het areaal met een droogvalduur van meer dan 50% toegenomen met 124 ha (een toename van 21%; Tabel 2-1). Dit betekende met name een vermindering van het areaal met een droogvalduur van 20-50% (Tabel 2-1). Na aanleg is het areaal met een droogvalduur van meer dan 50% afgenomen van 726 ha in februari 2020 tot 698 ha in juni 2024, wat neerkomt op een afname van 4%. De klasse met een droogvalduur van 70-80% ondervond de grootste relatieve achteruitgang (78%) in areaal. Het areaal met een droogvalduur van meer dan 80% was vóór suppleren al zeer beperkt (1 ha) en is in het jaar na suppleren (2020) verloren gegaan. De RTK-raaimetingen en vlakdekkende LiDAR-metingen (Bijlage B1.2.2 geeft een toelichting op deze metingen) vertonen beide een afname in hoogte van de (met name zuidelijke) suppletie-elementen en tonen lokaal sedimentatie ten noorden van deze elementen. Kortom, na aanleg een afname in het areaal van de hoogste droogvalduurklassen van de plaat en een lokale toename in droogvalduur in de nabijheid van de suppletie-elementen.

Tabel 2-1. Het areaal (ha) van verschillende droogvalduurklassen voor 2018 t/m 2024 op basis van de (plaat-breed gecorrigeerde) LiDAR data na interpolatie van eventuele ontbrekende data. Deze tabel is ook opgenomen in Bijlage B1.5.

DVD-klasse	Mrt-2018	Apr-2019	Feb-2020	Okt-2020	Apr-2021	Feb-2022	Apr-2023	Jun-2024
20-50%	761	745	619	620	611	607	614	635
50-60%	416	431	492	504	503	510	509	516
60-70%	142	152	205	204	210	203	193	176
70-80%	15	18	29	15	16	14	12	6
80-90%	1	1	1	0	0	0	0	0
>50%	573	602	726	723	728	728	714	698
>80%	1	1	1	0	0	0	0	0

Evaluatievraag morfologie 2 (Bijlage B1.6)

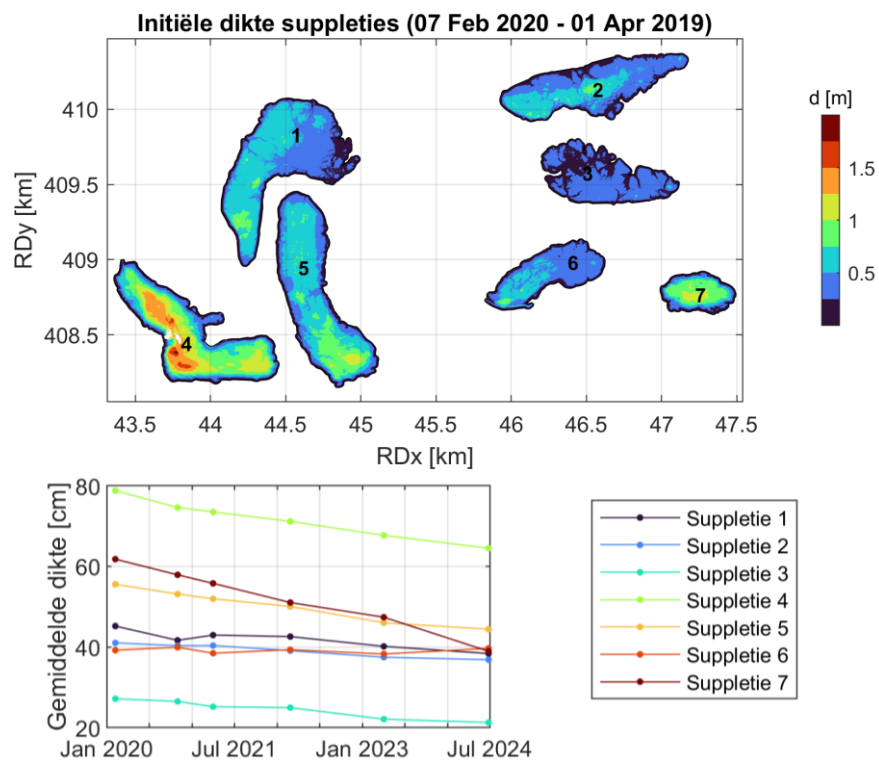
Hoe ontwikkelen de suppletie-elementen zich morfologisch en is dit afhankelijk van de locatie op de Roggenplaat?

Hoewel de grootste bodemveranderingen in het eerste jaar na aanleg plaatsvonden, eroderen de suppletie-elementen gestaag door. De morfologische ontwikkelingen variëren sterk tussen de verschillende suppletie-elementen. Suppletie-elementen 1-3 (noordelijk gelegen) en 6 (gelegen achter een schelpenrug) zijn substantieel minder erosief dan suppletie-elementen 4, 5 en 7 (zuidelijk gelegen; voor suppletie 5 is met name het zuidelijke deel erosief). Dit komt overeen met de verwachting uit de ontwerpfase dat de zuidelijke suppletie-elementen sterker zouden eroderen door meer golfwerking. Om hierop te anticiperen, zijn de zuidelijke suppletie-elementen bewust hoger aangelegd dan de noordelijke suppletie-elementen (Figuur 2-2).

Tussen februari 2020 (net na aanleg) en juni 2024 (laatste meting) zijn de noordelijke suppletie-elementen 1-3 met 4-7 cm afgenomen in gemiddelde hoogte, wat overeenkomt met een relatieve afname in gemiddelde dikte van respectievelijk 15%, 10% en 22% (Figuur 2-2). De zuidelijke suppletie-elementen 4, 5 en 7 zijn in deze periode met 11-23 cm in gemiddelde hoogte afgenomen, wat neerkomt op respectievelijk 18%, 20% en

37% van hun oorspronkelijke gemiddelde dikte (Figuur 2-2). Ondanks de relatief zuidelijke ligging van suppletie 6 is deze, waarschijnlijk door de beschutte ligging achter een schelpenrug en het binnenwandelen van deze schelpenrug, nagenoeg niet veranderd in gemiddelde hoogteligging (gemiddelde dikte is met 1% toegenomen).

De zuidelijke suppletie-elementen kennen niet alleen een grotere absolute hoogteafname, ook de afname in suppletievolume was voor deze suppletie-elementen een stuk groter: tot 37% voor suppletie 7 (de kleinste suppletie). Let wel, dit is geen (volledig) sedimentverlies van de Roggenplaat omdat het sediment gedeeltelijk in de nabijheid van de suppletie terecht is gekomen (zie onderliggende kennisvraag 2).



Figuur 2-2. Boven: dikte van de zeven suppletie-elementen inclusief nummering van de elementen, gebaseerd op de LiDAR opnamen (suppletie-specifiek gecorrigeerd; Bijlage B1.2.3) van 1 april 2019 (vóór aanleg) en 7 februari 2020 (na aanleg). Onder: ontwikkeling van de gemiddelde dikte/hoogte voor de zeven suppletie-elementen op basis van de LiDAR opnamen (suppletie-specifiek gecorrigeerd). Dit figuur is gebaseerd op Figuur B1-37 en Figuur B1-39 van de bijlage.

Binnen de suppletie-elementen is sprake van ruimtelijke variaties in ontwikkeling en vormveranderingen. Bijvoorbeeld, suppletie-element 7 erodeerde aan de loefzijde en de top, terwijl deze aan sedimentatie onderhevig was aan de lijzijde. Daarnaast zijn met name de zuidelijke suppletieranden minder steil geworden en zijn er op de zuidelijke delen van de zuidelijke suppletie-elementen megaribbels (zandgolven) gevormd. Op sommige delen van de meest erosieve suppletie-elementen bedroeg de erosie meer dan een halve meter.

Hoewel de bodemveranderingen grotendeels het gevolg zijn van sedimenttransport, blijkt dat ook zettingen van de ondergrond hierin een rol speelden. Ondanks dat een precieze inschatting door meetonnauwkeurigheden en onzekerheden niet mogelijk is, is de gemiddelde zetting van de suppletie-elementen ingeschat op 0,6 cm/jaar (3 cm in 5 jaar) wat neerkomt op een volumeverlies van orde 12.000 m³/jaar.

2.2 Bodemdieren

De bodemdierenmonitoring dient ter evaluatie van de projectdoelstellingen en om de ecologische ontwikkelingen van de Roggenplaat na de aanleg van de suppletie-elementen te kunnen verklaren. Van der Werf et al. (2016b) benadrukken in het ontwerpfasedocument dat het succes van de ingreep uiteindelijk voor een belangrijk deel wordt bepaald door het **ecologisch herstel** van de suppletie-elementen na aanleg als draagkrachtige **foerageergebieden** voor de steltloperpopulaties op de Roggenplaat.

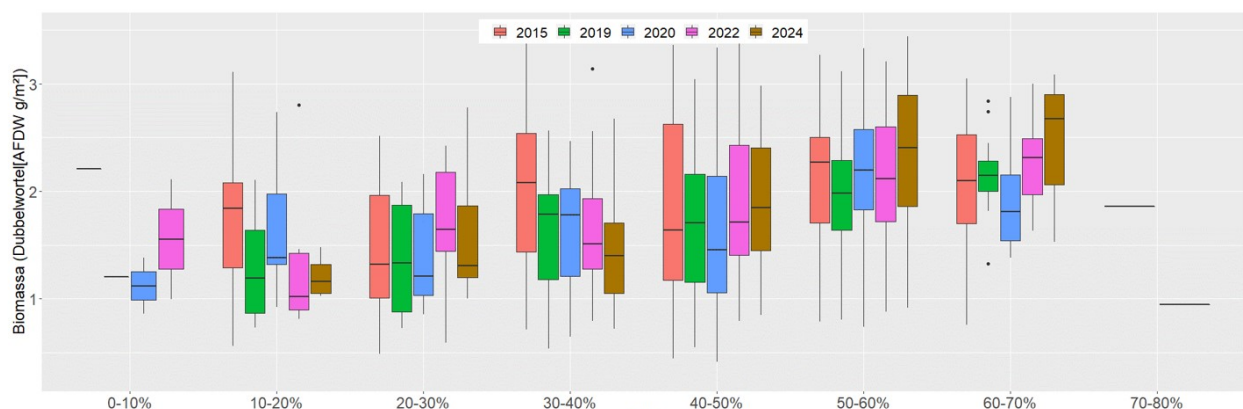
Ecologisch herstel. In het proces van ecologisch herstel leidt het aanbrengen van suppletie-elementen zelf tot veranderingen in droogvalduur, sedimentsamenstelling en hydrodynamische condities op de aanleglocaties. Deze factoren staan bekend als belangrijke sturende variabelen voor de samenstelling van bodemdiergemeenschappen. Daarom is de verwachting dat de bodemdieren die zich op de suppletie-elementen vestigen, zullen verschillen van de gemeenschappen die er vóór de aanleg aanwezig waren. De term 'rekolonisatie' moet in dit verband dan ook niet worden opgevat als een herstel van de oorspronkelijke situatie, maar als de vestiging van soorten die goed kunnen gedijen onder de nieuwe, door de suppletie bepaalde omstandigheden.

Foerageergebieden. Het beoogde behoud van de foerageerfunctie van het gebied voor vogels stelt specifieke eisen aan de bodemdierengemeenschappen die zich op de suppletie-elementen gaan vestigen. Deze eisen betreffen de geschiktheid van deze organismen als voedselbron voor steltlopers, zowel kwantitatief als kwalitatief. Zoals aangegeven door Van der Werf et al. (2016b) onderscheiden steltlopersoorten zich van elkaar door uiteenlopende dieetvoorkeuren. Hierdoor is de geschiktheid van een suppletie-element als foerageergebied sterk afhankelijk van de specifieke vogelsoort die in beschouwing wordt genomen. Het is daarom belangrijk om bij uitspraken over de voedselbeschikbaarheid voor steltlopers altijd de betreffende vogelsoort te specificeren. De relatie tussen de voedselbeschikbaarheid en de vogels wordt per soort onderzocht in de vogelbijlage (Bijlage 3) op basis van de vogeltellingen en van de gegevens over de aanwezige prooi-soorten op of rondom de suppletie-elementen.

Evaluatievraag voedselbeschikbaarheid voor vogels 1 (Bijlage 0)

Hoe ontwikkelt de voedselbeschikbaarheid voor vogels (i.e. bodemdieren) zich op de Roggenplaat als geheel na uitvoering van de suppletie-elementen?

Vanwege de grote invloed van de droogvalduur op de bodemdieren (onderwerp van de kennisvraag 1), is de ontwikkeling in de tijd van de bodemdierengemeenschappen onderzocht door de waarnemingen te ordenen naar droogvalduurklasse.



Figuur 2-3. Totale bodemdierbiomassa (\sum [AFDWg/m²]) als functie van de droogvalduur (DVD) op de Roggenplaat door de jaren heen (ook weergegeven in Figuur B2-7 samen met grafieken voor de bodemdierdichtheid en het aantal soorten).

Daaruit blijkt dat de jaar-tot-jaarvariatie in bodemdierdichtheid, biomassa en soortenrijkdom van monsters binnen een droogvalduurklasse, met enkele uitzonderingen na, binnen de ruimtelijke variatie van die klasse blijft (zie biomassa in Figuur 2-3/Figuur B2-7). Een uitzondering vormt de 20-30%-klasse, waar bodemdierdichtheid, soortenrijkdom en biomassa na een toename in 2022 weer sterk afnemen in 2024.

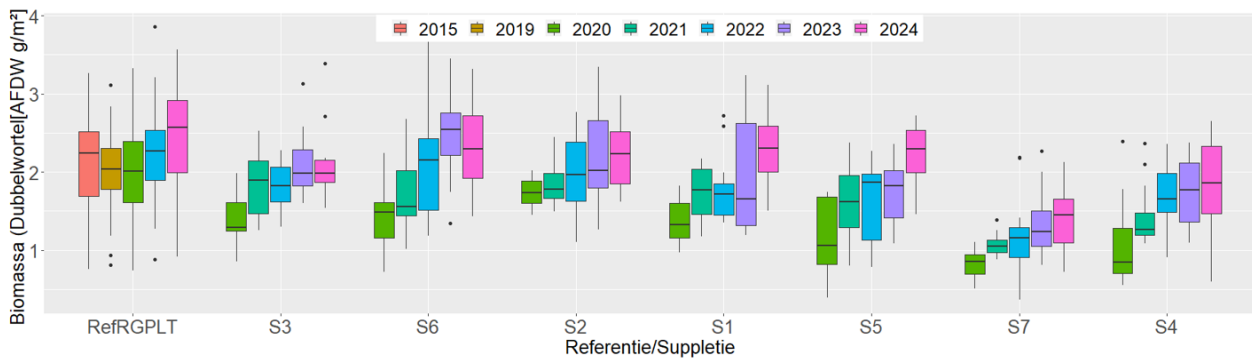
Daarentegen nemen in de 60-70%-droogvalduurklasse, de biomassa en het aantal soorten juist toe tussen 2022 en 2024. De voedselbeschikbaarheid voor vogels blijft dus, na aanleg van de suppletie-elementen, voor het overgrote deel vergelijkbaar met de situatie vóór de aanleg van de suppletie-elementen.

Evaluatievraag voedselbeschikbaarheid voor vogels 2 (Bijlage B2.4)

Hoe ontwikkelt de bodemdiergemeenschap zich op de afzonderlijke suppletie-elementen?

De beschrijving van de ontwikkeling van de bodemdierengemeenschap op de afzonderlijke suppletie-elementen vereist dat expliciet rekening wordt gehouden met de fysieke omgeving van de suppletie-elementen. De zeven suppletie-elementen onderscheiden zich van elkaar door hun geografische ligging en hoogteligging die bepalend zijn voor hun blootstelling aan bodemschuifspanning door golven en voor hun sedimentsamenstelling (Figuur B2-13, Figuur B2-14). Hierdoor ontstaan verschillen in de rekolonisatiedynamiek en uiteindelijk in de bodemdierengemeenschap die zich op langere termijn kan vestigen of handhaven op de verschillende suppletie-elementen.

Bij suppletie-elementen 1-3 (noordelijk gelegen) en 6 (gelegen achter een schelpenrug) trad binnen enkele jaren herstel op tot dichtheden en samenstellingen die vergelijkbaar zijn met die van de omliggende plaat (Figuur B2-15). Bij suppletie-elementen 4, 5 en 7 (zuidelijk gelegen; voor suppletie 5 is met name het zuidelijke deel erosief) bleef het herstel beperkt, met name bij de sterk erosieve suppletie-elementen 4 en 7 (Figuur B2-15). Op de meeste suppletie-elementen, met uitzondering van suppletie-elementen 4 en 7, is de biomassa in 2024 vergelijkbaar met die van referentiegebieden elders op de Roggenplaat, wat erop wijst dat de voedselbeschikbaarheid niet langer beperkend is voor foeragerende vogels (Figuur 2-4).



Figuur 2-4. Totale bodemdierbiomassa ($\sqrt[4]{AFDWg/m^2}$) in de referentielocaties (RefRGPLT) en op de suppletie-elementen (S1 tot S7) over de jaren (geen RefRGPLT-monster in 2021). De suppletie-elementen zijn gerangschikt op toenemende aanlegdikte (ook weergegeven in Figuur B2-15 samen met grafieken voor de bodemdierdichtheid en het aantal soorten).

2.3 Vogels

De vogeltellingen vormen een belangrijk onderdeel van de monitoring, omdat de hoofdoelstelling van de Roggenplaatsuppletie herstel en behoud van foerageergebied voor de doelsoorten van benthos-etende vogels is. Veranderingen in het oppervlak, de hoogte en de ecologische kwaliteit van de droogvallende platen kunnen directe gevolgen hebben voor de beschikbaarheid van voedsel en daarmee voor het gebruik door vogels. Door systematisch de aantallen en verspreiding van deze soorten te volgen, kunnen we beoordelen in hoeverre de suppletie bijdraagt aan het behouden en herstellen van geschikte foerageerhabitats. Bovendien bieden de vogeltellingen een essentiële schakel tussen de fysieke veranderingen in het landschap en de ecologische functies die het gebied vervult, waardoor beter kan worden begrepen hoe morfologie en voedselbeschikbaarheid samen de vogels beïnvloeden.

De vogels zijn geteld tussen 2015 en 2024 plus nog 1 maand in 2025 in maximaal acht maanden per jaar. Tellingen vonden plaats vanaf een boot die iedere twee uur om de Roggenplaat heenvoer. Hierdoor kon driemaal tijdens eb tussen 6 en 0 uur voor laagwater geteld worden.

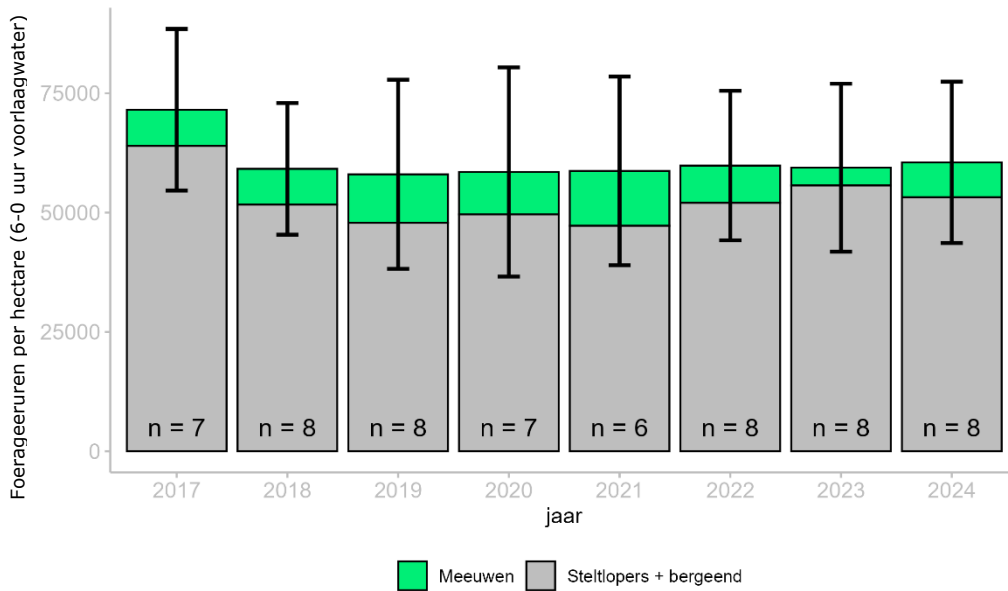
Evaluatievraag steltlopers 1 Gebruik steltlopers in ruimte en tijd (Bijlage B3.3)

Hoe wordt de Roggenplaat gebruikt door benthos-etende vogels in ruimte en tijd? Welke soorten komen voor en in welke aantallen?

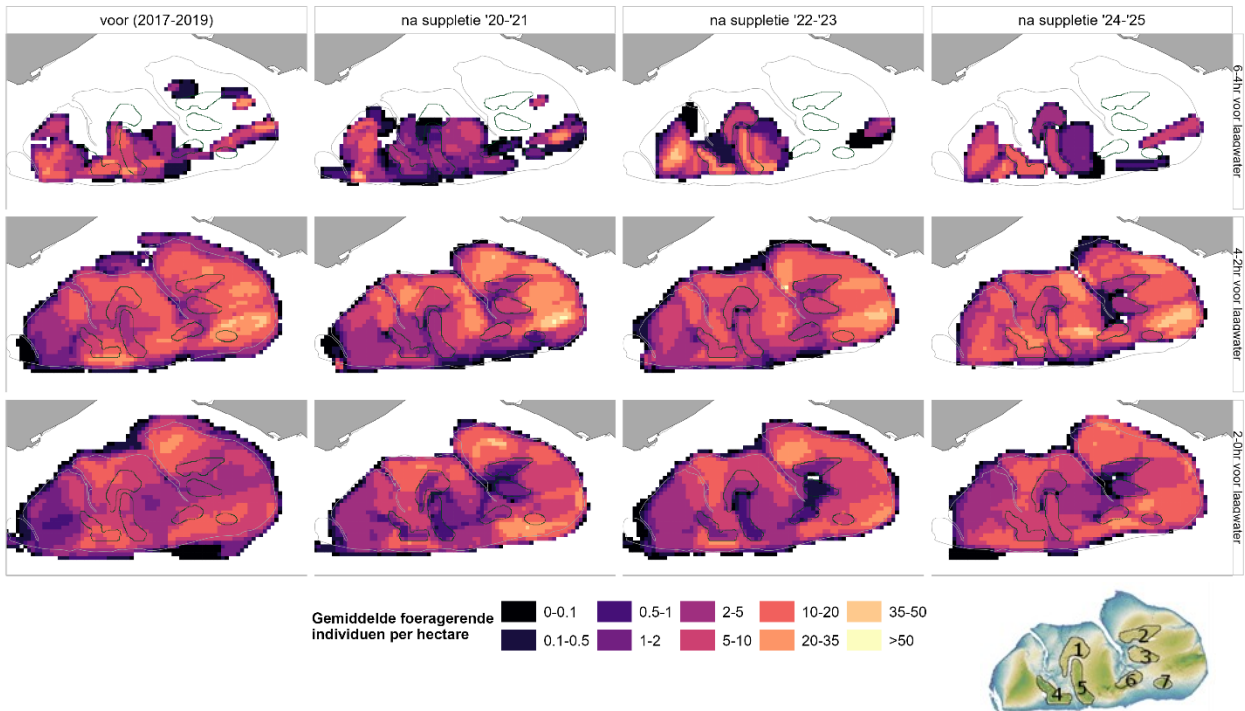
De Roggenplaat wordt met laagwater per teldag bezocht door gemiddeld rond de 20.000 steltlopers, bergeenden en meeuwen. Hiernaast foerageren ook een aantal andere vogelsoorten op de Roggenplaat zoals rotganzen (met name op wieren) en visetende vogels zoals lepelaars en reigers.

De vogelobservaties laten zien dat de aantallen behoorlijk kunnen schommelen per telling en dat de soortensamenstelling verschilt per maand afhankelijk van seizoenspatronen van specifieke soorten. Belangrijk is vast te stellen dat de totale aantallen steltlopers niet significant zijn veranderd na aanleg van de suppletie-elementen (Figuur). Wel valt op dat er voor drie doelsoorten significant lagere aantallen in het laatste teljaar ('24-'25) worden waargenomen. Het gaat hier om de kanoetstrandloper, bontbekplevier en bergeend. Van deze soorten behalen de kanoetstrandloper en de bergeend hun instandhoudingsdoelen niet in de Oosterschelde (Hoekstein et al. 2024).

Niet elk deel van de Roggenplaat wordt evenveel gebruikt. De vogels verspreiden zich met het terugtrekkende water steeds meer over de Roggenplaat (Figuur 2-6Figuur Figuur). Hierbij werden voor de suppletie-elementen met name het oostelijk deel gebruikt maar er waren ook hotspots op het noorden en zuiden van de plaat. In tegenstelling tot de totale aantallen vogels en de soortensamenstelling is de ruimtelijke verspreiding wel erg veranderd nadat de zandsuppleties zijn uitgevoerd. De suppletie-elementen worden direct na de suppleties gemeden door benthos-etende vogelsoorten, met name tussen 2 en 0 uur voor laagwater. Later komt daar voor sommige suppletie-elementen verandering in. Suppletie-elementen 1, 4 en 5 werden in de vroege eb periode (tussen 4 en 6 uur voor laagwater) van 2015 tot 2022 niet veel gebruikt als foerageergebied, maar vanaf 2022 nam het gebruik sterk toe. De hogere ligging en het herstel van bodemdieren maakt deze suppletie-elementen waarschijnlijk interessant op het moment dat een groot deel van de Roggenplaat nog onderwater ligt. Verder valt op dat de suppletie-elementen tussen 4 en 2 uur voor laagwater vanaf '22-'23 meer gebruikt worden dan in de eerste 2 jaar na de suppletie-elementen, met name suppletie-elementen 1, 4 en 5 en wisselend ook 3 en 6. Het gebruik van de suppletie-elementen door foeragerende vogels in de laagwaterperiode (tussen 2 en 0 uur voor laagwater) is nog steeds erg afwijkend van het beeld voor de suppletie-elementen. Ondanks de positieve ontwikkeling van bodemdieren op de suppletie-elementen kunnen andere variabelen een rol spelen. Zo liggen de suppletie-elementen hoger dan voorheen. Vogels lopen vaak (deels) met de waterlijn mee, en zijn met laagwater daarom meer op de lagere delen van de plaat te vinden. Echter, kunnen de suppletie-elementen mogelijk door hun relatief grovere sedimentsamenstelling ook eerder uitdrogen (sectie 2.1), wat het minder geschikt maakt als foerageergebied.



Figuur 2-5. Foerageeruren per hectare (6-0 uur voor laagwater) per dag gemiddeld over het jaar met weergave van de standaarddeviatie. Binnen elke bar staat het aantal teldagen (n) dat is gebruikt om het gemiddelde te berekenen. In 2021 is als enige jaar ook een telling uitgevoerd in juni. Omdat aantallen fors lager lagen in deze maand is deze weggelaten in het berekenen van het gemiddelde. In 2025 is alleen maar 1 telling uitgevoerd (januari). Deze telling is meegenomen in 2024. In deze barplot is onderscheid gemaakt tussen steltlopers + bergeend en meeuwensoorten.



Figuur 2-6. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende benthos-etende vogels op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppletie-elementen zijn aangelegd. Inzet rechtsboven geeft nummering van de suppletie-elementen weer.

2.4 Natuurlijke riffen

Op de Roggenplaat komen natuurlijk gevormde Japanse oesterriffen voor, vooral langs de geulen en in het noorden langs de plaatrand. Deze riffen zijn goed functionerende natuurlijke systemen die een hoge soortenrijkdom herbergen en lokaal het sediment beschermen tegen erosie. Om deze redenen zijn de riffen zoveel mogelijk ontzien bij de aanleg van de suppleties (Van der Werf et al., 2016). De monitoring ervan (Evaluatievraag natuurlijke riffen 1) draagt bij aan de beoordeling van de natuurwaardeontwikkeling van de plaat. Een volledige analyse van de gebruikte data is opgenomen in de eerder gepubliceerde T3-rapportage (Escaravage et al., 2024).

Evaluatievraag natuurlijke riffen 1

Hoe ontwikkelen de oesterriffen zich in de periode 2018–2024 op de Roggenplaat?

Een deel van de natuurlijke oesterriffen binnen de contouren van suppletie-elementen 2, 4 en 5 is bedolven onder het zand. De omvang van de overige oesterriffen is vanaf de aanleg tot en met 2023 stabiel gebleven.

2.5 Zeehonden

De gewone zeehonden die op de Roggenplaat worden waargenomen, behoren tot de Deltapopulatie, met als belangrijkste leefgebieden de Voordelta, de Westerschelde en de Oosterschelde (Van der Werf et al., 2016). Deze populatie groeit sterk sinds het eind van de jaren negentig. De Roggenplaat is de enige belangrijke lig- en zoogplaats voor jongen van de gewone zeehond in de Oosterschelde. Daarom is het relevant om te volgen hoe de aanwezigheid van zeehonden op de plaat door de jaren heen varieert in relatie tot de aanleg van de suppletie-elementen. Een uitgebreide analyse van de gebruikte data is opgenomen in de eerder gepubliceerde T3-rapportage (Escaravage et al., 2024).

Evaluatievraag zeehonden 1 (Bijlage 4)

Hoe ontwikkelt de zeehondenpopulatie zich op de Roggenplaat sinds 2018 (in vergelijking met de Oosterscheldepopulatie)?

Zeehonden laten een duidelijke seizoensvariatie zien, met hogere aantallen op de Roggenplaat tussen juni en augustus. Er is geen duidelijke jaarlijkse trend gevonden in deze zomerwaarden die in verband kan worden gebracht met de aanleg van de suppletie-elementen. De verschillen in zeehondenaantallen tussen de Roggenplaat en de rest van de Oosterschelde, op basis van maandelijks of jaarlijkse gemiddelden, zijn niet significant.

3 Beantwoording kennisvragen

Dit hoofdstuk geeft de beantwoording van de kennisvragen (Tabel 1-2) op basis van de monitoringresultaten van de Roggenplaat in de eerste vijf jaar na aanleg (2020–2024). Het doel is om een beter begrip te krijgen van de onderliggende processen en verbanden achter de waargenomen eco-morfologische veranderingen. Per kennisvraag wordt verwezen naar de desbetreffende secties voor meer detail.

De bespreking volgt de opzet van de monitoring:

- Morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat en de suppletie-elementen (Bijlage 1).
- Ontwikkeling van bodemdieren op zowel de plaat als de suppletie-elementen (Bijlage 2).
- Gebruik door benthos-etende vogels in relatie tot de suppletie-elementen (Bijlage 3).

De uitgebreide analyses in de bijlagen bieden een gedetailleerd inzicht in de eco-morfologische dynamiek van de Roggenplaat in de vijf jaar na aanleg van de suppletie-elementen. Deze inzichten vormen een belangrijke basis voor verdere kennisontwikkeling en leveren waardevolle handvatten voor het ontwerp van toekomstige suppletieprojecten.

3.1 Morfologie

In paragraaf 2.1 zijn met de beantwoording van de evaluatievragen de morfologische ontwikkelingen van de Roggenplaat en de suppletie samengevat. Deze paragraaf focust op de onderliggende begripsvorming aan de hand van de kennisvragen. Voor de morfologische begripsvorming is één centrale kennisvraag gedefinieerd die de focus legt op de processen die ten grondslag liggen aan de morfologische veranderingen van de Roggenplaat en de suppletie.

De beantwoording van deze centrale kennisvraag is ondersteund met onderliggende kennisvragen. Weten hoe en wanneer het sediment over de suppletie-elementen en plaat beweegt (kennisvragen morfologie 1 en 2), is relevant voor nadere begripsvorming, mede om tot een verwachting voor de langjarige ontwikkelingen te kunnen komen (paragraaf 5.1). Daarnaast is, zoals ook benadrukt in de ontwerpstudie (Van der Werf et al., 2016b), ook de kwaliteit van het areaal sturend in de mate van ecologisch herstel. Hierin speelt de bodemsamenstelling (korrelgrootte) een belangrijke factor (kennisvraag morfologie 3). Niet het primaire doel, maar wel relevant voor het succes van het suppletieproject, is weten of de suppletie de hydro-morfologie van de Roggenplaat heeft veranderd. Hiertoe zijn de veranderingen in de morfologie (kennisvraag morfologie 4) en stroming (kennisvraag morfologie 5) van de plaat en het Middengeultje beschouwd. Aanvullend is ook beoordeeld of wilde oesterriffen op de plaat een invloed hebben op de ontwikkeling van de suppletie-elementen (kennisvraag morfologie 6). Dit zodat hier in toekomstige suppletieontwerpen op kan worden geanticipeerd.

Hierna volgt de beantwoording van elke morfologische kennisvraag, startend met de overkoepelende, centrale kennisvraag. Uitvoerige analyses die ten grondslag liggen aan de beantwoording van deze kennisvragen zijn te vinden in Bijlage 1.

Centrale kennisvraag morfologie 1 (Bijlage B1.7)

Welke processen liggen ten grondslag aan de morfologische veranderingen van de Roggenplaat en specifiek de suppletie-elementen?

De Roggenplaat bestaat uit verschillende morfologische eenheden (o.a. gehele plaat, suppletie-elementen, schelpenruggen, afwateringsgeulen en microreliëf) die veranderen onder invloed van wind, golven en getij met variaties in de tijd en over de ruimte. De suppletie-elementen erodeerden relatief sterk in het eerste jaar na aanleg door uitzonderlijke stormen en initieel relatief grote gradiënten in hoogteligging. Hierna zette de erosie geleidelijk door. Kortom, niet alleen extreme weersomstandigheden, maar ook vaker voorkomende windsnelheden en golven dragen in combinatie met het getij bij aan de lange termijn morfologische ontwikkelingen.

Het ontwerp (o.a. ligging en hoogte) van de suppletie-elementen beïnvloedt de mate van morfologische veranderingen. Zoals in het ontwerp was voorzien, is er een duidelijk onderscheid in de morfologische ontwikkeling tussen de zuidelijke en noordelijke suppletie-elementen. De zuidelijke suppletie-elementen, met uitzondering van suppletie 6 gelegen achter een schelpenrug, zijn blootgesteld aan relatief veel golfaanval en daarmee grote bodemschuifspanningen. Bovendien versterken de hogere vormgeving en daarmee de steile suppletieranden de transportgradiënten en daarmee de erosie. Versterkt door wind-gedreven stroming en luwte-vorming achter de suppletie-elementen, migreren met name de zuidelijke suppletie-elementen in noordoostelijke richting met depositie in de lijzijde. Het zuid-noord onderscheid tussen de suppletie-elementen uit zich ook in verschillen in korrelgrootteontwikkelingen. Waar de noordelijke suppletie-elementen na aanleg enigszins verfijnen en slib invangen, blijven de zuidelijke suppletie-elementen relatief grof. Kortom, ruimtelijke verschillen in de hydro-morfologische omstandigheden resulteren in verschillen in de suppletieontwikkelingen.

Lokale hoogtevariaties op de suppletie-elementen vlakken in de eerste jaren na aanleg grotendeels uit. Net als voor de grootschalige ontwikkelingen van de suppletie-elementen, spelen niet alleen stormen maar ook vaker voorkomende omstandigheden hierin een rol. Aan de zuidrand van de zuidelijke suppletie-elementen ontstaan juist megaribbels (zandgolven) die ook al vóór aanleg aanwezig waren in dit relatief onbeschutte deel van de plaat. Het lijkt dat oesterriffen door golfdemping de suppletievoet in enige mate kunnen stabiliseren, al resulteert dit niet in minder erosie van de hoge suppletiedelen.

Niet-gesuppleerde gebieden op de Roggenplaat en ook het Middengeultje hebben beperkte veranderingen in morfologische ontwikkeling ondergaan, vorming van lokale afwateringsgeultjes daargelaten. Dit komt mede doordat de stroming op de Roggenplaat en in het Middengeultje beperkt is veranderd door de suppletie-elementen.

Onderliggende kennisvraag morfologie 1.1 (Bijlage B1.7.1)

Wanneer en waar treedt vooral erosie op (bijvoorbeeld bij stormen)?

De suppletie-elementen ontwikkelen zich morfologisch door een samenspel van golfwerking, wind-gedreven stroming en getij. De suppletieontwikkelingen variëren in tijd en ruimte. In het eerste jaar na aanleg erodeerden met name de zuidelijke suppletie-elementen 4, 5 en 7 sterk. Enerzijds komt dit door uitzonderlijke stormen in februari 2020. Anderzijds komt dit door de aanvankelijk grote hoogteverschillen binnen de relatief hoge zuidelijke suppletie-elementen. Deze hoogteverschillen leidden tot grote gradiënten in sedimenttransport, wat resulteerde in relatief grote bodemveranderingen. Ter illustratie, lokaal is ruim 10 cm afslag waargenomen op suppletie 4 tijdens de februaristormen van 2020, en meer ruimtelijk verspreide afslag (tot 5 cm) rondom de plaatranden tijdens stormen in februari 2022.

Er kan echter (nog) niet gesproken worden van een structurele afname in erosie van de suppletie-elementen als geheel. De RTK-profielen wijzen op relatief geleidelijke morfologische ontwikkelingen. Zo migreert de lijzijde van suppletie 7 – de meest dynamische suppletie – tot nu toe relatief monotoon met 10 m/jaar. Het zijn dus niet alleen extreme stormen maar ook vaker voorkomende omstandigheden die de suppletie-elementen doen eroderen.

Het microreliëf dat tijdens de aanleg op de suppletie-elementen was gevormd, is in de eerste jaren al grotendeels uitgevlakt. De hoogte van het microreliëf op suppletie 3 nam bijvoorbeeld in twee jaar al af van 20 cm naar 5 cm, met één-derde van deze uitvlakking al in februari-maart 2020 (mede als gevolg van de februaristormen). Het microreliëf heeft dus een morfologische levensduur van enkele jaren en kan dus maar beperkte ecologische meerwaarde geven (morfologische diversiteit).

Ruimtelijke variaties in stroming zijn te beperkt om verschillen in ontwikkelingen van de suppletie-elementen te kunnen verklaren. Golfsimulaties laten daarentegen zien dat de zuidrand van de plaat en de zuidelijke suppletie-elementen (4, 5 en 7) sterk door golven worden beïnvloed. Juist in deze gebieden is de hoogteligging het meest veranderd. De noordelijke suppletie-elementen liggen juist relatief beschermt, net als suppletie 6 die achter een schelpenrug ligt. Daarom is het conform de verwachtingen van de ontwerpstudie dat suppletie-elementen 4, 5 en 7 het sterkst eroderen. Luwtewerking (vorming van golf-luwe gebieden) achter de suppletie blijkt beperkt tot orde 100-200 m.

Onderliggende kennisvraag morfologie 1.2 (Bijlage B1.7.2)

Blijft het geërodeerde suppletiesediment in de nabijheid van de suppletie-elementen of komt het (ook) elders terecht?

Rondom de suppletie-elementen verplaatst het sediment zich met name in noordoostelijke richting, overeenkomstig met de dominante windrichting. In totaal was het volumeverlies van de suppletie-elementen 183.000 m³ (17% van de totale suppletiehoeveelheid van 1.076.000 m³) tussen de metingen van februari 2020 (na suppleren) en juni 2024 (laatste meting). Ongeveer 42% van dit volume (77.000 m³) verplaatste, volgens de huidige schatting, minder dan 50 m van de suppletie-elementen vandaan. Na correctie voor een inschatting van het zettingsverlies, is over deze jaren ongeveer 54.000 m³ van het suppletiezand elders op de plaat of in de geulen terecht gekomen. Dit beperkt enigszins de achteruitgang (erosie) van de niet-gesuppleerde delen van de plaat. Ter indicatie, dit komt overeen met ongeveer een halve centimeter (dus ongeveer één millimeter per jaar) over deze periode bij gelijke verspreiding over de plaat en in afwezigheid van verlies naar de geulen. Deze sedimentbeschikbaarheid is beperkt ten opzichte van de autonome sedimentverplaatsingen over de Roggenplaat en de meetnauwkeurigheid.

Suppletie-elementen creëren beschutte zones met minder golfenergie achter de suppletie wat sedimentatie kan bevorderen, zoals eerder waargenomen bij de Galgeplaatsuppletie van 2008. Golfmodellering voor de Roggenplaat toont lagere bodemschuifspanningen tot 200 m achter de suppletie. Echter, de netto sedimentatie in de 50-meter bufferzone is (tot nu toe) niet groter dan de erosie van de suppletie (ook na correctie voor het zettingsverlies), maar zonder luwte-effect was de sedimentatie in deze bufferzone wellicht lager geweest. De volumeontwikkeling varieert per suppletie, waarbij de noordelijke elementen minder veranderlijk zijn dan de zuidelijke. Alleen bij suppletie 6 is de depositie in de bufferzone groter dan de erosie van de suppletie zelf. Dat hangt echter samen met het binnenwandelen van een schelpenrug.

Onderliggende kennisvraag morfologie 1.3 (Bijlage B1.7.3)

Hoe is de sedimentsamenstelling op de Roggenplaat en specifiek de suppletie-elementen veranderd?

Het suppletiesediment is substantieel grover dan het sediment dat oorspronkelijk op de Roggenplaat aanwezig was. Daarom is de mediane korrelgrootte van het sediment in de niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat dan ook fijner (175 - 225 µm) dan op de suppletie (250 - 350 µm). Daarnaast bestaat de suppletie niet uit een uniforme sedimentsamenstelling maar verschillen de suppletie-elementen daarin direct na aanleg substantieel (suppletie 5 is bijvoorbeeld ruim 50 µm grover dan suppletie 2). Hoewel het sediment op de suppletie-elementen (met uitzondering van suppletie 7) aanhoudend fijner is geworden, is er geen sprake van een monotone ontwikkeling; er zijn variaties tussen de verschillende jaren. Dergelijke variaties zijn in bepaalde mate ook zichtbaar in de niet-gesuppleerde gebieden en zijn mogelijk het gevolg van natuurlijke processen zoals stormen. De verfijning van de mediane korrelgrootte is samengegaan met een (niet monotone) toename in het slibgehalte op de suppletie, waar slib in de eerste twee jaar na aanleg nog nagenoeg afwezig was.

Omdat de zuidelijke suppletie-elementen 4, 5 en 7 minder verfijning hebben ondergaan, is het waarschijnlijk dat de verschillen in korrelgrootteontwikkeling (deels) samenhangen met verschillen in morfologische kenmerken. Bijvoorbeeld, een hogere aanleghoogte, meer erosie, de aanwezigheid van megaribbels en een grotere golfforcering ten opzichte van de andere suppletie-elementen. Net zoals dat de mediane korrelgrootte relatief grof is in bepaalde dynamische, niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat (zoals de zuidwestflank), is het mogelijk niet realistisch om te verwachten dat de dynamische zuidelijke suppletie-elementen eenzelfde verfijning ondergaan als de minder dynamische en beschutter gelegen noordelijke suppletie-elementen.

Onderliggende kennisvraag morfologie 1.4 (Bijlage B1.7.4)

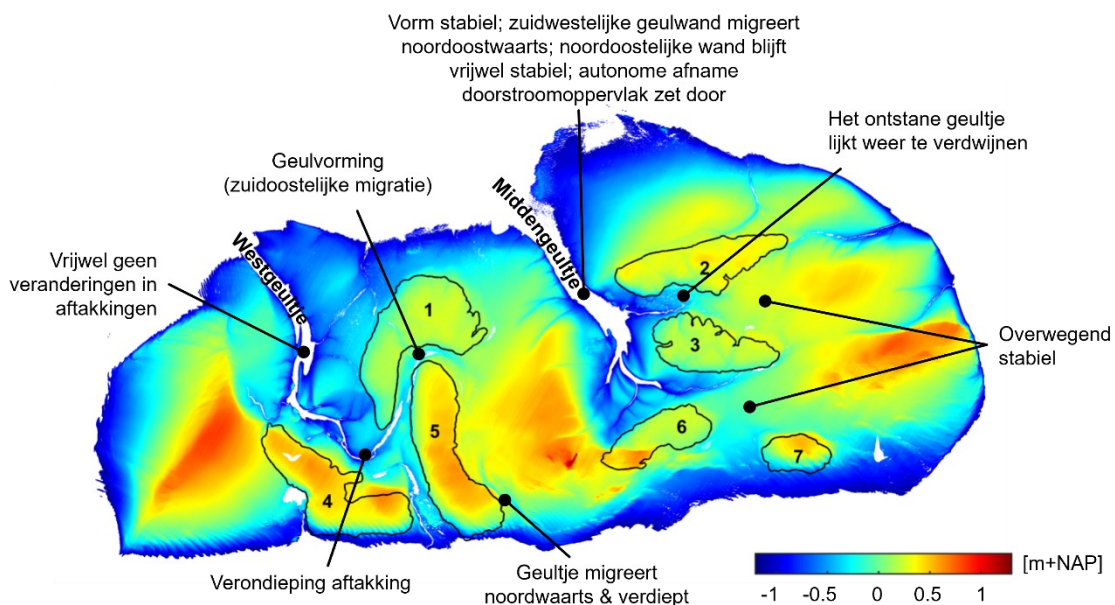
Zijn er niet-gesuppleerde gebieden (geulen, intergetijdengebied) die beïnvloed worden door de aanwezigheid van de suppletie-elementen, vindt er bijvoorbeeld geulvorming plaats?

De aanwezigheid van de suppletie-elementen lijkt, zoals met het ontwerp werd beoogd, weinig invloed te hebben op de morfologische veranderingen van de niet-gesuppleerde gebieden met uitzondering van de directe nabijheid van de suppletie-elementen (zie ook kennisvraag 2). De aftakkingen van het Westgeultje tussen de suppletie-elementen veranderen nauwelijks (aangegeven in *Figuur 3-1* tezamen met de hierna genoemde observaties), de uiterste aftakking tussen suppletie 4 en 5 daargelaten die ruim een halve meter

ondieper is geworden. Gebieden tussen de oostelijke suppletie-elementen zijn relatief stabiel. Doordat de suppletie-elementen 1 en 5 dicht bij elkaar liggen, is in de zone ertussen een geultje ontstaan. Deze migreert met de suppletieranden iets (~ 10 m/jaar) naar het zuidoosten. In het eerste jaar na aanleg zijn er ook naast enkele suppletie-elementen diverse geultjes gevormd. Geultjes zijn gevormd aan de zuidoostkant van suppletie 5 (migreert noordwaarts en verdiept) en aan de zuidkant van suppletie 2 (lijkt alweer te verdwijnen).

De morfologische ontwikkeling die het Middengeultje al voor suppleren onderging, is vooralsnog onveranderd door de suppletie-elementen. De noordoostelijke migratie van de zuidwestelijke geulwand zet ook na aanleg van de suppletie-elementen door. Wel is de gemiddelde trend van de verplaatsing iets toegenomen (van 0,8 m/jaar vóór tot 1,2 m/jaar na aanleg van de suppletie-elementen). De noordoostelijke geulwand vertoont daarentegen geen sterke migratie. Kortom, het doorstroomoppervlak van de geul is afgenomen. De totale trend in afname van het doorstroomoppervlak die al voor suppleren bestond, is niet significant veranderd. Het doorstroomvolume neemt ook af, maar ook hier is geen sprake van een significante trendbreuk in afnamesnelheid.

Het Westgeultje is voor en na suppleren eenmalig ingemeten. Daarom zijn geen inzichten verschaft over veranderingen in ontwikkeling door suppleren. Wel is duidelijk dat het Westgeultje over deze periode (2015-2024) kleiner is geworden. Eerdere datasets tonen dat deze ontwikkeling al voor suppleren gaande was.



Figuur 3-1. Waargenomen morfologische ontwikkelingen van de niet-gesuppleerde gebieden, zoals in de hoofdstuk beschreven. Op de achtergrond is de laatste bodemligging (LiDAR van 2024) weergegeven.

Onderliggende kennisvraag morfologie 1.5 (Bijlage B1.7.5)

Hoe is de stroming en afwatering op de Roggenplaat en in de oostelijke geul (het Middengeultje) veranderd door de aanleg van de suppletie-elementen?

Uit metingen en modellering van de stroming komt naar voren dat er geen grootschalige verandering in dieptegemiddelde stroomsnelheid is opgetreden door aanleg van de suppletie-elementen. Op sommige locaties, verspreid over de plaat, zijn er beperkte verschillen ($\leq 0,05$ m/s) in stroomsnelheid, terwijl er op andere locaties wel substantiële ($> 0,1$ m/s) veranderingen zijn waargenomen. Zo is op bepaalde suppletie-elementen (met name suppletie 4) de stroming lokaal afgenomen. Toenamen in snelheid vonden vooral plaats tussen of net naast de suppletie-elementen. De gemeten toename in stroomsnelheid tussen suppletie-elementen 1 en 5, en ten oosten van suppletie 5 volgt ook uit de modellering. Deze toename tussen suppletie-elementen 1 en 5 is de sterkst gemeten toename ($+0,4$ m/s) en hangt waarschijnlijk samen met het vernauwen (en daarmee versnellen) van de stroming tussen deze suppletie-elementen. Uit de metingen en modellering volgt dat de stroming in het Middengeultje is afgenomen. Dit valt hoofdzakelijk te verklaren doordat er met de aanwezigheid van de suppletie-elementen minder water de plaat op- en afstroomt (kleinere getijdeprisma). Verder kan de afname in doorstroomoppervlak van het Middengeultje, een ontwikkeling die al vóór suppleren optrad, ook een rol spelen in deze snelheidsafname.

Onderliggende kennisvraag morfologie 1.6 (Bijlage B1.7.6)

Hebben oesterriffen een rol in het vasthouden van (gesuppleerd) sediment op de Roggenplaat?

Een aantal van de oorspronkelijk aanwezige wilde oesterriffen ligt in de nabijheid van enkele suppletie-elementen. Er zijn aanwijzingen dat deze wilde oesterriffen de suppletievoet in enige mate hebben gestabiliseerd (lokaal sedimentatie waargenomen). In hoeverre deze stabilisatie daadwerkelijk het gevolg was van de aanwezigheid van deze riffen, is met de morfologische data niet vast te stellen. Er zijn immers ook suppletieranden die relatief stabiel zijn gebleven in afwezigheid van dergelijke riffen. Wel staat vast dat de hooggelegen suppletiedelen (tot een meter boven de hoogte van de riffen) zeer substantieel erodeerden ondanks de nabijheid van een wild oesterrif. Dit omdat golven bij relatief grote waterdiepten (ten opzichte van de golfhoogte) nagenoeg zonder energieverlies de riffen passeren (conform Walles et al., 2015). Als de oesterriffen dus al een rol spelen in het vasthouden van het sediment, is deze rol dus beperkt tot de laaggelegen delen zoals de suppletievoet waar de riffen door golfdemping een rol kunnen spelen.

Centrale kennisvraag morfologie 2 (Bijlage B6)

Zijn er ruimtelijke verschillen in de orde van grootte van de dagelijkse sedimentdynamiek op de Roggenplaat en specifiek rondom de suppletie-elementen?

Drie jaar dagelijks meten met SED-sensoren (Surface Elevation Dynamic) laten zien dat er weinig tot geen significante ruimtelijke verschillen bestaan tussen gesuppleerde en niet-gesuppleerde gebieden. De fysische processen die de dagelijkse sedimentdynamiek sturen — zoals windgedreven golfwerking en getijstroomdynamiek — werken op beide zones op vergelijkbare wijze. Hierdoor is de omvang van de dagelijkse veranderingen in bodemhoogte vergelijkbaar, ook rondom de suppletie-elementen.

Kennisvraag 2.1: Wat is de invloed van golven en getijden op de dagelijkse sedimentdynamiek, en worden de suppletie-elementen anders beïnvloed vergeleken met de niet-gesuppleerde gebieden?

- Wind en golven: De dagelijkse sedimentveranderingen worden vooral bepaald door windsnelheid, waarbij windrichting de ruimtelijke verdeling van sedimentverplaatsing beïnvloedt. Dit maakt windgedreven golfwerking de belangrijkste factor voor kortetermijndynamiek.
- Getijden: Getij beïnvloedt vooral de langzame morfologische ontwikkeling van de zandplaat, en minder de dagelijkse sedimentverplaatsing.
- Vergelijking suppletie-elementen vs. natuurlijke gebieden: De suppletie-elementen worden fysisch op dezelfde manier beïnvloed als de omliggende niet-gesuppleerde zones. Er is geen extra dynamiek of afwijkende belasting voor het sediment of de benthische fauna waargenomen.

Kortom, de dagdagelijkse sedimentdynamiek op de Roggenplaat is ruimtelijk vrij uniform, met wind en golven als belangrijkste factoren voor kortetermijnveranderingen. Suppletie-elementen gedragen zich hierbij vergelijkbaar met de natuurlijke delen van de plaat, terwijl getij de langetermijnontwikkeling domineert.

3.2 Bodemdieren

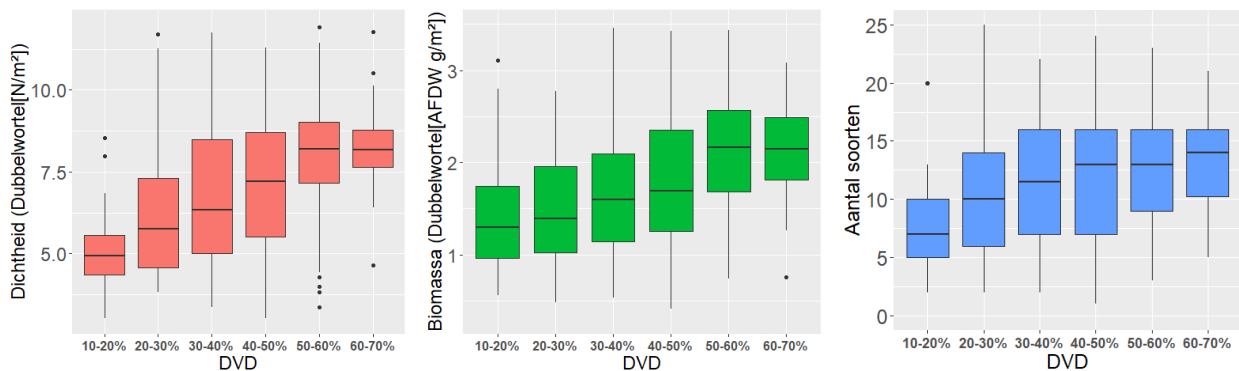
Op basis van eerdere studies (referenties in de Vet et al., 2023) weten we dat variabelen als droogvalduur, sedimentsamenstelling en hydrodynamica belangrijke sturende factoren zijn voor het voorkomen van een bodemdierengemeenschap in de intergetijdengebieden zoals de Roggenplaat. Deze omgevingsfactoren hebben sterke onderlinge relaties (Figuur B2-5) en het is niet eenduidig vast te stellen welke omgevingsfactor verantwoordelijk is voor een bepaalde verandering in de bodemdierengemeenschap. De huidige resultaten maken het echter wel mogelijk om de belangrijkste trends in de eigenschappen van de bodemdiergemeenschappen te relateren aan de gradiënten in omgevingsfactoren.

Onderliggende kennisvraag Voedselbeschikbaarheid voor vogels 1 (Bijlage B2.3.1) **Wat is de relatie tussen het voorkomen van bodemdieren op de Roggenplaat en de factoren droogvalduur, hydrodynamica en/of sedimentsamenstelling?**

Uit de multivariate analyse (Redundancy Analysis, RDA) blijkt dat droogvalduur (bodemhoogte) veruit de belangrijkste verklarende factor is voor de samenstelling van de bodemdierengemeenschap op de Roggenplaat. Gebieden die vaker droogvallen, hebben andere leefomstandigheden dan delen die langer onder water staan, en dat bepaalt welke soorten zich vestigen. Daarnaast spelen korrelgrootte van het sediment en de bodemschuifspanning als gevolg van getijstroom en golven ook een rol, maar deze factoren zijn minder bepalend dan de droogvalduur (Figuur B2-6). Deze RDA, inclusief alle meegenomen factoren, verklaart echter slechts 17% van de totale variatie in de soortensamenstelling per monsterlocatie. Dat betekent dat er naast deze omgevingsfactoren nog veel natuurlijke variatie bestaat die niet in de huidige analyse zijn meegenomen. Deze variatie hangt samen met processen zoals schommelingen in het aantal jonge dieren, sterfte, kleine verschillen in microhabitats en andere lokale omstandigheden.

Wat betreft de hoeveelheid bodemdieren: dichtheid en biomassa nemen toe tot een droogvalduur van 40%-50% en zijn het hoogst bij een droogvalduur tussen 50% en 70%, waar voor dichtheid vooral kreeftachtige (crustacea) en voor biomassa schelpdieren de dominante groepen zijn. Het aantal soorten neemt eveneens toe tot een droogvalduur van 40%-50%, en blijft daarna redelijk stabiel (Figuur 3-2

Figuur 3-2). Kortom de droogvalduur is de sleutelvariabele die bepaalt welke bodemdieren voorkomen op de Roggenplaat, terwijl sediment en hydrodynamica een aanvullende maar kleinere rol spelen.



Figuur 3-2 Totale bodemdierdichtheid ($\sqrt[4]{N/m^2}$), biomassa ($\sqrt[4]{AFDWg/m^2}$) en aantal soorten als functie van de droogvalduur (DVD) op de Roggenplaat tussen 2019 en 2024 (alle jaren samen). Op de bodemdichtheid en biomassa is een dubbelworteltransformatie ($\sqrt[4]{}$) toegepast om de onevenredige invloed van een beperkt aantal extreem hoge waarden op de verdeling van de waarnemingen te verminderen.

Onderliggende kennisvraag voedselbeschikbaarheid voor vogels 2 (Bijlage B2.4.1) ***Is de ontwikkeling van de bodemdiergemeenschappen op de suppletie-elementen gerelateerd aan veranderingen in droogvalduur, hydrodynamica, sedimentdynamiek etc.?***

De toenemende aanlegdikte tussen de suppletie-elementen S3, S6, S2, S1, S5, S7 en S4 valt ongeveer samen met toenemende bodemhoogte, droogvalduur, mediane korrelgrootte en golf-gerelateerde bodemschuifspanning door de sterke correlatie tussen deze factoren (Figuur B2-5).

Als gevolg van verschillen in golfforcering (Figuur B1-54) en de daaraan gekoppelde erosie (Figuur B1-40) zijn Suppletie-elementen 1-3 (noordelijk) en 6 (gelegen achter een schelpenrug) substantieel minder erosief dan suppletie-elementen 4, 5 en 7 (zuidelijk; voor suppletie 5 vooral het zuidelijke deel).

Het herstel van dichtheid, biomassa en aantal soorten verloopt het traagst op de sterk erosieve suppletie-elementen S7 en S4 (Figuur B2-15). Een jaar na aanleg nemen dichtheid, soortenrijkdom en de biomassa van bodemdieren drastisch af ten opzichte van de referentiegebieden met vergelijkbare droogvalduur. Tot 2024 volgen de suppletie-elementen uiteenlopende hersteltrajecten: bij de minder erosieve suppletie-elementen 1-3 en 6 herstellen de dichtheid en samenstelling binnen 2-3 jaar tot niveaus vergelijkbaar met de omliggende plaat, terwijl bij suppletie-elementen 4, 5 en 7 het herstel beperkt blijft, vooral bij de meest erosieve suppletie-elementen 4 en 7.

De verhouding van de soortensamenstelling van de bodemdierdichtheid verandert weinig direct na de aanleg van de suppletie-elementen in 2019, waarbij borstelwormen en kreeftachtige dominant blijven (Figuur B2-16). Na een tijdelijke toename van kreeftachtige op sterk erosieve suppletie-elementen S4 en S7 in 2021 wordt de samenstelling in 2024 over alle suppletie-elementen vrij homogeen. Alleen op de minder erosieve suppletie-elementen S1, S3 en S6 blijft de bijdrage van oligochaeta, net als in de referentiegebieden, relatief hoog.

Na aanleg neemt de bijdrage van borstelwormen aan de biomassa sterk toe, gevolgd door een geleidelijke toename van schelpdieren (vooral kokkels en overige schelpdieren) tot 2024. Bij de sterk erosieve suppletie-elementen S4 en S7 blijft wormenbiomassa dominant.

De frequentieverdeling van de schelpdierprooien voor steltlopers vertoont, zowel in de kwantitatieve als in de semi-kwantitatieve monitoring, een sterke afname het jaar na de aanleg (Figuur B2-19, Figuur B2-23, Figuur B2-24). Het herstel verschilt sterk tussen de suppletie-elementen: kokkelbroed verspreidt zich breed tussen 2021-2023 (Figuur B2-23), terwijl grote kokkels in 2023-2024 vooral op minder erosieve suppletie S1 en S6 en op de meer erosieve suppletie S5 voorkomen (Figuur B2-19). Grote nonnetjes verschijnen in 2024 vooral op minder erosieve suppletie-elementen S2 en S3, waar kokkels juist minder vertegenwoordigd zijn (Figuur B2-19).

De semi-kwantitatieve monitoring laat verschillen in hersteldynamiek en ruimtelijke verdeling goed zien, zoals de snellere kolonisatie van de suppletie-elementen door jonge wadpieren versus oudere individuen. Middelgrote wadpieren zijn in 2024 homogeen aanwezig op alle suppletie-elementen, terwijl de frequentie van grote individuen afneemt met toenemende droogvalduur (Figuur B2-25).

Deze verschillen in ontwikkelingen van bodemdieren in combinatie met sterk gekoppelde gradiënten in droogvalduur, sediment samenstelling en bodemschuifspanning door golven, wijzen op een duidelijk invloed van deze factoren op de bodemdieren.

Onderliggende kennisvraag voedselbeschikbaarheid voor vogels 3 (Bijlage 5) ***Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie?***

Kennisvraag 3.1: Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie met gebiedseigen sediment en een (gedeeltelijk) levende bodemdiergemeenschap ('priming')?

Priming met sediment afkomstig van de Roggenplaat zelf (inclusief aangetast en verstoord bodemleven) versnelt de herkolonisatie. Een jaar na aanleg zijn de soortendichtheden hoger op de geprimde locaties dan

op suppleties zonder priming (zie Figuur B5-2). Het aanbrengen van gebiedseigen sediment tijdens het primen leidt bovendien tot fijner sediment, wat een waarschijnlijk een positief effect heeft gehad op het herstel van de bodemdiergemeenschap.

Kennisvraag 3.2: Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie met het transplanteren van kokkels ('kokkelpriming')?

Kokkelpriming resulteert direct na aanleg, net als priming met eigen sediment, in hogere dichtheden en een grotere diversiteit dan op de 'kale' suppletie. Echter een jaar later na aanleg is het verschil tussen kokkelpriming en de suppletie zonder priming echter zeer beperkt (Figuur B5-2). Kokkelpriming lijkt daarmee geen geschikte manier van priming.

3.3 Vogels

De kennisvragen (Tabel 1-2) richten zich op het begrijpen van de verdeling in ruimte en tijd van benthos-etende vogels op de Roggenplaat en, meer specifiek, op de suppletie-elementen. Daarbij staat centraal welke omgevingsfactoren – zoals droogvalduur, sedimentkarakteristieken, voedselbeschikbaarheid en morfologische eigenschappen – het voorkomen en de verspreiding van verschillende vogelsoorten beïnvloeden. Het beantwoorden van deze vragen is cruciaal om te begrijpen hoe veranderingen in het intergetijdengebied, als gevolg van de zandsuppleties, doorwerken in het foerageergedrag en de habitatkeuze van steltlopers en andere kustvogels.

In dit deel presenteren we de resultaten van analyses waarin de verspreiding van vogels is gerelateerd aan zowel abiotische factoren (zoals droogvalduur, korrelgrootte, bodemhelling) als biotische factoren (voedselbeschikbaarheid). Deze integrale aanpak maakt het mogelijk om soortspecifieke voorkeuren en patronen in habitatgebruik te identificeren en zo de effecten van de suppletie-elementen beter te duiden.

Onderliggende kennisvraag vogels 1 (Bijlage B3.3.1)

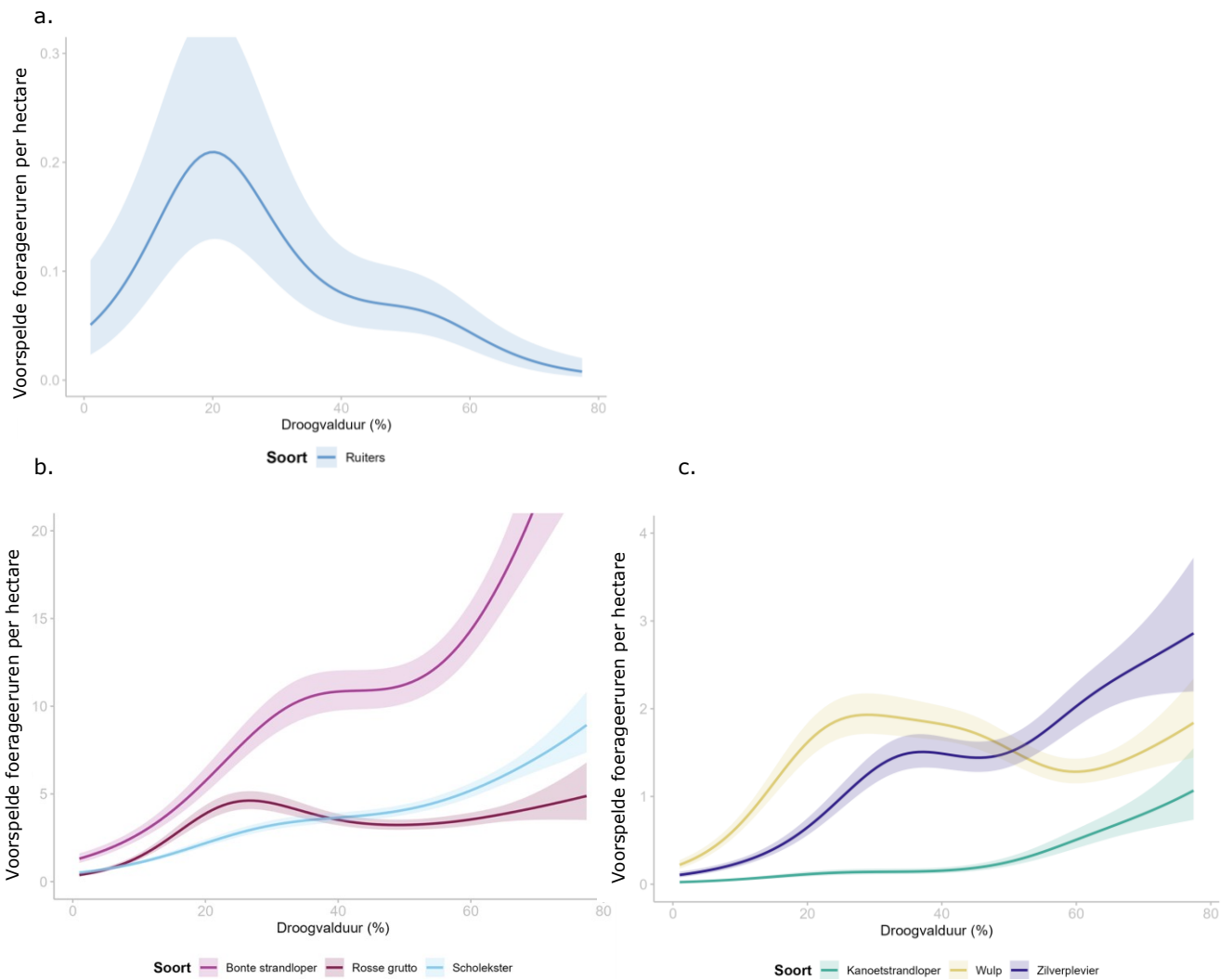
Is de verspreiding van benthos-etende vogels gerelateerd aan factoren zoals droogvalduur, sediment (vocht), voedselkwaliteit?

De onderliggende studie biedt dankzij de integrale aanpak een schat aan informatie. Hierdoor konden analyses worden uitgevoerd naar de relatie tussen de verspreiding van steltlopers en verschillende omgevingsfactoren. Voor een aantal analyses wordt de foerageertijd gebruikt, dit is de mate waarin vogels het gebied benutten, bepaald door hun aantal en de tijd die zij foerageren. Hiervoor worden alle vogels die geteld zijn 6-0 uur voor laagwater bij elkaar opgeteld en vermenigvuldigd met de 2 uur die elke telronde duurt (zie voor meer details Bijlage 3 Methodologie). De relaties tussen foerageertijd, dichtheid en omgevingsfactoren zijn bijzonder relevant, vooral met het oog op de soort-specifieke voorkeuren. Deze inzichten maken het mogelijk om ook effecten van de zandsuppleties beter te begrijpen.

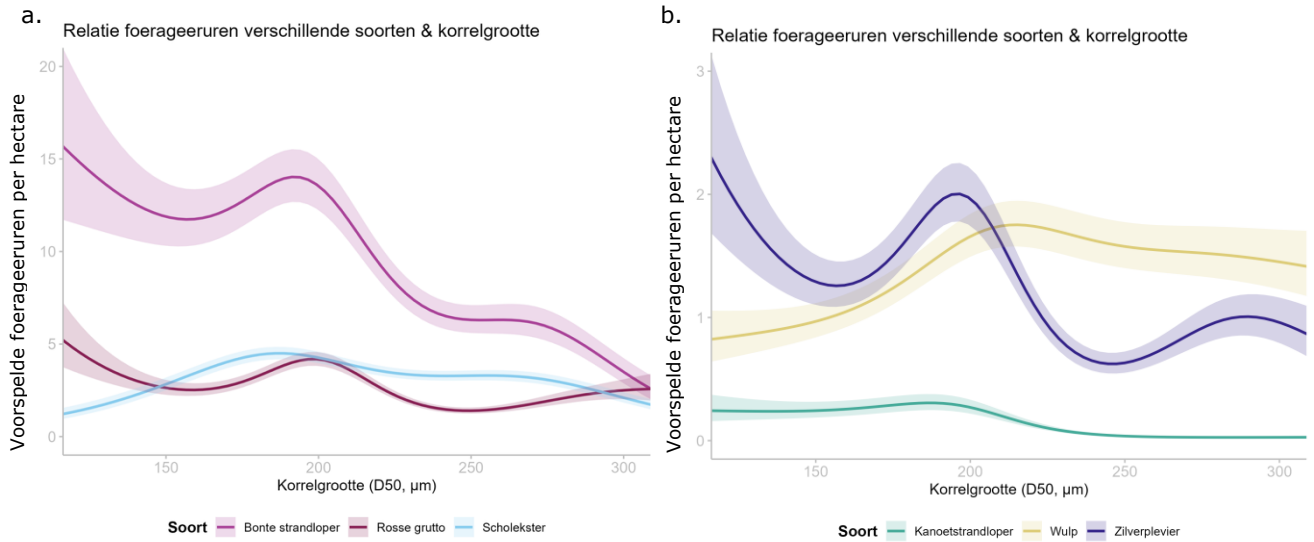
Alle onderzochte omgevingsfactoren bleken van belang voor de verspreiding van de benthos-etende vogels: de dichtheid aan bodemdieren, de droogvalduur, de positie ten opzichte van de waterlijn, sedimentsamenstelling en bodemhelling kwamen naar voren als belangrijke verklarende variabelen. Daarbij werden duidelijke verschillen gevonden tussen soorten. Een aantal soorten toonden een positieve relatie met hun veronderstelde voedsel. Zo is de foerageertijd van scholeksters hoger bij een grotere dichtheid aan relatief grotere (>1cm) schelpdieren en is de foerageertijd van de rosse grutto hoger bij een grotere dichtheid aan wormen. Voor andere steltlopersoorten is dit minder duidelijk of niet in elk jaar te zien. Consistent tussen de soorten is dat deze relatie afhankelijk is van het moment van het getij. Een relatie met voedsel is enkel te gezien later in het getij wanneer een ruimer deel van de Roggenplaat beschikbaar is om te foerageren, en de vogels ook daadwerkelijk een keuze hebben. Sommige soorten foerageren dichterbij of deels in de waterlijn: de wulp en de rosse grutto kunnen met hun lange poten en snavel ook in dieper water foerageren. Ook de ruiters foerageren met name in lageregelegen delen. De bonte strandloper, scholekster, kanoetstrandloper en zilverplevier foerageren in hogere dichtheden iets verder van de waterlijn, en foerageren vaker op de iets hoger gelegen delen, waarbij bonte strandloper en kanoetstrandloper vaak foerageren in de plassen die blijven staan (pers. obs. Deltamilieu Projecten). Bonte strandloper, rosse grutto, zilverplevieren en kanoet hebben op de Roggenplaat een hogere foerageertijd op sedimenten met een mediane korrelgrootte van met name rond de 200 µm maar foerageren over het algemeen ook in hogere mate op plekken met een fijnere korrel. De scholekster lijkt minder kieskeurig te zijn en gebruikt ook delen met een wat grovere sedimenten. De wulp is juist te zien in hogere dichtheden met een grovere korrelgrootte.

In de context van de zandsuppleties zijn vooral de droogvalduur en de korrelgrootte relevante variabelen. Suppletie-elementen bestaan doorgaans uit grover sediment dan het materiaal dat vóór aanleg aanwezig was, en verhogen bovendien delen van de plaat. Soorten die voornamelijk foerageren in lagere, langduriger overstroomde delen, profiteren daardoor minder van deze ophoging dan soorten die juist de hogere delen benutten (Figuur 3-3). Wat betreft sedimentsamenstelling zijn soorten als kanoet, bonte strandloper, rosse grutto en zilverplevier kwetsbaar, vanwege hun voorkeur voor fijner sediment op de Roggenplaat (Figuur

3-4). In hoofdstuk 4 zullen deze relaties nader worden geïnterpreteerd vanuit de profielen die per vogel zijn opgesteld.



Figuur 3-3. Voorspelde foerageeruren per hectare (6-0 uur voor laagwater) in de herfst/winter, berekend aan de hand van de modeluitkomsten per soort waarbij de andere variabelen in het model stabiel zijn gehouden, in relatie tot droogvalduur. a. de ruiters (groenpootruiter, zwarte ruiter en tureluur) en b. & c. de plots gesorteerd op voorkomen van de soorten, b. toont de soorten die talrijker zijn (bonte strandloper, rosse grutto en scholekster) en c. toont de soorten die iets minder talrijk zijn (kanoet, wulp en zilverplevier).



Figuur 3-4. Voorspelde foerageeruren per hectare (6-0 uur voor laagwater) in de herfst/winter, berekend aan de hand van de modeluitkomsten per soort waarbij de andere variabelen in het model stabiel zijn gehouden, in relatie tot mediane korrelgrootte (van fijne naar grovere korrel). De plots zijn gesorteerd op voorkomen van de soorten, a. toont de soorten die talrijker zijn (bonte strandloper, rosse grutto en scholekster) en b. toont de soorten die iets minder talrijk zijn (kanoet, wulp en zilverplevier).

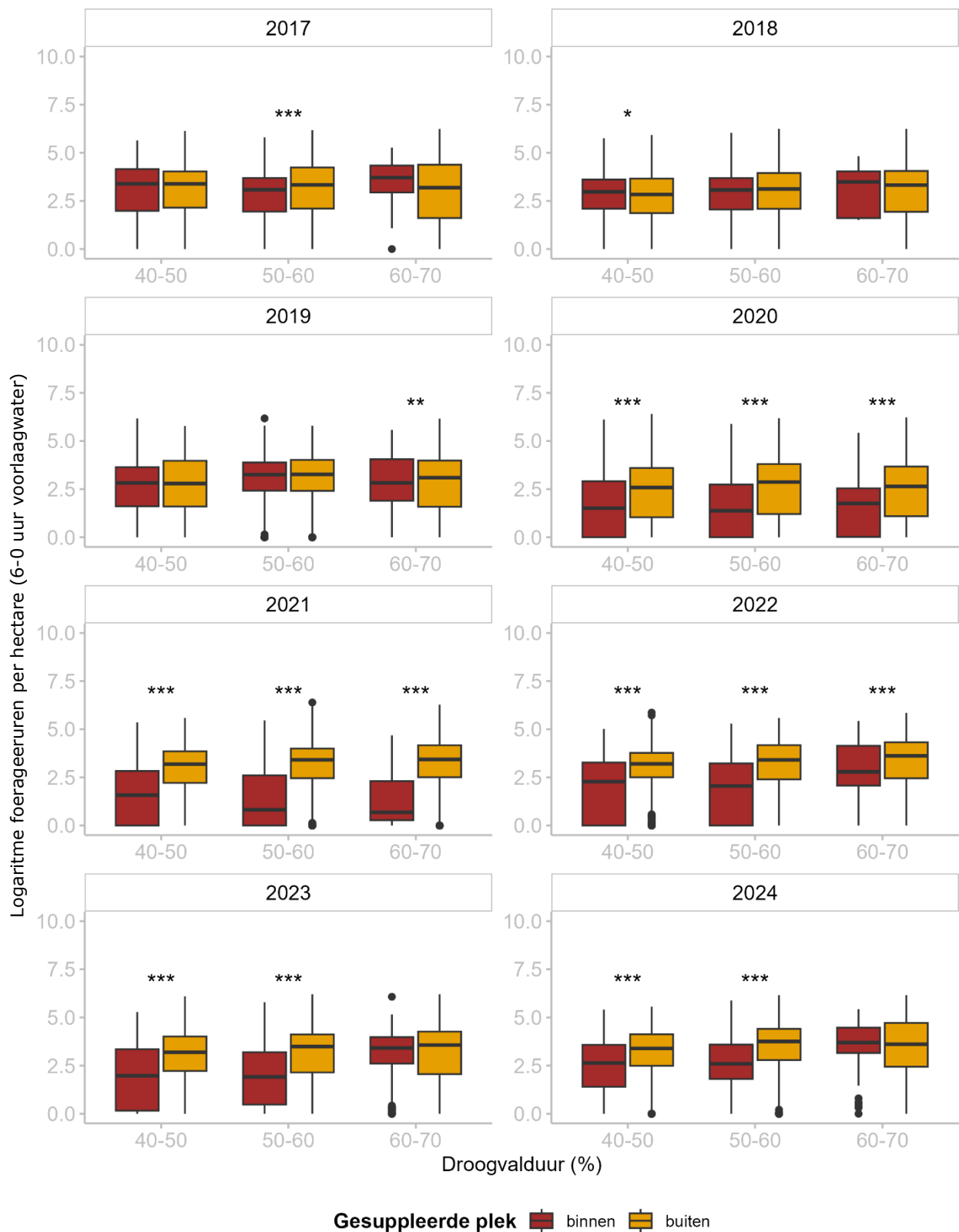
Onderliggende kennisvraag vogels 2 (Bijlage B3.3.2)

Hoe worden de suppletie-elementen benut door benthos-etende vogels in vergelijking tot niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat?

Zoals blijkt uit het ruimtelijk gebruik van de steltlopers, worden de gesuppleerde delen direct na aanleg deels gemeden, met name later in het getij (2-0 uur voor laagwater). Na enkele jaren neemt de foerageertijd in uren op de suppletie-elementen geleidelijk weer toe met name vanaf 2022, al blijven sommige suppletie-elementen achter zoals suppletie-elementen 1, 2 en 7 alhoewel aantallen fluctueren per jaar. De foerageertijd is bij bijna alle suppletie-elementen stijgend. Omdat de suppletie-elementen hoger liggen dan voorheen, is een vergelijking met delen van de Roggenplaat met vergelijkbare droogvalduur van belang. Deze vergelijking laat zien dat, binnen elke droogvalduurklasse, de foerageertijd op de gesuppleerde delen toeneemt, en op de hogere delen (60-70% droogvalduur) weer gelijk is met de foerageertijd buiten suppletie-elementen (Figuur 3-5). De lagere delen blijven achter qua foerageertijd (<60% droogvalduur), maar nemen sinds de aanleg wel nog elk jaar toe.

Een aanvullende analyse over de winterperiode laat grotendeels hetzelfde patroon zien. Voor deze analyse is een striktere selectie van de gesuppleerde delen gebruikt (enkel tussen 40-70% droogvalduur) en een even groot aantal referentiepunten naast de suppletie-elementen met zo vergelijkbaar mogelijke droogvalduur. In dit model zijn ook de andere relevante variabelen meegenomen die de verspreiding van benthos-etende vogels beïnvloeden, en is gericht op het najaar en winter van de benthosbemonstering. Hieruit blijkt dat de gesuppleerde delen al vóór de aanleg van de suppletie-elementen een lagere foerageertijd kenden, en dat dit verschil in foerageertijd in de winter van 2021-2022 verder toenam. De winter van 2022-2023 was de foerageertijd weer gelijk met die van voor de suppletie-elementen, maar de laatste winter (2024-2025) nam deze sterk af (Bijlage 3). De laatste winter bevat echter minder teldagen, waarvan de helft plaatsvonden bij relatief hoog water waardoor de Roggenplaat niet of nauwelijks droogviel gedurende 6-4 uur voor laagwater. De grotere verschillen in foerageertijd in deze winterperiode zijn mogelijk te verklaren doordat de hoger liggende suppletie-elementen vaker vroeg in het getij wanneer er meer en lageregelegen delen beschikbaar zijn, worden benut en minder laat in het getij (6-4 uur voor laagwater), wat ook zichtbaar is op de verspreidingskaarten (Figuur).

Gezien de voorkeur van verschillende benthos-etende vogelsoorten voor fijner sediment en het grovere sediment dat bij de suppletie-elementen is gebruikt, ligt het voor de hand dat de achterblijvende foerageeruren deels hiermee samenhangt. Echter, suppletie-elementen waarbij verfijning is opgetreden wat betreft sedimentsamenstelling, zijn niet persé suppletie-elementen die weer in dezelfde mate gebruikt worden voor foerageren. De foerageertijd in uren was vanaf 2022 juist op twee suppletie-elementen met weinig verfijning weer op het niveau van voor aanleg van de suppletie-elementen (4 en 5). Deze suppletie-elementen worden met name vroeg in de ebperiode gebruikt, vanwege hun hogere ligging vergeleken met de meeste andere suppletie-elementen. Een derde hoge suppletie (7) wordt echter wisselend gebruikt. Een combinatie van hoogteligging, herstel van bodemdieren en sediment verklaart hierbij waarschijnlijk het gebruik. Ondanks verfijning van het sediment op sommige suppletie-elementen (1, 2, 3 en 6) blijft het sediment namelijk nog steeds relatief grof ten opzichte van de rest van de plaat (Figuur B1-5). Tegelijkertijd is er een grote variatie in foerageertijd tussen suppletie-elementen onderling, waarvan de oorzaak nog niet eenduidig uit deze analyse naar voren komen.



Figuur 3-5. Logaritme foerageeruren per hectare (6-0 uur voor laagwater) van benthos-etende vogels (doelsoorten: steltlopers en bergeend) in relatie tot droogvalduur in categorieën, bekeken voor plekken die gesuppleerd zijn (binnen) en niet gesuppleerd zijn (buiten). Droogvalduur <40% en >70% zijn weggelaten omdat er daar in heel beperkte mate suppletie-elementen liggen. De y-as is aangepast zodat de figuur leesbaar is; er zijn erg veel uitschieters. Significante verschillen tussen gesuppleerde delen en niet gesuppleerde delen binnen een droogvalduurklasse en jaar zijn aangegeven met 1, 2 of 3 asterisken (p-waarde van <0.05, <0.01 of <0.001 respectievelijk). Eind 2019 vond aanleg van de suppletie-elementen plaats, de jaren 2017, 2018 en 2019 zijn de jaren voor aanleg en de jaren 2020 tot en met 2024 zijn de jaren na aanleg van de suppletie-elementen.

4 Synthese van de eco-morfologische ontwikkeling vanuit perspectief van de vogels

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk brengen we de inzichten uit vijf jaar monitoring samen en werken we toe naar een geïntegreerd beeld van de eco-morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat na suppletie. Daarbij leggen we de nadruk op het verbinden van disciplines vanuit het vogelperspectief: we leggen verbanden tussen het gebruik van de getijdenplaat door vogels, de aanwezigheid en ontwikkeling van bodemdieren en de hydromorfologie en sedimentdynamiek welke aan de basis van de habitatkwaliteit staat.

Om deze integratie te structureren, gebruiken we het foerageergedrag en de habitatkeuzes van kustvogels als vertrekpunt voor de interpretatie van de resultaten. De reden hiervoor is tweeledig:

- Doelsoorten centraal: Het behoud van foeragerende kustvogels – met name steltlopers en bergeenden (Tabel 1-1) – vormt het primaire motief voor de suppletiemaatregel.
- Vogels als indicatoren: Als toppredatoren en indicatorsoorten maken vogels ecologische processen zichtbaar die anders moeilijk te duiden zijn op het schaalniveau van een getijdenplaat.

4.2 Aanpak en methodiek

Om tot een integrale analyse vanuit vogelperspectief te komen hebben we:

- 1) vogelprofielen van de soort-specifieke morfologische en ecologische kenmerken opgesteld van een brede groep kustvogels welke bekend staan om hun gebruik van getijdenplaten als foerageerhabitat;
- 2) een analyse op variatie en overeenkomsten tussen verschillende vogelsoorten in deze soort-specifieke morfologische en ecologische kenmerken uitgevoerd;
- 3) de verwachtingen die vanuit de vogelprofielen komen vergeleken met de waarnemingen op de Roggenplaat. De focus is hier op de doelsoorten omdat die in de meeste gevallen als indicatorsoort van een bredere groep vogels kunnen fungeren. Daar waar de waarnemingen afwijken van de profielen duiden we deze op basis van de onderliggende waargenomen eigenschappen op de Roggenplaat en de suppletie-elementen.

Voor de analyse hanteren we een kenmerkenbenadering gebaseerd op functionele eigenschappen van 22 kustvogelsoorten om vogelprofielen op te stellen (zie bijlage 7 voor methodische details). Op basis van literatuur over morfologische eigenschappen van kustvogels (o.a. Pigot et al., 2020; Tobias et al., 2022), studies naar voedselvoorkeuren (Leopold et al., 2004; Zwart et al., 2011), eerdere onderzoeken in de Oosterschelde (Bouwmeester, 2015; van de Kam et al., 2017) en expertkennis (de Vet et al., 2023; Jacobusse, 2014) zijn soort-specifieke profielen opgesteld (Tabel 4-1).

Functionele kenmerken die zijn meegenomen in de profielen en die de soort-specifieke vogelmorfologie en de leefomgeving beschrijven, zijn onder andere:

- Lichaamsgrootte en -massa: gerelateerd aan energiebehoefte, foerageertijd en ruimtegebruik.
- Snavel- en pootlengte: bepalend voor de bereikbaarheid van prooien in verschillende sedimenttypes en waterdieptes.
- Voedselvoorkeur en dieetbreedte: type prooien (bijv. schelpdieren, wormen, kreeftachtigen/anders) en mate van specialisatie.
- Foerageergedrag: endobenthisch (zoeken bodemdieren in het sediment) versus epibenthisch (zoeken op of boven het oppervlak).
- Zoekstrategie: visueel (op zicht) versus tactiel (op tast).

Door naar functionele kenmerken te kijken wordt het mogelijk om ook iets te zeggen over het foeragegedrag van vergelijkbare, minder of niet voorkomende soorten op de Roggenplaat. Daarnaast geeft het een beeld van de diversiteit aan eisen die verschillende soorten stellen aan hun leefgebied en daarmee de diversiteit die een intergetijdengebied zou moeten leveren om aan alle behoeftes te voldoen. Deze benadering maakt het mogelijk om ecologische patronen en trends op een hoger niveau te koppelen aan veranderingen in de fysieke inrichting en ontwikkeling van de getijdenplaat, inclusief de suppletie-elementen. Dit is vooral waardevol voor soorten waarvoor relatief weinig waarnemingen beschikbaar zijn. Met behulp van PCA-analyses (Principal Component Analysis) is de belangrijkste variatie in morfologische kenmerken onderzocht in relatie tot de ecologische niche van de vogelsoorten, om inzichten te krijgen in hoe de ruimtelijke morfologie van de Roggenplaat inclusief suppletie-elementen de beschikbaarheid en benutting van foerageerhabitats beïnvloeden (Bijlage 7).

4.3 Integrale analyse

4.3.1 Vogelprofielen

Op basis van literatuur en expertkennis zijn voor relevante soorten –de doelsoorten uit Tabel 1-1, aangevuld met andere vogelsoorten die de Roggenplaat als foerageergebied zouden kunnen benutten– functionele profielen opgesteld (Tabel 4-1). Voedselvoorkeuren bepalen in belangrijke mate deze profielen. Figuur 4-1 toont in een driehoekdiagram de relatieve dieetvoorkeur van de kustvogelsoorten meegenomen in de integrale analyse, met onderscheid tussen wormen, schelpdieren en schaaldieren/anders. Daarnaast bevatten deze profielen kerninformatie over lichaamsgrootte, -massa, snavel- en pootlengte, foerageerstrategie, zoekstrategie en habitatvoorkeur.

De doelsoorten, en andere kustvogels die de Roggenplaat als foerageergebied gebruiken, vertonen een brede variatie in morfologische eigenschappen. Soorten als de wulp, lepelaar en zilverreiger hebben lange poten en snavels en kunnen daardoor ook in dieper water foerageren, terwijl soorten als de bonte strandloper en de kanoetstrandloper juist zijn aangepast aan ondiepere delen. Deze functionele variatie benadrukt het belang van een divers foerageerlandschap waarin meerdere functionele niches worden ondersteund.

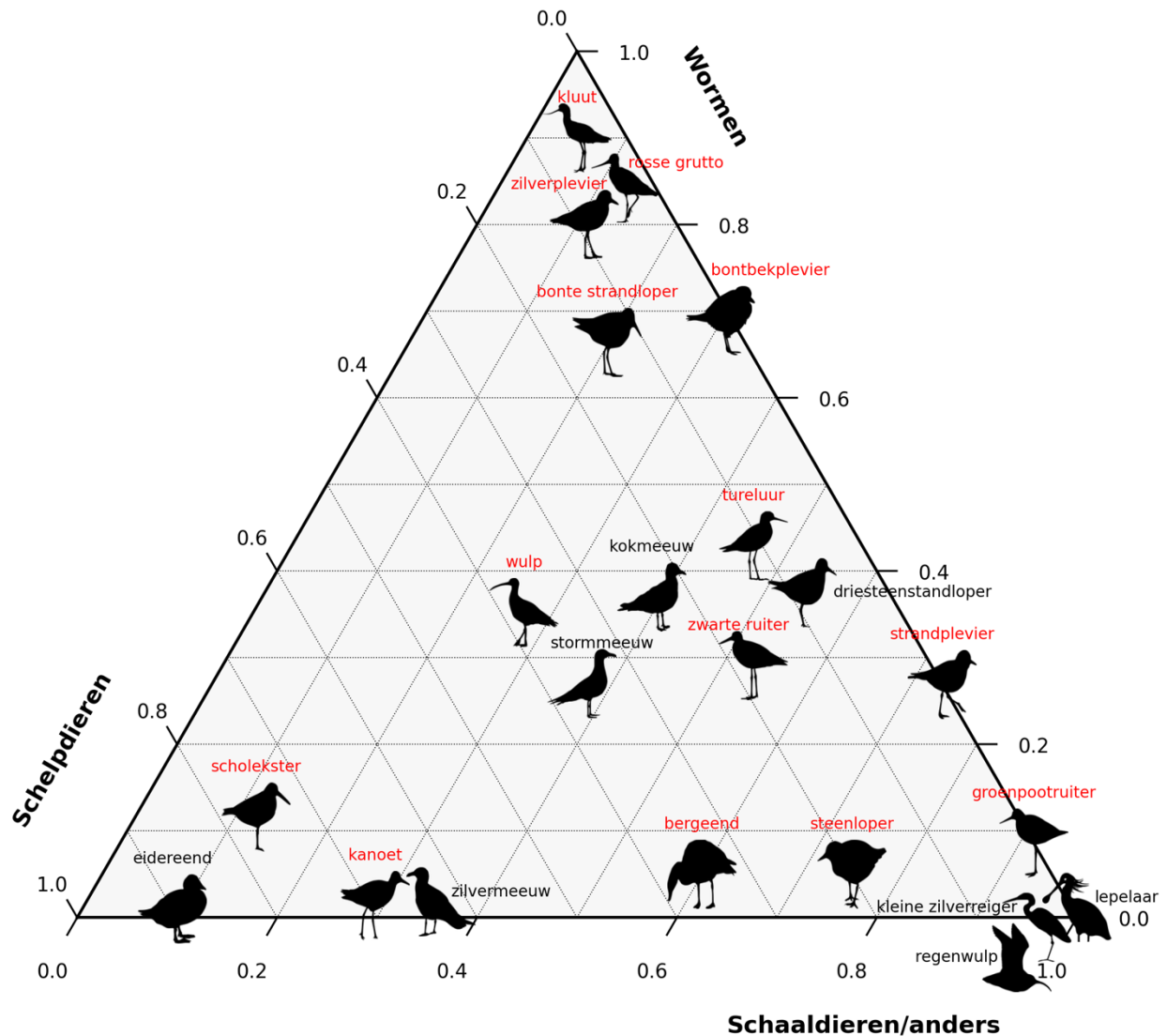
Vogelsoorten die op schelpdieren en wormen foerageren vinden hun voedsel meestal op de tast (tactiel foerageren), omdat deze voedselbronnen zich in de bodem bevindt (endobenthos). Soorten die zich richten op schaaldieren (zoals kreeftachtige) of andere prooien zijn daarentegen afhankelijk van voedsel dat zich aan, op of net boven het sedimentoppervlak bevindt (epibenthos). De wulp heeft, volgens de beschikbare literatuur, een van de meest gevarieerde diëten, met een ongeveer gelijk aandeel van alle drie de voedselcategorieën. Op de Roggenplaat wordt deze soort echter voornamelijk als wormeneter beschouwd (pers. comm. Delta Milieu Projecten). De kluut, rosse grutto en zilverplevier eten eveneens vooral wormen. De lepelaar en kleine zilverreiger –geen doelsoorten maar wel meegenomen in de PCA-analyse (bijlage 7) – foerageren voornamelijk op vis en garnalen uit plassen en ondiep water. De bergeend, wel relevant als doelsoort, heeft een dieet dat voor circa 60% bestaat uit epibenthische soorten, zoals wadslakjes en schaaldieren (bijv. slijkgarnaal). De scholekster, kanoet en eidereend hebben daarentegen een overwegend schelpdierdieet. Het behouden van een divers pallet van voedseltypes en microhabitats –waarin zowel bodemdieren en epibenthische soorten kunnen voorkomen– is van groot belang om ervoor te zorgen dat voedselbronnen ook binnen de suppletie-elementen beschikbaar blijven.

4.3.2 Functionele vogeleigenschappen

Om de functionele verschillen tussen kustvogelsoorten beter te begrijpen, is een statistische analysemethode (Principal Component Analysis (PCA)) uitgevoerd, opgesplitst in kenmerken van de vogelmorfologische en ecologische variabelen (Bijlage 7).

Vogelmorfologie

De PCA van de morfologische kenmerken laat zien dat de meeste variatie wordt verklaard door algemene lichaamsgrootte, vleugel- en snavelkenmerken, en snavelvorm. De eerste component (PC1, 72,3% van de variatie) correleert sterk met lichaamsgrootte: grotere en zwaardere soorten met lange vleugels, staarten en snavels (zoals scholekster en wulp) scoren hoog, terwijl kleine soorten met compacte vleugels en korte snavels (zoals strandlopersoorten) lage waarden hebben. PC2 (15,8%) onderscheidt soorten op basis van vleugelvorm versus snavellengte, waarbij aerodynamische soorten met goede vliegeigenschappen negatief scoren en soorten met lange snavels, aangepast aan diepere of nattere sedimenten, positief. PC3 (6,8%) reflecteert de snavelvorm, van lang en smal (geschikt voor penetreren in zacht sediment) tot kort en diep (geschikt voor krachtig openen van schelpen). Samen verklaren deze drie assen 94,8% van de morfologische variatie en bieden ze een kwantitatieve basis om functionele verschillen in foerageerpotentieel te vergelijken.



Figuur 4-1. Vogelsoort-specifieke voedselvoorkeuren. Deze driehoekfiguur geeft de voedselvoorkeuren weer van de doelsoorten (rode labels, zie tabel 4-1) en andere waargenomen vogelsoorten op de Roggenplaat (gemodificeerd en uitgebreid naar Leopold et al., 2004). De assen van de driehoek representeren: Schelpdieren en wormen (endobenthisch –in de bodem- voedsel), schaaldieren/anders, waaronder vooral epibenthische –op/boven de bodem- schaaldieren, wadslakjes, alikruiken en wieren vallen. Vogels die in de hoeken van de driehoek staan, hebben een duidelijke voorkeur voor één type voedsel. Soorten die in het midden van de driehoek staan, zijn minder specifiek en eten een gevarieerd dieet. Om overlappende pictogrammen in de hoekpunten te voorkomen zijn deze soorten buiten de driehoek geplaatst.

Ecologie

De PCA van de ecologische kenmerken laat zien dat de eerste drie componenten ruim 83% van de variatie verklaren. PC1 (47%) weerspiegelt de foerageerstrategie, van epibenthische soorten die hun prooi op of boven het sediment zoeken, tot endobenthische soorten die bodemdieren opgraven. PC2 (22%) correleert met voedseltype, van schelpdiereters op hardere substraten tot wormeneters op zachtere sedimenten. PC3 (14%) wordt grotendeels bepaald door substraatvoorkeur, variërend van harde, stabiele bodems tot zachte, dynamische platen, met een lichte bijdrage van gedragskenmerken zoals visueel foerageren en generalisme in voedselkeuze.

Een gecombineerde interpretatie van de vogelmorfologische en ecologische kenmerken van de vogelsoorten maken het mogelijk de verschillende vogelsoorten te positioneren in een multidimensionale functionele ruimte. Kleine steltlopers zoals bonte strandloper en kanoet clusteren op gebieden met lange droogvalduur (hogere litoraal), terwijl grotere soorten zoals wulp en scholekster gespecialiseerde strategieën volgen voor grovere prooien op plekken met kortere droogvalduur. Soorten met vergelijkbare ecologische kenmerken maar verschillende morfologie, zoals eidereend en zilvermeeuw, tonen dat functionele differentiatie zowel door lichaamsbouw als door foerageerstrategie wordt bepaald.

Tabel 4-1. Vogelprofielen met de meest relevante functionele eigenschappen, geselecteerd uit een uitgebreidere database. Er is een beperkt aantal doelsoorten geanalyseerd om verbanden vast te stellen tussen foerageergedrag en omgevingsfactoren. In rood staan de soorten weergegeven die als individuele soort zijn geanalyseerd, en in blauw staan de Ruiters (*Tringa spp.*) die als groep zijn geanalyseerd (Bijlage 3.B3.3.1).

Naam	Doel-soort	Gewicht (g)	Snavel-lengte (mm)	Tarsus lengte (mm)	% Schelp-dier	% worm	% anders	% epi-benthos	% Endo-benthos	Zoek-strategie	Substraat (µm)
steenloper (<i>Arenaria interpres</i>)	ja	136	25.4	25.5	20	5	75	75	25	visual	125-250
driesteenstandloper (<i>Calidris alba</i>)		51.7	30	23.1	8.7	37.5	53.8	32.5	67.5	visual/ tactile	250-500
bonte strandloper (<i>Calidris alpina</i>)	ja	51.9	36.9	24.7	13.8	66.4	19.8	19.3	80.7	tactile	125-250
kanoet (<i>Calidris canutus</i>)	ja	141.9	37.5	29.9	69.5	1.4	29.1	26.7	73.3	tactile	125-250
strandplevier (<i>Charadrius alexandrinus</i>)	ja	42.3	16.3	26.5	0	26.9	73.1	26.9	73.1	visual	125-250
bontbekplevier (<i>Charadrius hiaticula</i>)	ja	64	16.1	25.3	1.2	68.9	29.9	27	73	visual	125-250
kokmeeuw (<i>Chroicocephalus ridibundus</i>)		284	43.4	41.4	24	37	39	39	61	visual	125-250
kleine zilverreiger (<i>Egretta garzetta</i>)		312	94.6	98.8	0	0	100	100	0	visual	250-500
scholekster (<i>Haematopus ostralegus</i>)	ja	526	76.1	49.9	76.3	11.6	12.1	23.7	76.3	visual/ tactile	125-250
zilvermeeuw (<i>Larus argentatus</i>)		1091	74	63.2	63.7	1.8	34.5	34.5	65.5	visual	125-250
stormmeeuw (<i>Larus canus</i>)		412.5	47.8	49.4	36	27	37	37	63	visual	125-250
rosse grutto (<i>Limosa lapponica</i>)	ja	291.7	92.5	53.2	2.9	84.2	12.8	8.9	91.1	tactile	125-250
wulp (<i>Numenius arquata</i>)	ja	803	145.8	82.7	37.7	35.2	27.1	27.7	72.3	tactile	250-500
regenwulp (<i>Numenius phaeopus</i>)		364.6	92.1	59.9	0	0	100	100	0	tactile	250-500
lepelaar (<i>Platalea leucorodia</i>)		1868	190.3	129	0	0	100	0	100	tactile	125-250
zilverplevier (<i>Pluvialis squatarola</i>)	ja	250	32	44.5	9.3	80	10.7	16.9	83.1	visual	125-250
kluut (<i>Recurvirostra avosetta</i>)	ja	304	83.7	86.9	5	90	5	5	95	tactile	63-125
eidereend (<i>Somateria mollissima</i>)		2060.9	62.1	47.5	90	1	9	9	91	visual	125-250
Bergeend (<i>Tadorna tadorna</i>)	ja	1146.8	54.2	51.6	35	5	60	60	40	visual	63-125
zwarte ruiters (<i>Tringa erythropus</i>)	ja	158	63	57.2	3.4	29.1	53.1	53.1	32.6	visual/ tactile	63-125
Groenpootruiter (<i>Tringa nebularia</i>)	ja	187	63.6	58	0	8.6	91.4	91.4	8.6	visual/ tactile	125-250
Tureluur (<i>Tringa totanus</i>)	ja	129	45.1	47.3	10.9	42.9	46.2	48.7	51.3	visual/ tactile	63-125

4.3.3 Kwalitatieve toetsing waarnemingen aan vogelprofielen

Op basis van de databronnen, literatuur en expert judgement en de daaropvolgende PCA-analyse kunnen verwachtingen worden geformuleerd over hoe de verschillende soorten de Roggenplaat, inclusief de suppletie-elementen, gebruiken. Deze verwachtingen kunnen vervolgens worden vergeleken met het waargenomen vogelgebruik op de getijdenplaat.

Selectie soorten voor toetsing

In deze vergelijking is voornamelijk gefocust op individuele soorten, die slechts beperkt zijn gegroepeerd. De analyse richt zich op de bonte strandloper, rosse grutto, wulp, kanoetstrandloper, scholekster, zilverplevier en de ruiters (als groep bestaande uit groenpootruiter, tureluur en zwarte ruiter, zie Tabel 4-2) (B3.3.1). Deze selectie is gemaakt omdat het voorkomen van soorten sterk verschilt in frequentie en aantallen. Wanneer bijvoorbeeld de bonte strandloper en bontbekplevier worden samengenomen vanwege hun vergelijkbare lichaamsgrootte en wormrijk dieet, zal het resulterende patroon grotendeels door de bonte strandloper worden bepaald, omdat deze soort in veel grotere aantallen voorkomt. Daarnaast zijn er soorten die in de PCA duidelijk afzonderlijk clusteren, maar waarvan de aantallen te laag zijn of de tellingen te inconsistent over de jaren om robuuste analyses uit te voeren. Dit zijn soorten zoals kleine zilverreiger, lepelaar en kluut. Meeuwen zijn tot 2017 ook niet consequent geteld en zijn daarom buiten de statistische analyse gelaten. De nadruk ligt in dit onderzoek op de doelsoorten: de benthos-etende vogels (steltlopers en bergeend). De rest van de soorten kunnen in de PCA worden beschouwd als representatief voor een bredere functionele groep. De *Tringa spp.* zijn als groep geanalyseerd; hoewel er onderlinge verschillen bestaan, vertonen zij sterke overeenkomsten in uiterlijk, foerageertechniek en het gebruik van vergelijkbare habitats op de Roggenplaat (B3.3).

Kenmerken geselecteerde soorten

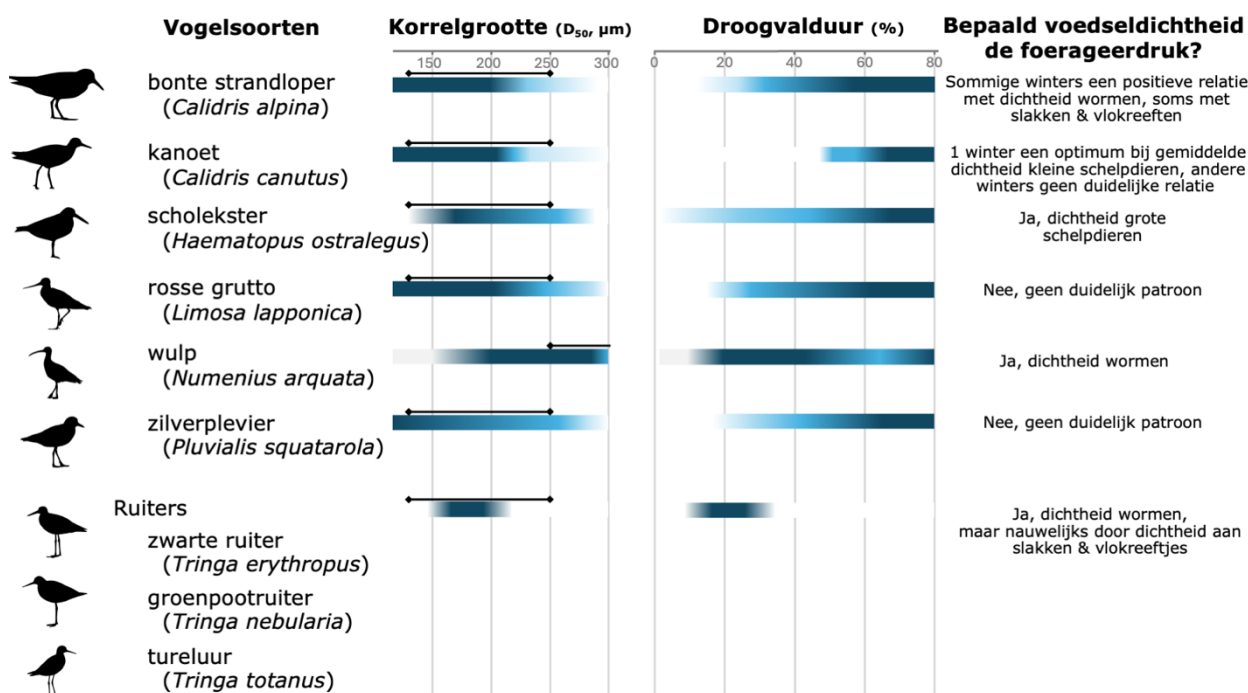
De meeste geselecteerde soorten foerageren hoofdzakelijk op endobenthos, gebruikmakend van een tactiele foerageertechniek. Binnen deze soorten bestaan duidelijke verschillen in lichaamsgrootte (Tabel 4-1) en dieet (Tabel 4-2). Zo foerageren de bonte strandloper, rosse grutto en wulp voornamelijk op wormen (endobenthisch), maar vertegenwoordigen zij verschillende grootteklassen (respectievelijk klein, middelgroot en groot). De kanoet en scholekster eten overwegend schelpdieren, maar verschillen eveneens in lichaamsgrootte. De ruiters en zilverplevieren onderscheiden zich doordat plevieren visueel foerageren, terwijl ruiters beide foerageertechnieken combineren. Over het algemeen foerageren ruiters minder endobenthisch en richten zij zich vaker op prooien meer op of net boven het sedimentoppervlak.

Alle vogelsoorten hebben een voorkeur voor een flauw talud; hierin is bijna geen onderscheid tussen soorten gevonden. De zilverplevier laat hier wel een iets afwijkend patroon zien omdat deze soort ook iets meer gebruik maakt van licht steilere bodemhellingen. Grotere verschillen tussen soorten zijn te vinden in het gebruik van omgevingsfactoren substraat, droogvalduur en voedsel. Soorten met een voorkeur voor zeer fijn en slibrijk sediment brengen aanzienlijk minder foerageertijd door op de grovere korrelgrootte van de suppletie-elementen. De meeste vogelsoorten geven de voorkeur aan foerageren op fijn tot zeer fijn zandige plaatsen.

Kwalitatieve toetsing

Voor de drie wormeneters (bonte strandloper, rosse grutto en wulp) geldt dat de dichtheid aan wormen niet altijd een verklarende factor was in hun verspreiding. Voor de rosse grutto werd geen duidelijk patroon met voedsel gevonden, de bonte strandloper had in sommige winters een positieve relatie met de dichtheid aan wormen, en de wulp toonde een duidelijke positieve relatie met de dichtheid aan hun prooidieren. Opvallend genoeg was er wel een positieve relatie tussen dichtheid aan wormen en de dichtheid aan rosse grutto's en bonte strandlopers in de tweede telronde (4-2 uur voor laagwater). Mogelijk spelen voor deze kleinere soorten later in het getij andere variabelen een grotere rol. De twee grotere wormeneters maakten gebruik van plekken met een kortere droogvalduur, waarbij de wulp nog iets lager zit vergeleken met de rosse grutto. Alhoewel de bonte strandloper ook de lagere delen van de plaat gebruikte, zit deze soort veel meer dan de twee grotere wormeneters op hogere delen, waarschijnlijk in het begin van het getij wanneer er weinig plekken droogvallen en daardoor de dichtheden of foerageertijd in uren per hectare aan vogels ook vaak hoger zijn (6-4 uur voor laagwater). De wulp verschilt dan weer van de bonte strandloper en rosse grutto in hun voorkeur voor grover sediment (Tabel 4-2).

Tabel 4-2. Waargenomen voorkeuren en kwalitatieve vergelijking met vogelprofielen (op basis van de resultaten in bijlage 3). Voor korrelgrootte en droogvalduur geeft de balk met blauwe gradiënt de waargenomen waarden op de Roggenplaat weer. Het zwarte lijnstuk per vogelsoort toont de verwachte voorkeur op basis van het vogelprofiel.



De schelpdiereters scholekster en kanoet gebruiken juist meer de hogere delen van de plaat, vergeleken met een aantal andere soorten. De soorten verschillen echter in hun gebruik van sedimenttype: De scholekster, die foerageert op grotere schelpdieren, toont een voorkeur voor iets grover substraat (180–250 μm) vergeleken met de kanoet (100–200 μm). Het verschil tussen voorkeur in sediment, suggereert dat de soorten op de Roggenplaat op andere schelpdieren foerageren. De scholekster foerageert meestal op relatief oudere en grotere schelpdieren vergeleken met de kanoet. Mogelijk foerageren beide soorten op andere schelpdieren. Ondanks dat de dieetkeuze van deze soorten uitgebreid bestudeerd is, toont alleen de scholekster een duidelijke relatie met de dichtheid aan schelpdieren. De kanoet laat in 1 winter een hogere dichtheid zien bij een gemiddelde dichtheid aan kleine schelpdieren, en dit komt ook uit de analyse in de tweede telronde (4-2 uur voor laagwater). Ondanks dat de andere winters en telrondes geen relatie laten zien, is dit wel een interessante bevinding en komt overeen met eerdere studies (Bijleveld et al. 2016).

De soorten die meer visueel foerageren -de zilverplevier en de ruiters- tonen geen duidelijke verschillen met de soorten die voornamelijk tactiel foerageren. Wat wel opvalt is de sterke selectie van de ruiters voor plekken met een zeer korte droogvalduur. Verder vertonen zij een positieve relatie met de dichtheid aan wormen. Zilverplevieren gebruiken de hele variatie aan droogvalduur van hoog tot laag, maar gebruiken net als de bonte strandloper, kanoet en scholekster ook de hogere delen veelvuldig. Over de verschillende dieetvoorkeuren heen is er geen duidelijk verschil zichtbaar in het gebruik van droogvalduurklassen tussen grote en kleine vogels. Alleen binnen de groep met een wormrijk dieet treden verschillen op: kleine soorten benutten de hogere droogvalduurklassen en foerageren langer, geheel in lijn met eerdere bevindingen (Bouwmeester, 2015; De Vet et al. 2023).

De suppletie-elementen blijken grotendeels te voldoen aan de habitatvereisten van de belangrijkste doelsoorten, met name voor sommige soorten die afhankelijk zijn van langere droogvalduur (50–80%). De meeste soorten hebben een voorkeur voor fijner sediment en daarom is de verfijning van de suppletie-elementen van groot belang voor de meeste doelsoorten in dit onderzoek. Echter blijven sommige suppletie-elementen relatief grof, en worden de hogere grovere suppletie-elementen wel (deels) gebruikt in vergelijkbare mate als voor de suppletie-elementen. Dit kan mogelijk verklaard worden door hun hogere ligging waardoor ze interessant worden voor een aantal soorten die hogere droogvalduuren meer gebruiken zoals bonte strandloper, scholekster, kanoet en zilverplevier. Van deze soorten is de kanoet echter niet in dezelfde mate teruggekeerd op suppletie-elementen. Voor deze soort spelen sedimenteigenschappen mogelijk een grotere rol dan droogvalduurklasse in de keuze voor foerageerhabitat. Voldoende fijnzandig

sediment is cruciaal voor de meeste doelsoorten, maar het is ook belangrijk om variatie aan te brengen zodat soorten zoals de wulp en de scholekster eveneens gefaciliteerd worden.

Op basis van deze kwalitatieve toetsing tussen de opgestelde vogelprofielen en de waarnemingen op de Roggenplaat kunnen we een eerste reflectie geven op de randvoorwaarden en ontwerpprincipes vanuit vogelperspectief. Hiermee kunnen we de ecologische kwaliteit van de Roggenplaat-suppletie beter duiden. Wanneer vogels daadwerkelijk op een suppletie foerageren, betekent dit immers dat er voldoende voedsel aanwezig is en dat de habitatkwaliteit in de praktijk aan hun eisen voldoet. Als een suppletie de behoeften van een soort, zoals beschreven in de vogelprofielen, benadert of afdekt, voldoet de maatregel in potentie aan de ecologische vereisten voor deze doelsoorten. De voorwaarden voor het behalen van het ecologisch doelbereik omvatten daarmee een samenhangende combinatie van substraat, droogvalduur, bodemhelling, voedselbeschikbaarheid en andere habitatkenmerken die een soort in staat stellen effectief te foerageren en zich langdurig te handhaven. Wanneer één of meer van deze kenmerken niet voldoende wordt benaderd — bijvoorbeeld door een te grof substraat of een te korte droogvalduur — zal de soort de suppletie suboptimaal benutten en mogelijk minder frequent of minder intensief gebruiken.

Conclusies

De analyses in dit hoofdstuk laten zien dat de ecologische kwaliteit van de Roggenplaat in sterke mate wordt bepaald door de samenhang tussen droogvalduur, sedimenteigenschappen en habitatdiversiteit. De PCA-analyses bevestigen dat vooral lichaamsgrootte en energiebehoefte een belangrijke rol spelen in het foeragegedrag van kustvogels: grotere soorten kunnen sneller profiteren van het beschikbare prooiaanbod, terwijl kleinere steltlopers meer tijd nodig hebben om hun dagelijkse voedselquota te behalen. Dit onderstreept het belang van een voldoende lange droogvalduur voor alle doelsoorten en biedt een herbevestiging van de ecologische onderbouwing voor de huidige doelindicator van 50–80% droogvalduur. Daarnaast blijkt het behoud van een divers aanbod aan voedseltypen en microhabitats essentieel om zowel bodemdieren als epibenthische prooisoorten binnen de suppletie-elementen beschikbaar te houden. Hoewel over voedselgroepen heen geen grote verschillen zichtbaar zijn in het gebruik van droogvalduurklassen, maken met name kleine soorten met een wormrijk dieet intensiever gebruik van de hogere droogvalduurklassen. De suppletie-elementen sluiten over het algemeen goed aan bij de habitatvereisten van de doelsoorten, mede doordat voldoende fijnzandig sediment aanwezig is, aangevuld met variatie die ook soorten als de wulp en de scholekster ondersteunt. Gezamenlijk tonen deze inzichten aan dat morfologie, sedimentdynamiek en habitatopbouw in onderlinge samenhang bepalen hoe effectief de Roggenplaat als foerageergebied functioneert. Deze kennis vormt een solide basis voor de verdere reflectie op de randvoorwaarden en ontwerpprincipes die nodig zijn om de effectiviteit van de suppleties voor natuur te borgen.

4.3.4 Reflectie op randvoorwaarden en ontwerpprincipes vanuit perspectief van vogels

In deze paragraaf worden de geleerde lessen vanuit vogelperspectief opgesomd, met specifieke aandacht voor de implicaties die de nieuwe inzichten hebben voor de gehanteerde randvoorwaarden en ontwerpprincipes. In de Voorstudie naar de suppletie in het Middengebied van de Oosterschelde (De Vet et al., 2023) is al gereflecteerd op de uitgangspunten van het oorspronkelijke ontwerp (Van der Werf et al., 2016b), waarbij de eerste drie jaar monitoring van de Roggenplaat (tot en met T3; 2022) zijn meegenomen. Met de aanvullende analyse tot en met T5 (2024) is nu beter zichtbaar geworden hoe verschillende vogelgroepen hun habitat gebruiken, hoe droogvalduur, substraat en voedselbeschikbaarheid samenhangen, en waar de uitgangspunten vanuit ecologisch oogpunt kunnen worden aangescherpt. Deze inzichten vormen de aanleiding om de randvoorwaarden (Tabel 4-3) en ontwerpprincipes (Tabel 4-4) opnieuw te beoordelen.

Voor de volledigheid zijn in beide tabellen alle oorspronkelijke uitgangspunten (Tabel 4-3) en ontwerpprincipes (Tabel 4-4) opgenomen, waarbij in de linker kolom steeds het uitgangspunt of principe staat zoals eerder geformuleerd. In de rechterkolom is aangegeven of en hoe deze inzichten zijn aangescherpt op basis van de meest recente monitoringsresultaten en de vogelprofielen uit de vorige secties. Wanneer er geen nieuwe bevindingen zijn ten opzichte van De Vet et al. (2023), wordt dit expliciet vermeld met "geen nieuwe inzichten". Waar relevant, zijn daarnaast ook aanvullende lessen uit de kennis- en evaluatiehoofdstukken 2 en 3 opgenomen, zodat de tabellen een integraal beeld geven van de ecologische

en morfologische factoren die voor het functioneren van de suppleties van belang zijn en de lessen die na 5 jaar monitoring getrokken kunnen worden.

Gezamenlijk laten de tabellen zien hoe de ontwerpprincipes in de praktijk hebben uitgewerkt: welke aannames zijn bevestigd, welke bijstelling vragen, en welke ecologische mechanismen in de toekomst meer aandacht verdienen. Zo blijken principes zoals variatie in aanleghoogte en het behoud van fijn sediment direct bij te dragen aan het geschikter maken van het foerageerhabitat, terwijl andere elementen, waaronder ecologische priming en reliëfvorming, nog vooral experimenteel zijn en vervolgonderzoek behoeven. Door deze inzichten naast de kwalitatieve ecologische toetsing uit de vorige sectie te plaatsen, ontstaat een geïntegreerd beeld van de succesfactoren voor natuurgebaseerde suppleties: een beeld waarin morfologische stabiliteit, sedimentdynamiek en functioneel habitatgebruik door vogels gezamenlijk richting geven aan effectief ontwerp. Deze aangescherpte inzichten vormen het vertrekpunt voor hoofdstuk 5, waarin het ecologisch doelbereik van de suppletie-elementen centraal staat en wordt beoordeeld in relatie tot zowel ecologisch functioneren als morfologisch doelbereik.

Tabel 4-3. Reflectie op de randvoorwaarden gesteld in de ontwerpfase van de Roggenplaatsuppletie (Van der Werf et al., 2016b). Deze tabel bouwt voort op Tabel 4.1 uit de Voorstudie (De Vet et al. 2023) en alleen aanvullende inzichten zijn hier gegeven. Voor een nadere beschrijving van de randvoorwaarden wordt verwezen naar paragraaf 2.2.5 in De Vet et al. (2023).

Randvoorwaarden

1: 400 m afstand houden tot mosselpercelen

Reflectie op basis van monitoringsresultaten

Ook de recente morfologische ontwikkelingen geven geen aanwijzingen voor morfologische beïnvloeding van niet-gesuppleerde gebieden met uitzondering van de nabijheid (tot orde 50 m) van de suppletie-elementen (Bijlage B1.7.4). Bovendien wijst ook de risicomonitoring (Wijsman, 2023) niet op schade door de aanleg van de suppletie op de omliggende percelen. Een afstand van 400 m tot de mosselpercelen lijkt dus een afdoende maatregel.

2: 600 m afstand houden tot de centrale Zeehonden rustplaatsen

Geen nieuwe inzichten.

3: Uitsluiten van natuurlijk oesterriffen

Geen nieuwe inzichten.

4: 150 m afstand houden van grote afwateringsgeulen

Ook in de recente metingen zijn geen verandering in ontwikkeling van het Middengeultje waargenomen (Bijlage B1.7.4). Suppleren tot op 150 m van de afwateringsgeulen lijkt dus een afdoende uitgangspunt.

5: Uitsluiten van sterk erosieve plaatranden

De metingen laten zien dat suppletie-elementen 4, 5 en 7, die zich in de nabijheid van de sterkst eroderende gebieden van de Roggenplaat bevinden, het sterkst eroderen (Bijlage B1.6). Dit is mede het gevolg van de sterke golfaanval in deze gebieden (Bijlage B1.7.1). Deze waarnemingen ondersteunen de geschiktheid van deze randvoorwaarde. Indien in toekomstige ontwerpen sterke erosie voorkomen moet worden, kan worden overwogen om grotere gebieden uit te sluiten.

6: Aanlegzones en persafstanden baggerschepen

Dit bleek achteraf geen beperkende factor bij de Roggenplaatsuppletie.

Tabel 4-4. Reflectie op de ontwerpprincipes zoals gebruikt in de ontwerpfase van de Roggenplaatsuppletie (Van der Werf et al., 2016b). Deze tabel bouwt voort op Tabel 4.2 uit de Voorstudie (De Vet et al. 2023) en alleen aanvullende inzichten zijn hier gegeven. Voor een nadere beschrijving van de ontwerpprincipes wordt verwezen naar paragraaf 2.2.6 in De Vet et al. (2023).

Ontwerpprincipes

1: Het grootste gedeelte van de suppletie-elementen op de doelhoogte leggen; geen "Zandmotor"

2: Diversiteit in aanleghoogte van de suppletie-elementen

3: Suppletie-elementen op morfologisch actievverende plaatdelen wat hoger uitvoeren

4: Lange afwateringsweg tussen de suppletie-elementen om sediment vast te houden

5: "Holle" suppleties om het water vast te houden

6: Bodemhelling van orde 1/40-1/70

7: Sedimentsamenstelling suppletie zo veel als mogelijk hetzelfde als op de plaat

Reflectie op basis van monitoringsresultaten

In het ontwerpproces werd ingeschat dat de voedende werking (ofwel de morfologische dynamiek) van de suppletie beperkt is. Daardoor werd een "Zandmotor" concept niet als effectief verondersteld. De metingen onderschrijven dit. De metingen tonen dat een gedeelte van de volumeafname van de suppletie (54.000 m³ in de eerste vijf jaar) de plaat voedde of in de geulen is beland (Bijlage 1.7.2). De plaat is echter zo groot (ruim 14 km²) dat als al dit sediment gelijk over de plaat verdeeld zou zijn, dit gemiddeld minder dan 1 mm/jaar sedimentatie zou betekenen. Alleen in de nabijheid van de suppletie-elementen (tot 50 m) is sedimentatie van suppletiesediment waargenomen (Bijlage 1.6). Aanbrengen van sediment op doelhoogte heeft als effect gehad dat de bodemdieren op die plek afstierven en de vogels met name in de eerste jaren na aanleg minder gebruik maakten van de suppletie-elementen (Bijlage 2.4.1 en 3.3.1). Het verdient aanbevelingen om te onderzoeken of een "Zandmotor" minder schadelijk is voor de aanwezige bodemdieren, alhoewel de morfologische dynamiek van de Roggenplaat, beperkt is (suppletie-elementen migreren tot orde 10 m per jaar).

De gemiddelde gerealiseerde hoogte van de suppletie-elementen was NAP+0,32 m na aanleg (Tabel B1-9). De zuidelijke suppletie-elementen zijn conform het ontwerp hoger (tot een gemiddelde hoogte van NAP+0,44 m voor element 4) aangelegd dan de noordelijke suppletie-elementen (element 1 was met een gemiddelde hoogte van NAP+0,21 m het laagst). Omdat het juist de hoogste suppletie-delen van de zuidelijke suppletie-elementen zijn die het sterkst erodeerden in de eerste jaren (Bijlage 1.6), neemt de diversiteit in hoogteligging naar verloop van tijd enigszins af. Als diversiteit in suppletiehoogte wordt nagestreefd, kan overwogen worden om sterkere variaties in het ontwerp aan te brengen. De foerageertijd in uren van vogels is met name hoger op twee hogere suppletie-elementen, daarnaast is gebleken dat veel soorten langs of dichtbij de waterlijn foerageren. Aanvullend op de focus op de aanleghoogte, is ook de ecologische meerwaarde van de suppletieranden en de hellende delen van de suppletie-elementen van belang voor de foerageerfunctie.

De sterke erosie van de bewust hoger aangelegde zuidelijke suppletie-elementen 4, 5 en 7 (Bijlage 1.6) bevestigt dat het een passende keuze was deze hoger aan te leggen. Deze meer geëxponeerde suppletie-elementen tonen een langzamer herstel wat betreft bodemdieren. Toch worden 2 van de 3 zuidelijke suppletie-elementen veelvuldig gebruikt door vogels, met name vroeg in het getij. Met het oog op het behalen van het morfologische doelbereik (paragraaf 5.1) kan in een toekomstig suppletieontwerp worden overwogen suppletie-elementen in dergelijke eroderende plaatdelen nog hoger aan te leggen of juist niet te suppleren in erosiegevoelige delen.

Aangezien er onvoldoende kennis is over hoe dit precies werkt, kan/moet dit concept verder ontwikkeld worden. Mogelijk draagt dit concept ook bij aan het langer vasthouden van water op de plaat (ten bate van de ecologie). Er is ook onvoldoende kennis over de relatie tussen vochtgehalte en foerageergedrag op de Roggenplaat. Water vasthoudend vermogen speelt mogelijk een rol voor bonte strandlopers en kanoetstrandlopers, gezien zij wanneer zij foerageren op hogere delen vaak in ondiepe plassen gezien worden die op de plaat blijven staan (pers. obs. Deltamilieu Projecten).

Geen nieuwe inzichten wat betreft morfologie. Het vochtgehalte wordt in belangrijke mate bepaald door het type sediment, waarbij fijn/slibrijker sediment meer vocht kan vasthouden. Uit deze studie blijkt een duidelijke relatie tussen mediane korrelgrootte en verspreiding van vogelsoorten, een mogelijk effect van vochtgehalte in het sediment. Dit is echter niet (goed) gemeten in deze studie.

Geen nieuwe inzichten, ook vijf jaar na aanleg zijn de hellingen van de suppletie-randen nog sterk afwijkend (steiler) dan de niet-gesuppleerde delen. Uit de analyses blijkt dat vogelsoorten onderling niet sterk verschillen in gebruik van bodemhelling, maar met name te vinden zijn op de flauwe delen (1/600) terwijl steilere delen (Bijlage 3.3 steiler dan 1/150 m/m) veel minder worden gebruikt.

Uit de metingen blijkt dat het suppletiesediment substantieel grover is dan het sediment dat oorspronkelijk op de Roggenplaat aanwezig was (Bijlage 1.7.3). Wel tonen de noordelijke, beschut gelegen suppletie-elementen enige verfijning, mede door een toename in slibgehalte. Desondanks is vijf jaar na aanleg de sedimentsamenstelling van de suppletie-elementen nog sterk

afwijkend van de niet-gesuppleerde delen. Uit deze studie blijkt tevens dat sediment een belangrijke verklarende factor is in de verspreiding bodemdieren en van vogels. Ook verschilt de voorkeur voor mediane korrelgrootte tussen soorten, alhoewel de meeste vogelsoorten een voorkeur vertonen voor fijn zandig materiaal. Voor ecologische optimalisatie is het dus wenselijk in toekomstige suppletieontwerpen voor zo ver als mogelijk meer te sturen op de sedimentsamenstelling (idealiter gelijkwaardig aan het gebiedseigen sediment).

8: Ecologische priming

Priming op de Roggenplaat, d.m.v. het terugplaatsen van het gebiedseigen sediment, had nog een zeer experimenteel karakter en was slechts naast (i.p.v. op) één van de suppletie-elementen toegepast die bovendien zeer beschut lag. Het is echter van belang om verder te onderzoeken hoe de tijdelijk negatieve gevolgen van het verdwijnen van bodemleven verminderd of voorkomen kan worden. Benthos-etende vogels en specifieke soorten tonen een positieve correlatie met hun prooidieren in deze studie, en de vogels bleven de eerste jaren weg van de suppletie-elementen. De bredere Roggenplaat bleek genoeg draagkracht te hebben om de tijdelijke achteruitgang in foerageerhabitat op de plaats van de suppletie-elementen op te vangen, aangezien het totale aantal vogels niet afnam over de gemeten periode. Voor andere gebieden kan dit negatiever uitvallen. Om versnelling van rekolonisatie van bodemleven te bevorderen is het zinvol dit experiment uit te breiden waarbij idealiter op verschillende suppletie-elementen met verschillende bodemliggingen/diktes kennis wordt opgedaan van de effectiviteit van dit concept. Met name dikkere suppletie-elementen kunnen baat hebben bij priming omdat bodemleven daar langzamer op gang komt.

9: Reliëf binnen de suppletie

Hoewel bodemreliëf door de toename in morfologische diversiteit ecologisch van meerwaarde kan zijn, verdwijnt dit relatief snel na aanleg door natuurlijke uitvlakking van de suppletie-elementen. Uit bodemhellingkaarten (Bijlage 1.6.2) blijkt dat het verdwijnen van het microreliëf op de zuidelijke suppletie-elementen sneller verloopt dan op de noordelijke suppletie-elementen.

5 Reflectie op suppletiedoelstelling inclusief prognose tot 2035

In de ontwerpstudie is het primaire projectdoel van de Roggenplaatsuppletie gespecificeerd als: *“In 2035 is de foerageerfunctie van de Roggenplaat gelijk of vergelijkbaar met de foerageerfunctie van de Roggenplaat in 2010”* (Van der Werf et al., 2016b). Vervolgens is voor de foerageerfunctie in dit projectdoel een nadere uitwerking gegeven (Van der Werf et al., 2016b): *“De foerageerfunctie is gedefinieerd als het aantal vogels dat in potentie gebruik maakt van de Roggenplaat en valt uiteen in drie variabelen: 1) het areaal intergetijdengebied, 2) de foerageertijd, ofwel hoeveel tijd per dag de vogels op het intergetijdengebied kunnen foerageren, en 3) de voedselbeschikbaarheid, ofwel de hoeveelheid en kwaliteit van het voedsel waarop de vogels foerageren.”*

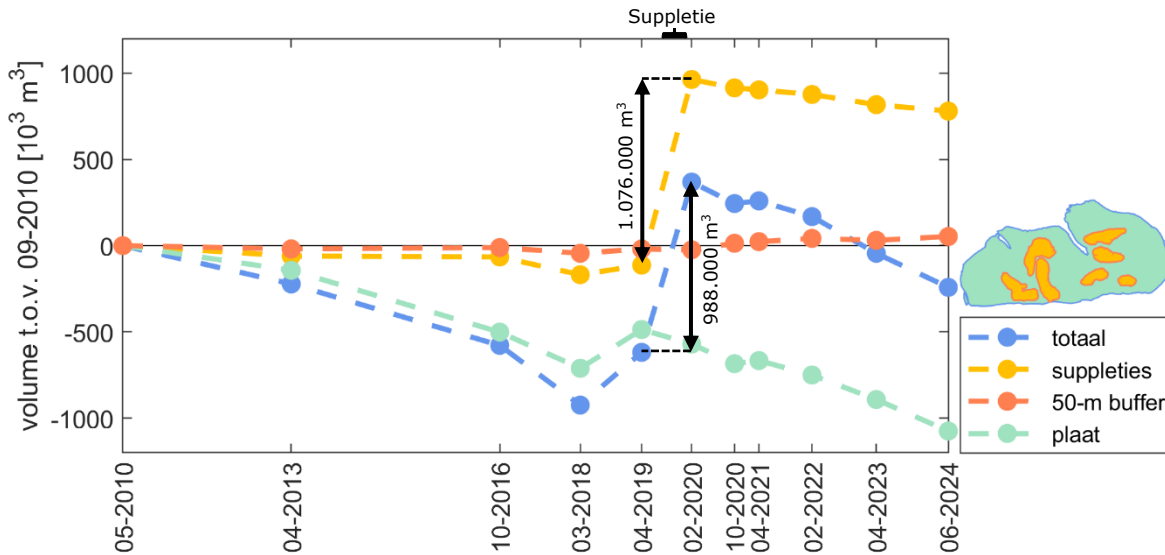
In dit hoofdstuk wordt op basis van de monitoringsresultaten tot dusver (t/m 2024) op dit projectdoel gereflecteerd en wordt voor zo ver als mogelijk een prognose tot 2035 gegeven. Dit aan de hand van de drie variabelen in bovenstaande definitie van de foerageerfunctie. Allereerst wordt in paragraaf 5.1 het morfologisch doelbereik beschouwd als zijnde de ontwikkeling van het areaal intergetijdengebied, met speciale focus op het 50-80% droogvalduurareaal (doelindicator in de ontwerpstudie; Van der Werf et al., 2016b). Voordeel van deze morfologische indicator is dat deze kwantitatief en daarmee objectief te beoordelen is. Vervolgens wordt in paragraaf 5.2 het ecologisch doelbereik beschouwd, met aandacht voor het feitelijke gebruik van de Roggenplaat door vogels en de voedselbeschikbaarheid (kwaliteit van het foerageerhabitat). Tot slot wordt in paragraaf 5.3 een integrale conclusie gegeven over in hoeverre het doelbereik van de suppletie in zicht is.

5.1 Morfologisch doelbereik

In de ecologische doelstelling van de Roggenplaatsuppletie is de morfologie faciliterend, het vormt het gebied dat in potentie door vogels gebruikt kan worden. In paragraaf 5.1.1 wordt de ontwikkeling van de morfologische doelindicator tot dusver beschouwd. De focus ligt hierbij op de ontwikkeling van het areaal intergetijdengebied en specifiek het areaal met een droogvalduur van 50 tot 80%. Vervolgens worden in paragraaf 5.1.2 de mechanismen beschouwd die de lange termijn ontwikkeling van de morfologische doelindicator sturen. Daarna wordt in paragraaf 5.1.3, voor zo ver als mogelijk en conform de ontwerpstudie, beoordeeld of het waarschijnlijk is dat het areaal met een droogvalduur van 50 tot 80% in het doeljaar (2035) tenminste gelijk is aan de grootte van dat areaal in het referentiejaar (2010). Tot slot worden in paragraaf 5.1.4 conclusies gegeven over het morfologische doelbereik, waarbij de onzekerheden in ogenschouw worden genomen.

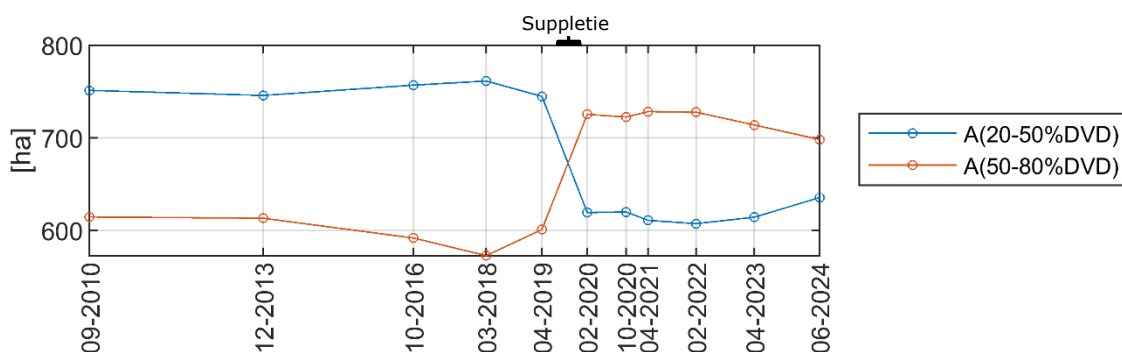
5.1.1 Ontwikkelingen van de morfologische doelindicator tot dusver

Areaalontwikkelingen en daarmee de morfologische doelindicator (het 50-80% droogvalduurareaal) zijn gerelateerd aan volumeveranderingen (erosie/depositie) op de plaat. Vóór suppleren was de Roggenplaat onderhevig aan erosie en daarmee aan een netto volumeverlies van de plaat als geheel (Figuur 5-1), zie ook Bijlage B1.3. Figuur 5-1 toont dat door de suppletie het volume binnen de suppletiecontouren met 1.076.000 m³ is toegenomen (zie ook Bijlage B1.6.1), al valt de volumetoename van de plaat als geheel ten opzichte van 2019 lager uit (988.000 m³) omdat de niet-gesuppleerde delen in de tussentijd zijn blijven eroderen. De suppletie-elementen eroderen sinds de aanleg en ook de erosie van de plaat als geheel zet door. Alleen in de nabijheid (orde 50 m) van de suppletie-elementen neemt het sedimentvolume toe, voornamelijk door depositie van het geërodeerde suppletiesediment (migratie van de suppletie; Bijlage B1.7.2). Sinds 2023 is het totale volume van de Roggenplaat, ondanks de suppletie, kleiner dan het plaatvolume ten tijde van het referentiejaar (2010; Figuur 5-1). Behoud van het plaatvolume was ook niet beoogd met de suppletie; de morfologische doelindicator focust op behoud van het 50-80% droogvalduurareaal van de plaat als geheel.



Figuur 5-1. Volumeontwikkeling ten opzichte van 2010 (het referentiejaar) op basis van de RTK-gecorrigeerde LiDAR data en een suppletie-specifieke correctie binnen de suppletiecontouren (zie Bijlage B1.2.3 voor een toelichting). De volumes zijn bepaald binnen de totale laagwatercontour van 2019 (totaal), binnen de suppletie-elementen (suppleties), binnen de 50-m buffer rondom de suppletie-elementen (50-m buffer) en in de gebieden buiten de 50-m buffer (plaat). De volumetoenames van de plaat als geheel en specifiek de suppletie-contouren door aanleg van de suppletie zijn aangegeven met de pijlen. Dit figuur is tevens in de bijlage opgenomen als Figuur B1-55, maar dan ten opzichte van de laatste meting voor suppleren (2019).

Het 50-80% droogvalduurareaal van de Roggenplaat is met name in de eerste decennia na voltooiing van de Oosterscheldekering achteruit gegaan (Bijlage B1.3). Met de aanleg van de suppletie is dit areaal met 124 ha toegenomen ten opzichte van de laatste meting vóór suppleren (2019), zie Figuur 5-2. Ten opzichte van het referentiejaar (2010) betreft dit een toename van 111 ha. De uitbreiding van het 50-80% droogvalduurareaal is, omdat de suppletie de bodemligging verhoogde, samengegaan met een afname van het lagergelegen 20-50% droogvalduurareaal (Figuur 5-2). Het 50-80% droogvalduurareaal bleef in de eerste jaren na suppleren relatief onveranderd, al neemt deze sinds 2023 weer af ten bate van het 20-50% droogvalduurareaal. Deze niet-monotone ontwikkeling van de droogvalduurklassen na suppleren maakt een extrapolatie van de droogvalduurontwikkeling lastig. Bovendien zijn het niet noodzakelijk de gesuppleerde delen waarvan het 50-80% droogvalduurareaal tot nu toe achteruit is gegaan.



Figuur 5-2. Ontwikkeling areaal van de 20-50% en 50-80% DVD(droogvalduur)klassen op basis van de RTK-gecorrigeerde LiDAR data (zie Bijlage B1.2.3 voor een toelichting) sinds 2010 (referentiejaar). Dit figuur is tevens in de bijlage opgenomen als Figuur B1-33.

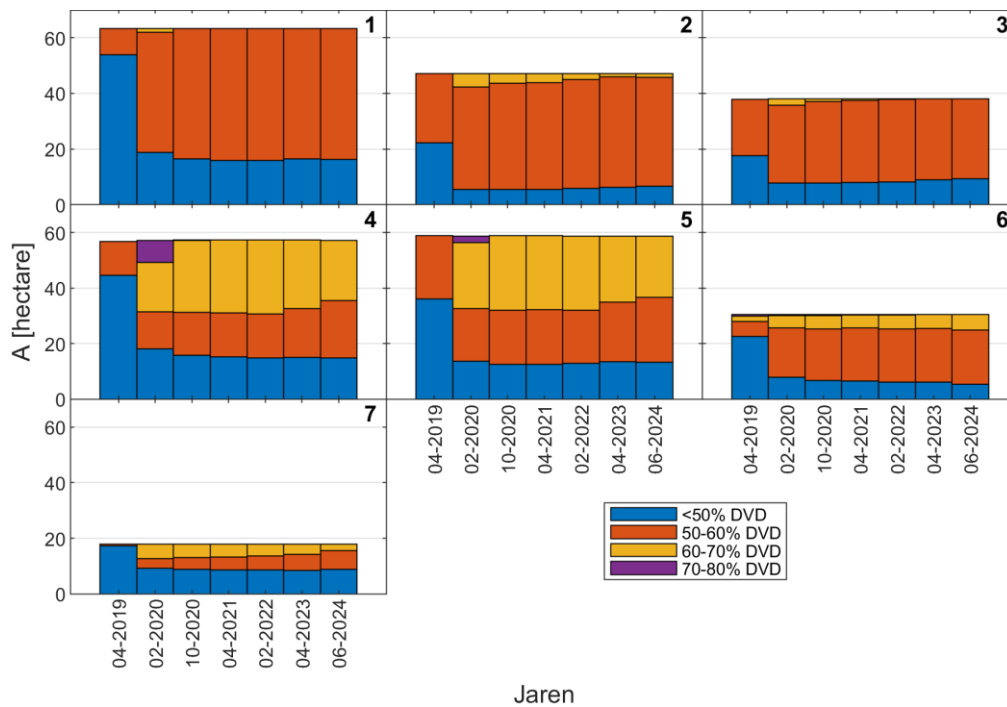
5.1.2 Onderliggende mechanismen die de lange termijn ontwikkeling van de doelindicator sturen

Om nader inzicht te verschaffen in de ontwikkelingen tot aan het doeljaar (2035), worden in deze paragraaf de mechanismen die in het doelbereik een rol spelen separaat beschouwd. Hierin ligt de focus op (1) areaalontwikkeling van de suppletie, (2) areaalontwikkeling van de niet-gesuppleerde delen, (3) zeespiegelstijging en (4) zetting van de suppletie.

(1) Areaalontwikkeling van de suppletie

Hoe de suppletie zich na aanleg ontwikkelt, bepaalt de mate waarin deze blijft bijdragen aan het 50-80% droogvalduurareaal van de plaat. Figuur 5-3 toont de droogvalduurveranderingen van de zeven suppletie-elementen. Zoals Figuur 5-2 ook liet zien, zorgde de aanleg van de suppletie voor een toename van het 50-80% droogvalduurareaal, wat gepaard ging met een afname van het areaal in de lagere droogvalduurklassen (<50%). Hoewel de zuidelijke suppletie-elementen (4, 5 en 7) deels zijn aangelegd met een droogvalduur van 70-80%, was binnen één jaar (eind 2020) de droogvalduur van nagenoeg de volledige suppletie-elementen al minder dan 70% (Figuur 5-3). Omdat alle suppletie-elementen (substantieel) hoger zijn ontworpen dan de 50% droogvalduurhoogte, konden de volumeverliezen van de suppletie-elementen in de eerste jaren substantieel zijn (Figuur 5-1; Bijlage B1.6.2) zonder dat het 50-80% droogvalduurareaal van de plaat afnam (Figuur 5-2). Sterker nog, het 50-80% droogvalduurareaal is op en nabij (binnen 50 m) de suppletie tot dusver (2020-2024) juist met 6 ha toegenomen (alleen suppletie-elementen 2 en 3 ondergingen een netto achteruitgang in deze areaalklasse over deze periode; zie Figuur 5-3). Dit komt door depositie nabij de suppletie (Bijlage B1.7.2) waar de droogvalduur verhoogde. Met name suppletie 7 is opvallend: hoewel deze het sterkst erodeerde (37% volumeverlies tot dusver; Bijlage B1.6.2), is het 50-80% droogvalduurareaal in 2024 voor deze suppletie nog nagenoeg onveranderd (<1ha). De sterke erosie van deze suppletie vertaalde zich in een uitwisseling tussen de 60-70% (afgenomen) en 50-60% (toegenomen) droogvalduurklassen. Dit betekent een afname in droogvalduur en is een voorbode voor dat het 50-80% droogvalduurareaal door doorgaande erosie op den duur wel degelijk zal gaan afnemen.

In welke mate het 50-80% droogvalduurareaal op termijn gaat afnemen, hangt af van of en wanneer de erosiesnelheid van de suppletie-elementen gaat afnemen. Hoewel de erosie van de suppletie-elementen tot dusver relatief groot was (gemiddeld 9 cm over deze periode, ofwel 2 cm/jaar; Tabel B1-9) ten opzichte van de niet-gesuppleerde delen van de plaat (gemiddeld 0,7 cm/jaar; Bijlage B1.7.2), was dit in de ontwerpfase reeds voorzien en zijn met name de erosieve zuidelijke suppletie-elementen relatief hoog ontworpen (71 cm boven de 50% droogvalduurligging van 2013; Van der Werf et al., 2016b). Omdat onduidelijk is of en wanneer de erosiesnelheid van de suppletie gaat afnemen (wat je kan verwachten omdat de mate van verstoring afneemt), valt nog niet precies te voorspellen hoeveel de suppletie in het doeljaar gaat bijdragen aan het 50-80% droogvalduurareaal. Met name de zuidelijke suppletie-elementen en in het bijzonder suppletie 7 (tot dusver 23 cm verlaagd; Tabel B1-9) vergen aandacht bij verdere opvolging.

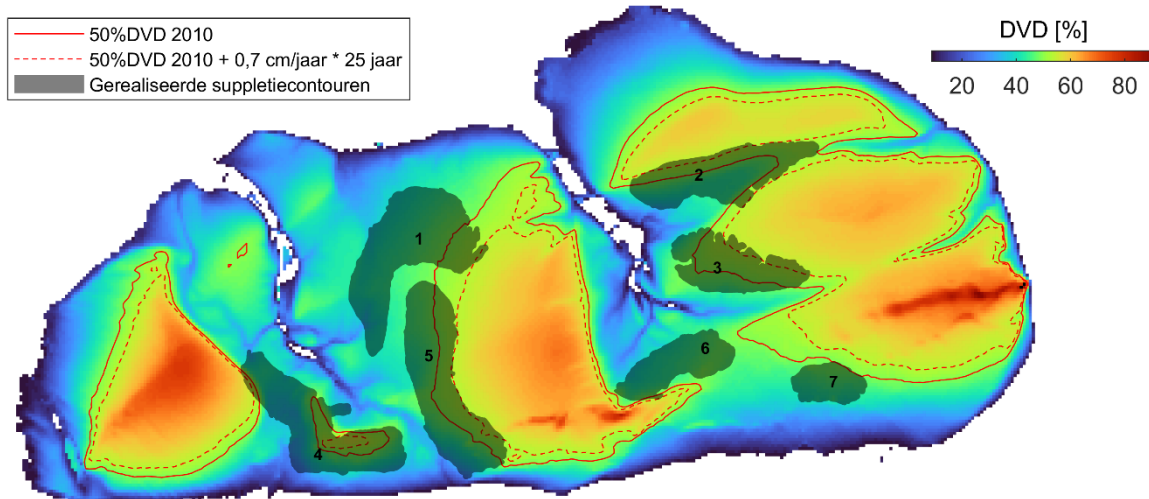


Figuur 5-3. Ontwikkeling van de droogvalduurklassen voor elke deelsuppletie op basis van de RTK-gecorrigeerde LiDAR data (zie Bijlage B1.2.3 voor een toelichting). De arealen zijn berekend voor de oorspronkelijke suppletiecontouren, uitgebreid met een 50 m buffer zodat ook de migratie (sedimentatie in de nabijheid) is meegenomen. De droogvalduurverdeling vóór suppleren is weergegeven met de opname van april 2019.

(2) Areaalontwikkeling van de niet-gesuppleerde delen

De achteruitgang van het plaat-brede 50-80% droogvalduurareaal (Figuur 5-2) is tot dusver volledig het gevolg van erosie van de niet-gesuppleerde delen. Immers, op en nabij de suppletie nam het 50-80% droogvalduurareaal juist toe (Figuur 5-3). In de periode vóór suppleren erodeerde de plaat met ongeveer 0,7 cm/jaar (Bijlage B1.3) en ook in de periode na suppleren zet deze erosietrend door (Bijlage B1.7.2). Met name gebieden die in het referentiejaar (2010) nét boven de 50% droogvalduur lagen maar niet zijn gesuppleerd, zullen met doorgaande erosie bijdragen aan het verlies van het 50-80% droogvalduurareaal. Figuur 5-4 toont deze "kritieke zone", gelegen tussen de 50% droogvalduurcontour van 2010 en de 50% droogvalduurcontour na 0,7 cm/jaar erosie tot aan het doeljaar (2035). De oppervlakte van deze kritieke zone exclusief suppletie, dat met doorgaande erosie verloren dreigt te gaan (gelegen tussen beide contouren maar buiten de suppletiecontouren), betrof vóór aanleg 112 ha (exclusief zeespiegelstijging).

De suppletie moet hiervoor compenseren met de toevoeging van 50-80% droogvalduurareaal in gebieden die in 2010 al een kortere droogvalduur hadden (delen van de suppletie-elementen die in Figuur 5-4 beneden de 50% droogvalduurcontour van 2010 vallen). Bovendien zijn er ook niet-gesuppleerde delen die met autonome ontwikkelingen of door depositie van het geërodeerde suppletiesediment (Bijlage B1.7.2) boven de 50% droogvalduur uitkomen (zie uitbreidingen na 2010 in Figuur 2-1 ter illustratie; o.a. door migratie van delen van de plaat). De ingeschatte achteruitgang van het 50-80% droogvalduurareaal van de niet-gesuppleerde delen is dus slechts een indicatie. Wel verklaren deze ontwikkelingen waarom het 50-80% droogvalduurareaal van de totale plaat achteruit is gegaan (Figuur 5-2) ondanks dat de suppletie tot dusver juist in 50-80% droogvalduurareaal is uitgebreid (Figuur 5-3).

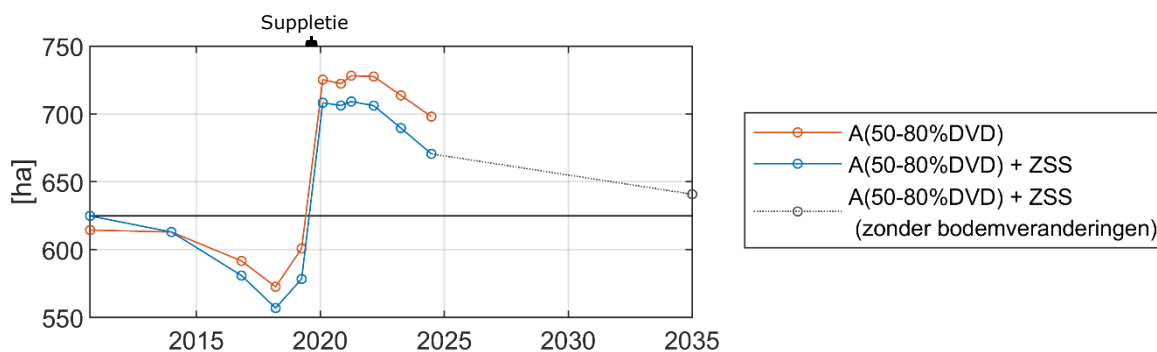


Figuur 5-4. Droogvalduurverdeling van de Roggenplaat in 2010 (referentiejaar) met de contouren van de 50%DVD (droogvalduur) en de 50%DVD na correctie voor 0,7 cm/jaar erosie over 25 jaar (representatief voor het doeljaar 2035). De gerealiseerde suppletiecontouren zijn zwarttransparant weergegeven.

(3) Zeespiegelstijging

Ook zeespiegelstijging resulteert in een achteruitgang van het 50-80% droogvalduurareaal. In deze rapportage is zeespiegelstijging buiten beschouwing gelaten omdat de aandacht primair uitging naar de morfologische veranderingen en de monitoringsperiode beperkt was (5 jaar). Echter, op de langere termijn beïnvloedt zeespiegelstijging de droogvalduurontwikkelingen door verschuiving van de 50% droogvalduurhoogte. Om de implicaties richting het doeljaar in te schatten, is in Figuur 5-5 de ontwikkeling van het 50-80% droogvalduurareaal getoond na een relatieve plaatdaling door zeespiegelstijging. Hierin is ten opzichte van het referentiejaar (2010) gerekend met 2,9 mm/jaar zeespiegelstijging, wat ook voor de komende 15 jaar als representatief wordt geacht (Stolte et al., 2023). Ter informatie, vanwege grotere onzekerheden werd in de ontwerpstudie (Van der Werf et al., 2016b) uitgegaan van een relatief hoge zeespiegelstijgsnelheid (4 mm/jaar).

Figuur 5-5 toont in welke mate het 50-80% droogvalduurareaal lager uitvalt met zeespiegelstijging. In 2024 is dit verschil 27 ha ten opzichte van de situatie zonder zeespiegelstijging. Om de implicaties richting het doeljaar in kaart te brengen, is in Figuur 5-5 de 2024 bodemligging ook voor 2035 aangenomen na 11 jaar aan extra zeespiegelstijging. Dit laat een aanvullend verlies zien van 30 ha (tussen 2024 en 2035) waardoor het verschil ten opzichte van het referentiejaar (2010) nog 16 ha bedraagt. Let wel, morfologische veranderingen zijn niet meegenomen in deze projectie na 2024.



Figuur 5-5. Een herhaling van de ontwikkeling van het 50-80% droogvalduurareaal zoals getoond in Figuur 5-2, maar nu ook na correctie voor 2,9 mm/jaar zeespiegelstijging (Stolte et al., 2023) ten opzichte van 2013 (voor dat jaar zijn de berekende arealen met en zonder zeespiegelstijging gelijk). Voor de projectie naar 2035 (gestippelde grijze lijn) is de bodemligging van juni 2024 genomen (dus zonder bodemveranderingen) na correctie voor de zeespiegelstijging tot 2035. De zwarte horizontale lijn markeert het 50-80% droogvalduurareaal van 2010 (incl. zeespiegelstijging).

(4) Zettingen van de ondergrond van de suppletie

Omdat de suppletie de ondergrond belast, kan deze lokaal zetten (verlaging van de ondergrond). Impliciet maken deze zettingen deel uit van de reeds waargenomen areaalveranderingen (Figuur 5-3). Het kennen van de oorsprong van de hoogteveranderingen kan inzicht bieden in mogelijke toekomstige ontwikkelingen. In Bijlage B1.6.3 is aan de hand van opvolging van 32 zakkbaken de zetting van de ondergrond van de suppletie ingeschat. Vanwege de beperkte kwaliteit van de zakkbaken (zoals bediscussieerd in Bijlage B1.6.3) is het geven van een nauwkeurige inschatting niet mogelijk. Op basis van de huidige metingen kan ook nog niet worden vastgesteld of de zettingen in de loop van de tijd zijn afgenomen. Wel staat vast dat er tussen 2020 en 2024 nog zettingen hebben plaatsgevonden. Voor de mediane/gemiddelde zettingen is een indicatieve inschatting gemaakt van 0,6 cm/jaar, wat neerkomt op een zettingsverlies van ongeveer 12.000 m³/jaar. Dit is een significant (30%) deel van de gemiddelde hoogteafname van de suppletie tot nu toe (9 cm ofwel 2 cm/jaar; *Tabel B1-9*). Verdere opvolging van de zakkbaken is echter nodig om vast te stellen of de zettingen afnemen, wat het doelbereik ten goede zou komen.

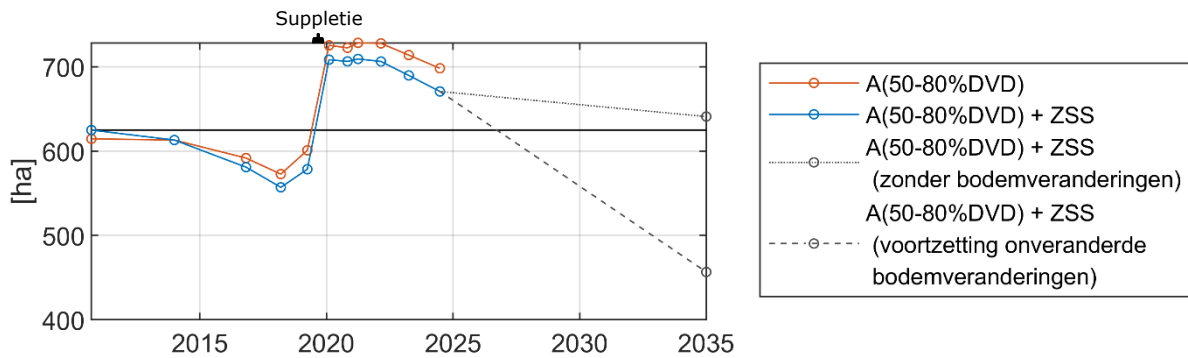
5.1.3 Verkennende extrapolatie droogvalduurontwikkeling

Zoals in paragrafen 5.1.1 en 5.1.2 is benadrukt, kent het extrapoleren van de ontwikkeling in droogvalduur diverse haken en ogen. Bijvoorbeeld, vanwege de niet-geleidelijke areaalontwikkeling: het areaal met een droogvalduur van meer dan 50% op en nabij de suppletie-elementen nam over de eerste jaren toe ondanks de sterke erosie (paragraaf 5.1.1). Daarnaast is het waarschijnlijk dat, maar onzeker wanneer en in welke mate, de erosie van de suppletie-elementen en de zettingen van de ondergrond in de loop van de tijd gaan afnemen (paragraaf 5.1.2). Bovendien is de zeespiegelstijgsnelheid onzeker. Ondanks deze beperkingen is het wenselijk om tot een verkennende extrapolatie van de droogvalduurontwikkeling te komen. Hiertoe is een indicatief scenario beschouwd in de veronderstelling dat de bodemveranderingen tot dusver, dus inclusief de zettingen van de ondergrond, qua verticale trend onveranderd doorzetten.

Om tot deze extrapolatie te komen, is niet direct de droogvalduur uit Figuur 5-5 geëxtrapoleerd, maar zijn de hoogteontwikkelingen in de LiDAR kaarten na suppleren geëxtrapoleerd. Deze methode heeft als voordeel dat hiermee de niet-lineaire doorvertaling van hoogteontwikkelingen naar veranderingen in droogvalduurklassen is ondervangen. Hiertoe is (1) voor elke 2 bij 2 m rastercel op de Roggenplaat de lineaire trend bepaald van alle (RTK-gecorrigeerde) LiDAR metingen na suppleren, (2) is deze lineaire trend voor elke rastercel vermenigvuldigd met de tijd tussen de laatste meting (juni 2024) en het doeljaar (2035) waarna deze bij de laatste bodemligging (juni 2024) is opgeteld, en (3) is de droogvalduur berekend van deze naar 2035 geëxtrapoleerde bodemkaart, zie Figuur 5-6. Bij deze berekening is rekening gehouden met een zeespiegelstijging van 2,9 mm per jaar, conform paragraaf 5.1.2.

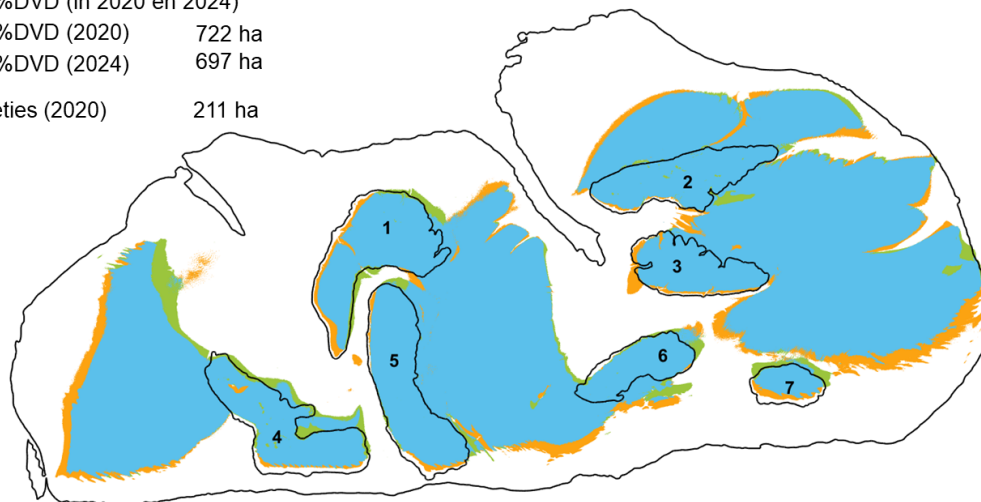
Figuur 5-6 suggereert dat, uitgaande van een voortzetting van de huidige hoogteontwikkelingen per LiDAR rastercel en rekening houdend met zeespiegelstijging, het areaal van de 50-80% droogvalduurklasse in het doeljaar (2035) substantieel lager (168 ha, een verschil van 27%) uitvalt dan in het referentiejaar (2010). Dit terwijl de doelstelling van de suppletie was dat de oppervlakte van deze hoogteklasse in het doeljaar tenminste even groot is als deze in het referentiejaar was.

De verwachting is dat dit een ondergrens geeft van het morfologisch doelbereik. Het lijkt namelijk niet waarschijnlijk dat de huidige erosie en zettingen onveranderd zullen doorzetten (paragraaf 5.1.2). Na sterke erosie van de suppletie-elementen is de belasting van de ondergrond afgenomen waardoor er waarschijnlijk minder zetting zal optreden. Ook nemen zettingen van de ondergrond typisch af na verloop van tijd bij gelijkblijvende belasting. Bovendien gaan de suppletie-elementen door de morfologische veranderingen na verloop van tijd steeds meer op in de vorm van de plaat. Dit kan het versturende effect van de suppletie-elementen op de hydro-morfologie beperken en daarmee de erosiesnelheden verlagen. Verder is in dit 2035-scenario is geen rekening gehouden met de ruimtelijke uitbreiding van de depositiezones na 2024 rond zowel de suppletie-elementen als in de niet-gesuppleerde delen. Hierdoor zal lokaal het 50-80% droogvalduurareaal uitbreiden (zie ter illustratie Figuur 5-7 voor de uitbreiding in de periode 2020-2024) wat het morfologisch doelbereik ten goede komt.



Figuur 5-6. Een herhaling van de ontwikkeling van het 50-80% droogvalduurareaal zoals getoond in Figuur 5-5, maar nu ook met het scenario waarin de bodemveranderingen van 2020-2024 onveranderd doorzetten (niet afnemen) in de periode 2024-2035 (gestreepte grijze lijn). De zwarte horizontale lijn markeert het 50-80% droogvalduurareaal van 2010 (incl. zeespiegelstijging).

- 50-80%DVD (in 2020 én 2024)
- 50-80%DVD (2020) 722 ha
- 50-80%DVD (2024) 697 ha
- ① suppleties (2020) 211 ha



Figuur 5-7. De zones op de Roggenplaat met een droogvalduur van 50-80% (1) in beide jaren (blauw gemarkeerd), (2) alleen in februari 2020 (erosiezones want in 2024 afwezig; oranje gemarkeerd) en (3) alleen in juni 2024 (depositiezones want in 2020 nog afwezig; groen gemarkeerd). De 7 suppletiecontouren zijn weergegeven op basis van de eerste bodemopname na suppleren (februari 2020).

5.1.4 Reflectie morfologisch doelbereik

De achteruitgang van het 50-80% droogvalduurareaal van de Roggenplaat is tot dusver (2024) volledig het gevolg van erosie van de niet-gesuppleerde delen van de plaat en zeespiegelstijging. De suppletie-elementen zijn in deze periode juist in deze areaalklasse uitgebreid. Al zijn er – met de erosie van de suppletie-elementen en zettingen van de ondergrond – wel sterke aanwijzingen dat dit gaat veranderen.

Het verkennende scenario van de droogvalduurontwikkeling op basis van onveranderd doorzettende bodemveranderingen (paragraaf 5.1.3) wekt de suggestie dat het areaal met een droogvalduur van 50-80% in het doeljaar (2035) lager uitvalt dan in het referentiejaar (2010), ondanks dat de zeespiegelstijgsnelheid kleiner is (2,9 mm/jaar) dan werd aangenomen in het ontwerp (4 mm/jaar). Dit zou betekenen dat er niet wordt voldaan aan deze morfologische doelindicator uit de ontwerpfase (Van der Werf et al., 2016b). Alvorens nuances worden gegeven bij de waarschijnlijkheid van deze uitkomst, is het belangrijk om te benadrukken dat het niet voldoen aan deze morfologische doelindicator niet direct betekent dat de ecologische doelstelling niet wordt bereikt. Bijvoorbeeld, delen van de plaat die net beneden het 50% droogvalduurcriterium vallen, dragen niet bij aan deze morfologische doelindicator maar dragen wel bij aan het foerageerhabitat en daarmee het ecologisch doelbereik. Bovendien draagt geërodeerd suppletiesediment bij aan het behoud van de lagere delen van de plaat. Het ecologisch doelbereik wordt beschouwd in paragraaf 5.2.

Desondanks is het, ook ten bate van de verdere ontwikkeling van het morfologische ontwerp- en evaluatieraamwerk van suppleties, relevant om de juiste nuances te plaatsen bij dit verkennende scenario van de droogvalduurontwikkeling en om te begrijpen waarom in het referentiejaar mogelijk niet wordt voldaan aan de morfologische doelindicator:

- Het verkennende scenario geeft waarschijnlijk een ondergrens voor het morfologische doelbereik omdat het onwaarschijnlijk is dat de erosie en zettingen van de ondergrond onveranderd doorzetten met het lager worden (eroderen) van de suppletie-elementen (paragraaf 5.1.2). De ontwikkelingen in de eerste vijf jaar na suppleren (deze rapportage) geven nog geen inzicht in wanneer en in welke mate deze veranderingen gaan optreden. Daarnaast is in dit scenario geen rekening gehouden met het ruimtelijke uitbreiden van depositiezones en daarmee het 50-80% droogvalduurareaal.
- Met name de zuidelijke suppletie-elementen eroderen relatief snel en zettingen dragen tot dusver substantieel bij aan de volumeafnamen (30% van de totale volumeafname). In het ontwerp (Van der Werf et al., 2016b) is al rekening gehouden met dat de suppletie sterker erodeert dan het midden van de Roggenplaat (5 mm/jaar). Hiertoe zijn met name de geëxponeerde, zuidelijke suppletie-elementen 4, 5 en 7 hoger aangelegd (tot 51 cm) dan alleen voor autonome erosie en zeespiegelstijging noodzakelijk zou zijn (NAP+0,16 m; Van der Werf et al., 2016b). Echter, hierbij is geen rekening gehouden met dat er binnen vijf jaar al meer dan een halve meter verlaging zou optreden op bepaalde delen van de suppletie (Bijlage B1.6) en dat zettingen substantieel zouden aanhouden. Bovendien kon in de ontwerpfase nog niet worden ingeschat wat de verstoring van de hydro-morfologie door de suppletie zou betekenen voor de erosiesnelheden van de suppletie. Een preciezere inschatting van het morfologisch doelbereik vergt een betere voorspelbaarheid van erosie en zettingen van suppletie-elementen en de verspreiding van het gesuppleerde sediment.
- In het suppletieontwerp is uitgegaan van een suppletievolume van 1,3 miljoen m³ (Van der Werf et al., 2016b). Het werkelijke suppletievolume is lager, Boskalis schatte deze na voltooiing van de suppletie in op 1,13 miljoen m³ (Wallis et al., 2021b) en uit de LiDAR metingen van april 2019 en februari 2020 volgt een suppletievolume van 1,08 miljoen m³ (Bijlage B1.6.1). Dit lagere suppletievolume beperkt het morfologisch doelbereik.
- Na suppleren bestaat het 50-80% droogvalduurareaal van de Roggenplaat nog grotendeels (73%) uit niet-gesuppleerde delen (Figuur 5-7). Deze gebieden zijn dus van wezenlijk belang voor de morfologische doelindicator. In het ontwerp is uitgegaan van een uniforme autonome plaatdaling van 5 mm/jaar door erosie (Van der Werf et al., 2016b). Ondanks dat werd verondersteld dat dit aan de hoge kant zou zijn, valt dit tot dusver uit op 7 mm/jaar (Bijlage B1.7.2). Mogelijk hebben de uitzonderlijke stormen van 2020 en 2022 hier een rol in gespeeld (Bijlage B1.4). Bovendien daalt de plaat in werkelijkheid niet uniform. Om tot preciezere inschattingen van het morfologische doelbereik te komen, is het wenselijk om droogvalduurprojecties van niet-gesuppleerde delen, voor zo ver als mogelijk, te verbeteren.

Samenvattend is het mogelijk dat in 2035 niet wordt voldaan aan de morfologische doelindicator, maar dat betekent nog niet dat de ecologische doelstelling (zie volgende paragraaf) niet wordt bereikt. Behoud van het 50-80% droogvalduurareaal is namelijk indicatief voor behoud van de foerageerfunctie (gebruikt als indicator in de ontwerpfase; Van der Werf et al., 2016b), maar ook bij een andere droogvalduurverdeling kan de foerageerfunctie mogelijk behouden blijven (zie aanbeveling in paragraaf 6.3). Op basis van deze bevindingen is er daarom nog geen directe aanleiding voor een beheermaatregel. Wel is het belangrijk om de morfologische ontwikkelingen van de Roggenplaat, inclusief de niet-gesuppleerde delen, te blijven monitoren en opvolgen. Bijvoorbeeld om vast te stellen of en wanneer de morfologische veranderingen van de suppletie-elementen afnemen en wat daarvan de implicaties zijn voor het doelbereik. Een dergelijke voortgezette opvolging kan ook bijdragen aan het aanscherpen van het morfologische ontwerp- en evaluatieraamwerk van suppleties.

5.2 Ecologisch doelbereik

De ecologische doelstelling van de Roggenplaat-suppletie is gericht op het behoud van geschikt foerageerhabitat en de bijbehorende voedselvoorraad op het niveau van 2010. In deze paragraaf wordt beoordeeld in hoeverre aan de randvoorwaarden voldaan wordt om dit doel te kunnen bereiken. De nadruk

ligt op de ontwikkeling van de voedselbeschikbaarheid voor vogels (bodemdieren) en het gebruik van de plaat door foeragerende benthos-etende vogels, in relatie tot de morfologische veranderingen zoals beschreven in paragraaf 5.1.

5.2.1 Relatie tussen morfologie en ecologisch potentieel

De morfologische ontwikkelingen op de Roggenplaat zijn bepalend voor het areaal dat gedurende het getij beschikbaar is als foerageergebied. De aanleg van de suppletie-elementen leidde aanvankelijk tot een duidelijke uitbreiding van het oppervlak met een droogvalduur van 50–80%, het traject dat overeenkomt met het optimale foerageervenster van een aantal steltlopersoorten (hfst.4). Daarmee werd de fysische basis voor ecologisch herstel versterkt. In de jaren na aanleg trad erosie op, met name in de niet-gesuppleerde en zuidelijke delen van de plaat. Hierdoor is het areaal met optimale droogvalduur sinds 2023 weer enigszins afgenomen. Deze ontwikkeling heeft directe consequenties voor de ruimtelijke verdeling van voedsel voor vogels, aangezien de morfologische stabiliteit en korrelgrootteverdeling bepalend zijn voor de vestiging van bodemdieren en daardoor in potentie de kwaliteit als foerageerhabitat. Toch werd er geen duidelijk effect op de vogelaantallen waargenomen, wat suggereert dat er voldoende draagkracht was om deze tijdelijke achteruitgang in foerageerhabitat op te vangen.

5.2.2 Ontwikkeling van bodemdieren

De aanleg van de suppletie-elementen leidde aanvankelijk tot een sterke afname van de dichtheid, biomassa en soortenrijkdom van bodemdieren. De verstoring van het sediment en het ontbreken van een stabiel substraat bleef herkolonisatie in de eerste jaren na aanleg beperkt. Het herstel volgde een gefaseerd patroon en verschilde duidelijk per suppletie-element.

Bij de substantieel minder erosieve suppletie-elementen 1-3 en 6 herstelden de dichtheid en samenstelling binnen twee à drie jaren tot niveaus vergelijkbaar met de omliggende plaat. Bij suppletie-elementen 4, 5 en 7 bleef het herstel achter; vooral op de meest erosieve suppletie-elementen (4 en 7) wordt de fauna nog steeds gedomineerd door wormensoorten, terwijl schelpdieren slechts in beperkte mate voorkomen. Deze verschillen benadrukken dat het ecologisch herstel sterk samenhangt met de lokale morfologische stabiliteit, de mate van golfblootstelling en de sedimenteigenschappen. Suppletie-elementen met geringe erosie en een fijnere korrelgrootte laten de meest gunstige ontwikkeling van de bodemdiergemeenschappen zien.

Op de meeste suppletie-elementen is de biomassa in 2024 inmiddels vergelijkbaar met die van referentiegebieden elders op de Roggenplaat, wat aangeeft dat de voedselvoorraad niet langer beperkend is voor foeragerende vogels. Bovendien is de totale hoeveelheid beschikbaar voedsel op de plaat toegenomen: door de herinrichting is circa 211 hectare eerder ongeschikte, voedselarme bodem weer functioneel foerageergebied geworden. In combinatie met een toename van de droogvalduur met circa 50–80% betekent dit dat de ecologische draagkracht voor vogels als geheel niet alleen is hersteld, maar zelfs is verbeterd.

5.2.3 Gebruik door foeragerende vogels

De aanleg van de suppletie-elementen had geen aantoonbaar effect op de totale vogelstand van de Roggenplaat, maar wel op de ruimtelijke verdeling van de vogels als ook op specifieke doelsoorten. In de eerste jaren na aanleg werden de gesuppleerde delen minder gebruikt als foerageergebied, vermoedelijk door beperkte voedselbeschikbaarheid en verandering in sedimentstructuur, maar dit werd opgevangen door de niet-gesuppleerde delen op de Roggenplaat. Een uitzondering hierop zijn de kanoet, bontbekplevier en bergeend, welke juist in het laatste jaar van de monitoring (2024/2025) minder zijn waargenomen op de Roggenplaat, terwijl er geen verschil was tussen de jaren voor en direct na aanleg van de suppletie-elementen.

Vanaf 2022 is geleidelijke toename zichtbaar in het gebruik van de suppletie-elementen door de meeste vogelsoorten die aanvankelijk achterbleven. De meeste suppletie-elementen worden inmiddels weer regelmatig benut, zij het vaak op een ander moment in het getij dan voorheen. De doelsoorten bonte strandloper, scholekster, rosse grutto, wulp en zilverplevier zijn opnieuw op de suppletie-elementen

waargenomen. Tussen soorten blijven echter duidelijke verschillen bestaan. Uitzondering hierop zijn de kanoet en de rosse grutto. Deze zijn in mindere mate teruggekeerd op suppletie-elementen. Dit komt waarschijnlijk door hun voorkeur aan fijner sediment of lagergelegen delen van de plaat, terwijl de bonte strandloper juist frequent op de suppletie-elementen foerageert.

Opvallend is dat herstel van het vogelgebruik niet overal direct samenvalt met de ontwikkeling van de bodemdiergemeenschappen. Op sommige erosieve suppletie-elementen, zoals element 4, sluit het foerageergedrag van vogels goed aan bij de toegenomen droogvalduur, ondanks een relatief beperkte bodemdierbiomassa. Dit suggereert dat vogels de hoeveelheid beschikbaar voedsel niet goed kunnen inschatten. Wanneer delen van de plaat droogvallen beginnen ze daarom vaak direct met foerageren, waarschijnlijk uit verwachting er voldoende bodemdieren aan te treffen. Daardoor kan foerageergedrag soms goed aansluiten bij een toegenomen droogvalduur, ook op suppletie-elementen waar de gemeten bodemdierbiomassa relatief laag blijft.

5.2.4 Samenvatting ecologisch doelbereik en doorzicht naar 2035

Vijf jaar na aanleg kan worden geconcludeerd dat het ecologisch herstel op de Roggenplaat grote lijnen is geslaagd. Op de meeste suppletie-elementen zijn zowel bodemdiergemeenschappen als foeragerende vogels teruggekeerd. Herstel van de bodemdierengemeenschap blijft achter op de zuidelijke, sterk erosieve delen, waar de morfologische instabiliteit het herstel van bodemdieren beperkt. De combinatie van morfologische ontwikkeling, voedselbeschikbaarheid en vogelgebruik wijst erop dat het ecologisch doelbereik, behoud van de foerageerfunctie op het niveau van 2010, in de vijf jaar na aanleg van de suppletie grotendeels is gerealiseerd. Wel is de ruimtelijke verdeling van de foerageerhabitat veranderd, en neemt de kans toe dat verdere erosie in niet-gesuppleerde delen de ecologische functie op langere termijn zal beïnvloeden.

Verwachting richting 2035

Voor de periode tot 2035 wordt verwacht dat de ontwikkeling van het ecologisch doelbereik sterk zal afhangen van de snelheid van morfologische ontwikkeling, d.w.z. afname van de bodemhoogte als gevolg van erosie, en de ontwikkeling van de sedimenteigenschappen op de plaat. Indien de huidige erosiesnelheden aanhouden, wat de verwachting is, zal het areaal met een droogvalduur van 50–80% geleidelijk afnemen. Daarmee neemt ook de potentieel beschikbare tijd voor foerageren voor steltlopers weer langzaam af. Tegelijkertijd kan lokale herverdeling van sediment door erosie en depositie leiden tot het ontstaan van nieuwe, kleinschalige foerageerzones, met een dynamischer ecologisch functioneel systeem als gevolg. Het voortbestaan van de ecologische functie hangt daarnaast af van de stabiliteit van de bodemdiergemeenschappen. Een verdere toename van korrelgrofheid of blootstelling aan golven kan leiden tot een verschuiving naar bodemdiersoorten die beter bestand zijn tegen dynamische omstandigheden (zoals borstelwormen), maar minder voedselwaarde hebben voor schelpdieretende vogels zoals de scholekster. In dat scenario zou de kwaliteit van het foerageerhabitat afnemen, ook bij gelijkblijvend areaal.

Omgekeerd geldt dat bij beperkte erosie en behoud van een fijnkorrelig sediment, de huidige samenstelling en biomassa van bodemdieren naar verwachting stabiel blijven of zelfs verder toenemen. Onder dergelijke omstandigheden kan het ecologisch doelbereik ook in 2035 behouden blijven, zelfs als het totale oppervlak iets afneemt. De aanleg van de suppletie-elementen heeft immers laten zien dat een tijdelijke verstoring van een deel van de plaat de vogelstand niet structureel heeft aangetast. Dit wijst erop dat er in het systeem een zekere buffer aanwezig is: een beperkte afname van oppervlakte of verandering in ruimtelijke verdeling hoeft het doelbereik niet direct in gevaar te brengen, zolang de morfologische omstandigheden en voedselbeschikbaarheid op de resterende delen gunstig blijven.

Een belangrijk aandachtspunt is hoe de ruimtelijke relatie tussen stabiele en dynamische zones zich ontwikkelt. Voor veel wadvogels is een vloeïend, flauw talud belangrijk, omdat zij dan tijdens het terugtrekken van het water eenvoudig met de waterlijn kunnen meelopen en zo hun effectieve foerageertijd maximaliseren. Wanneer erosie vooral optreedt in de overgangsgebieden tussen suppletie-elementen en de natuurlijke plaat, kunnen daar steilere, minder geleidelijke randen ontstaan. Hierdoor raakt de foerageerhabitat meer versnipperd en moeten vogels vaker onderdelen van de plaat verplaatsen om voldoende foerageertijd te vinden. Dit vermindert de functionele connectiviteit van de foerageerhabitat: ook al is het totale oppervlak aan droogvallende gebieden voldoende, de praktische benutbaarheid kan voor

sommige soorten afnemen. Hoe deze overgangen zich richting 2035 ontwikkelen, is nog onzeker, maar juist die ruimtelijke samenhang bepaalt in belangrijke mate hoe efficiënt vogels hun voedselbronnen kunnen benutten.

Samenvattend is het ecologisch doelbereik momenteel grotendeels gehaald, en de ontwikkelingen bieden geen aanwijzingen dat dit richting 2035 snel zal verslechteren. Zowel bodemdieren als foeragerende vogels hebben de afgelopen jaren een sterke aanpassingscapaciteit laten zien: bodemdiërgemeenschappen herstelden binnen enkele jaren en vogels benutten de plaat opnieuw, ook wanneer de ruimtelijke omstandigheden veranderden.

Of het doelbereik in 2035 volledig behouden blijft, hangt vooral af van de mate van erosie en de ontwikkeling van korrelgrootte en substraatstabiliteit. Zolang de morfologische afname beperkt blijft en de variatie in droogvalduur en fijn sediment behouden blijft, zijn de vooruitzichten positief. Alleen bij versnelde erosie of verdere verarming van het sediment ontstaat het risico op een geleidelijke afname van ecologische waarde, maar gezien de veerkracht van zowel bodemdieren als vogels is een groot verlies van functie niet te verwachten.

6 Conclusies, kennisleemtes en aanbevelingen

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies samengevat over de morfologische en ecologische ontwikkeling van de Roggenplaat en de suppletie-elementen gedurende de eerste vijf jaar na aanleg. Daarnaast wordt de betekenis van deze ontwikkelingen voor de foerageerhabitat van benthos-etende vogeldoelsoorten besproken, met een doorkijk naar 2035.

De volgende projectdoelstellingen (van der Werf et al. 2016) staan hierin centraal:

- Behoud van de huidige foerageerfunctie van het Roggenplaat/Neeltje Jans-complex voor de komende 25 jaar (doelstelling 1).
- Ontwikkelen van kennis voor flexibel, klimaatbestendig en kosteneffectief kustmanagement (doelstelling 3).

Paragraaf 6.2.1 geeft de belangrijkste conclusies over de ontwikkelingen in morfologie, bodemleven en het voorkomen van vogels over de eerste vijf jaar na aanleg (2020-2024). Paragraaf 6.2.2 beschouwt welke verwachtingen deze waarnemingen geven voor het behoud van de foerageerfunctie tot aan het doeljaar 2035. In paragraaf 6.2.3 wordt de bijdrage van dit monitoringsproject aan kennisontwikkeling besproken. Het hoofdstuk sluit af met de resterende kennisleemtes en aanbevelingen.

6.2 Conclusies

6.2.1 Hoofdconclusies over vijf jaar eco-morfologische ontwikkeling (2020-2024)

De suppletie van 1,1 miljoen m³ heeft het voor vogels waardevolle 50–80% droogvalduurareaal met 21% uitgebreid, terwijl de erosietrend van de plaat nauwelijks is beïnvloed.

In de jaren na aanleg eroderen de suppletie-elementen, maar de globale erosietrend op de Roggenplaat (gemiddeld ongeveer 0,7 cm/jaar) is niet significant veranderd. Met het eroderen van de Roggenplaat neemt de droogvalduur van de plaat af, al is het 50-80% droogvalduurareaal van de plaat tot dusver nog ruim meer dan vóór suppleren. De achteruitgang in het 50-80% droogvalduurareaal is tot dusver volledig het gevolg van erosie van de niet-gesuppleerde delen omdat de suppletie in de eerste vijf jaar (tijdelijk) in deze voor vogels waardevolle droogvalduurklasse is uitgebreid.

De Roggenplaat heeft haar ecologische draagkracht behouden doordat grote delen van de plaat onaangetast zijn gelaten en de noodzakelijke ingrepen zijn uitgevoerd via meerdere natuurlijke, met de dynamiek meebewegende, zandsuppleties.

De ontwikkeling na de suppletie laat zien dat het ontwerp van de ingreep goed heeft aangesloten om de draagkracht van het intergetijdensysteem als foerageergebied te behouden. Door bewust zones ongemoeid te laten, kon de vogelgemeenschap zich aanpassen en bleven de totale vogelaantallen gelijk: vogels benutten de plaat tijdelijk anders, maar keren geleidelijk terug naarmate sediment en bodemleven zich herstelden. Ook de aanwezigheid van oesterriffen en zeehonden bleef stabiel, wat erop wijst dat de belangrijkste ecologische functies van de Roggenplaat behouden zijn gebleven.

Tabel 6-1. Overzicht van morfologische en ecologische ontwikkeling van de suppletie-elementen ten opzichte van de omliggende plaat, vijf jaar na aanleg. Morfologie: kolommen A en B tonen per suppletie-element respectievelijk de morfologische stabiliteit en verandering in de aangebrachte sedimentsamenstelling. Bodemdieren (benthos): kolommen C en D geven respectievelijk de biomassa en soortensamenstelling weer. Vogels: kolommen E en F geven per suppletie-element aan of de vogel doelsoorten opnieuw zijn waargenomen of stabiel zijn gebleven in respectievelijk foerageertijd in uren of aantallen per hectare. Kolom G toont de doelsoorten die niet of niet volledig zijn teruggekeerd. Dit betreft soorten die één jaar of meer significant afnamen in 2023–2024 t.o.v. 2017–2019. De vogelsoorten: BS = bonte strandloper, Ka = kanoet, Sch = scholekster, RS = rosse grutto, Wu = wulp, ZP = zilverplevier, Tu = tureluur.

Suppletie	A: Morfologische stabiliteit (+/- = relatief weinig/veel erosie)	B: Sedimentsamenstelling (+/- = enigszins/geen toename slibgehalte)	C: Bodemdieren biomassa (+ = hoge biomassa)	D: Bodemdieren samenstelling (+ = vergelijkbaar met referentie)	E: Vogel-aantallen (foerageer-druk)	F: Herstelde/stabiele vogels doelsoort	G: Niet volledig herstelde/stabiele vogels doelsoort
1	+	+	+	+	-	BS, Ka, Sch, RS, Wu, ZP, Tu	
2	+	+	+	+	-	BS, Sch, Wu, ZP, Tu	Ka, RS
3	+	+	+	-	+	BS, Sch, Wu, ZP	Ka, RS, Tu
4	-	-	-	-	+	BS, Sch, RS, Wu, ZP, Tu	Ka
5	-	-	+	+	+	BS, Ka, Sch, RS, Wu, ZP, Tu	
6	+	+	+	+	+	BS, Sch, Wu, Tu	Ka, RS, ZP
7	-	-	-	-	+/-	BS, Sch, Wu, Tu	Ka, RS, ZP

Het ecologisch herstel van de suppletie-elementen is binnen vijf jaar na aanleg grotendeels bereikt.

Op de suppletie-elementen zijn bodemdiergemeenschappen en foeragerende vogels teruggekeerd en veel suppletie-elementen functioneren weer als volwaardig foerageergebied. Hoewel herstel van bodemdiergemeenschappen op de zuidelijke, sterk erosieve delen achterblijft, komt dit niet overal duidelijk tot uiting in het gebruik door vogels: het huidige foerageergedrag sluit grotendeels (bijv. suppletie-elementen 4, Tabel 6-1) aan bij wat verwacht mag worden op basis van de gewijzigde droogvalduur. De suppletie-elementen dragen dus binnen vijf jaar na aanleg substantieel bij aan de foerageerfunctie van de plaat als geheel.

Suppletie-elementen die meer aan golfwerking zijn blootgesteld eroderen sneller, terwijl beschut gelegen suppletie-elementen stabiel blijven, wat resulteert in variaties in hoogteligging en sedimentsamenstelling.

De morfologische ontwikkelingen van de suppletie-elementen laten een noord-zuid-contrast zien (samengevat in Tabel 6-1, kolom A). Suppletie-elementen 4, 5 en 7, die aan relatief veel golfaanval zijn blootgesteld door de zuidelijke ligging en relatief hoog zijn aangelegd, erodeerden sterker (gemiddeld 11-23 cm erosie per element over 5 jaar) dan de meer beschut gelegen noordelijke suppletie-elementen (tot dusver gemiddeld 0-7 cm erosie per element; inclusief suppletie 6, gelegen achter een schelpenrug). Vooral de hoogste delen van de suppletie-elementen zijn in hoogte afgenomen, waardoor binnen één jaar de droogvalduur voor vrijwel de gehele suppletie onder de 70% kwam te liggen. Van de totale volumeafname binnen de suppletiecontouren is ongeveer 42% in de directe omgeving (tot 50 m; met name met de dominante windrichting mee, dat wil zeggen naar het noordoosten) van de suppletie terecht gekomen. Verder is ingeschat dat ongeveer 28% van deze volumeafname het gevolg is van zettingen van de ondergrond. De resterende 30% volumeafname is sediment dat naar elders op de plaat of de geulen is getransporteerd. De suppletie-elementen zijn met relatief zandig sediment uitgevoerd (mediane korrelgrootte van 250-350 µm, nagenoeg geen slib aanwezig direct na aanleg). De beschut gelegen suppletie-elementen (1, 2, 3 en 6) verfijnen enigszins door de invang van slib. Op de zuidelijke suppletie-

elementen bleef een aanhoudende verfijning uit (samengevat in Tabel 6-1, kolom B), waarschijnlijk door de sterke erosie en blootstelling aan golven op deze suppletie-elementen.

Het herstel van bodemdiergemeenschappen verloopt sneller op stabielere, beschut gelegen suppletie-elementen met fijner sediment.

Om de gevoeligheid van bodemdieren voor hydrodynamische omstandigheden goed te duiden houden we rekening met de blootstelling van de suppletie-elementen aan de golfwerking: Suppletie-elementen 1-3 (noordelijk gelegen) en 6 (gelegen achter een schelpenrug) zijn substantieel minder erosief dan suppletie-elementen 4, 5 en 7 (zuidelijk gelegen; voor suppletie 5 is met name het zuidelijke deel erosief). Als gevolg van de aanleg van de suppletie-elementen was de dichtheid, biomassa en soortenrijkdom van bodemdieren op de suppletie-elementen aanvankelijk laag. De bodemdiergemeenschappen herstelden zich geleidelijk aan op de suppletie-elementen, maar de snelheid van het herstel verschilde per suppletie-element (samengevat in Tabel 6-1, kolommen C en D). Bij de substantieel minder erosieve suppletie-elementen 1-3 en 6 herstelden de dichtheid en samenstelling van bodemdieren zich binnen twee à drie jaren tot niveaus vergelijkbaar met het omliggende referentiegebied met gelijke droogvalduur. Bij suppletie-elementen 4, 5 en 7 bleef het herstel beperkt; vooral bij de meest erosieve suppletie-elementen 4 en 7. Bij deze suppletie-elementen wordt de fauna nog steeds gedomineerd door wormensoorten en komen schelpdieren in beperkte mate voor. Deze resultaten wijzen erop dat het herstel van bodemdiergemeenschappen sterk samenhangt met de lokale bodemdynamiek en de mate van blootstelling aan golven. Suppletie-elementen met geringe erosie en een fijnere sedimentsamenstelling blijken gunstiger voor ecologisch herstel.

Vogels zijn enkele jaren na aanleg deels teruggekeerd op de suppletie-elementen, met een gewijzigde ruimtelijke verdeling.

De aanleg van de suppletie-elementen had geen aantoonbaar effect op de totale vogelstand van de Roggenplaat, maar wel op de ruimtelijke verdeling van de vogels. De eerste jaren na aanleg werden de suppletie-elementen, zoals verwacht, minder gebruikt voor foerageren; daarna nam de foerageertijd per hectare geleidelijk toe op alle suppletie-elementen. In recente jaren worden de meeste suppletie-elementen weer regelmatig benut, maar op een eerder moment in het getij door de langere droogvalduur. Wel blijven sommige suppletie-elementen nog achter in foerageertijd in uren (zie Tabel 6-1; suppletie 1 en 2). De meeste doelsoorten (bonte strandloper, scholekster, rosse grutto, wulp en zilverplevier) zijn opnieuw in dezelfde aantallen als voorheen waargenomen op de suppletie-elementen. Verschillen tussen soorten blijven echter bestaan. Sommige soorten zoals kanoet en rosse grutto (die ook de voorkeur geven aan fijner sediment of lagergelegen delen van de plaat) maken minder gebruik van de gesuppleerde gebieden, terwijl de bonte strandloper juist veelvuldig op de suppletie-elementen foerageert.

6.2.2 Betekenis van de waargenomen ontwikkelingen voor de ontwikkeling van het foerageerhabitat tot aan het doeljaar 2035

De zandsuppletie heeft de beschikbaarheid van geschikt foerageerhabitat tot dusver (vijf jaar na aanleg) vergroot, maar het moet nog blijken of de ontwerpdoelstelling voor 2035 wordt bereikt.

De zandsuppletie heeft het voor vogels waardevolle foerageerareaal (droogvalduur 50–80%) tot 2024 met 124 ha (21%) vergroot. Het is echter onzeker of dit gebied in 2035 nog groter zal zijn dan in het referentiejaar 2010 (ontwerpdoelstelling), vanwege aanhoudende morfologische veranderingen en zeespiegelstijging. Niet alleen de omvang van het droogvallend gebied is daarbij bepalend voor de beschikbaarheid van geschikt foerageerhabitat; ook de kwaliteit van de habitat speelt een rol, zoals de ontwikkeling van de sedimentsamenstelling en de bijdrage van lagergelegen delen van de plaat aan het voedselaanbod voor vogels.

Een ruimtelijk gevarieerd morfologisch systeem sluit goed aan bij de natuurlijke kenmerken van de Roggenplaat en versterkt daardoor de draagkracht voor vogels van de getijdenplaat.

Analyses tonen dat vogels profiteren van een spreiding in droogvalduurklassen en sedimenttypen: van steltlopers op de hoger gelegen zandige delen tot soorten die lagere, fijnere zones benutten. Deze ruimtelijke diversiteit maakt de plaat robuuster en beter in staat te blijven functioneren als foerageergebied en aan te passen aan natuurlijke dynamiek en zeespiegelstijging. De toekomstige ontwikkeling van morfologie en sedimentsamenstelling zal bepalend zijn voor de kwaliteit van de foerageerhabitat in het doeljaar 2035.

6.2.3 Kennisontwikkeling

De monitoring van de Roggenplaat heeft concrete nieuwe kennis opgeleverd die direct toepasbaar is voor de ontwikkeling en optimalisatie van toekomstige suppleties gericht op natuurherstel en -ontwikkeling. Daarbij gaat het zowel om methodologische inzichten als om proceskennis (zie Hoofdstukken 1 t/m 3). Een overzicht van de projectoutput is te vinden in bijlage 8.

Methodologische inzichten

- De studie laat zien hoe betrouwbare volumeontwikkelingen van suppletie-elementen kunnen worden bepaald door LiDAR-hoogtemetingen te corrigeren met RTK-dGPS-raaimetingen (Bijlage B1.2.3).
- Daarnaast blijkt dat semi-kwantitatieve benthosmonitoring (zoals toegepast op de Roggenplaat) een waardevolle aanvulling vormt op de logistiek zwaardere kwantitatieve bemonstering, omdat trends in voedselaanbod voor vogels hiermee efficiënter kunnen worden gevolgd.

Nieuwe proceskennis (morfologie, bodemdieren en vogels)

De monitoring heeft drie belangrijke inhoudelijke inzichten opgeleverd:

- Sedimentdynamiek na aanleg: het microreliëf op de suppleties neemt al binnen één jaar sterk af (Bijlage B1.6.2), en zettingen van de ondergrond veroorzaken in de daaropvolgende jaren nog een substantieel deel van de gemeten bodemhoogteveranderingen (Bijlage B1.6.3).
- Herkolonisatie bodemdieren: de hersteldynamiek van bodemdieregemeenschappen blijkt nauw verbonden met droogvalduur en sedimentsamenstelling. Suppleties met fijner sediment en een gunstige droogvalduur worden sneller gekoloniseerd dan grovere, langer natte delen.
- Vogelgebruik en vogelprofielen: de ontwikkeling van vogelprofielen heeft een duidelijker beeld gegeven van hoe verschillende vogelsoorten de suppleties benutten en welke combinaties van hoogte, korrelgrootte en droogvalduur aansluiten op hun foerageerbehoefden. De Roggenplaatdata laten zien dat variatie in droogvalduur en korrelgrootte bepalend is voor het gebruik door de doelsoorten.

Lessen voor ontwerp en beheer

De opgedane kennis is al toegepast bij het ontwerp van de komende suppleties in het Middengebied (Galgeplaat, Slikken van den Dortsman), nog vóór afronding van dit eindrapport. Daarbij zijn de volgende lessen expliciet meegenomen:

- Ruimtelijke spreiding van suppleties functioneert goed: een mozaïek van suppletie-elementen met verschillende hoogtes en droogvalduren vergroot de ecologische waarde.
- Sedimentkeuze is cruciaal: het gebruik van korrelgroottes die aansluiten bij het omringende plaatmateriaal draagt bij aan snellere kolonisatie door bodemdieren en betere benutting door vogels.
- Bodemvocht vasthouden (bijvoorbeeld door kleinschalige variatie in reliëf) lijkt relevant voor zowel benthos als vogels.
- De huidige doelindicator (behoud van het 50–80% droogvalduurareaal) blijkt bruikbaar, maar verdient aanscherping door ook diversiteit in hoogteligging en variatie in sedimenttypen mee te wegen (Hoofdstuk 5).

Gezamenlijk bieden deze inzichten een stevig fundament voor het verbeteren van toekomstige suppleties in de Oosterschelde en vergelijkbare gebieden daarbuiten.

6.3 Kennisleemtes en aanbevelingen

Ondanks de uitgebreide metingen en analyses blijven er kennisleemtes bestaan en zijn nieuwe kennisleemtes geïdentificeerd die de evaluatie en optimalisatie van (toekomstige) suppletieontwerpen in de Oosterschelde beperken. Deze paragraaf benoemt de belangrijkste kennisleemtes en geeft richting aan toekomstig onderzoek.

Doelindicator en evaluatie van de foerageerfunctie

De huidige doelindicator voor het behoud van de foerageerfunctie (50–80% droogvalduurareaal) voor 25 jaar op de Roggenplaat (Van der Werf et al., 2016b) biedt een kwantitatieve basis, maar dekt het ecologische functioneren onvoldoende. De indicator houdt geen rekening met de waarde van lagere delen van de plaat,

de hoogteverdeling binnen de droogvalduurklassen en de sedimentsamenstelling. Aanbevolen wordt om de doelindicator door te ontwikkelen tot een set van ecologisch meer betekenisvolle, maar nog wel eenduidig meetbare, indicatoren waarin ook variatie in droogvalduur en korrelgrootte tot uitdrukking komen.

Monitoring op langere termijn

De monitoring beslaat vijf jaar, terwijl de ontwerphorizon 25 jaar is. Veel processen, zoals morfologische ontwikkeling en het volledig herstellen van de bodemdiergemeenschap, beslaan meer dan vijf jaar. Kennis over hoe de suppleties zich in de Oosterschelde over langere perioden (decennia) gaan ontwikkelen is beperkt. Vervolgmonitoring na 2024 is daarom noodzakelijk (idealiter in samenhang met de andere suppleties in de Oosterschelde; De Vet et al., 2023), zij het met een beperktere opzet en grotere meetintervallen. Jaarlijkse herhalingen van een selectie van RTK-profielen en LiDAR-metingen kunnen inzicht geven in trends in droogvalduur en hoogteontwikkeling. Bijvoorbeeld om vast te stellen of en wanneer de morfologische veranderingen van de suppletie-elementen afnemen en wat daarvan de implicaties zijn voor het doelbereik. Ook een vereenvoudigde bemonstering van bodemdieren (semi-kwantitatieve methode; idealiter met sedimentbemonstering) en geoptimaliseerde vogeltellingen zijn aan te bevelen.

Monitoring zettingen van de ondergrond

Uit deze studie blijkt dat in de eerste vijf jaar na aanleg ongeveer 28% van het volumeverlies van de suppletie het gevolg is van zettingen van de grond onder de suppletie-elementen. Deze inschatting is echter aan substantiële meeton nauwkeurigheden onderhevig, mede omdat de zakbaken alleen waren beoogd om de relatief grote zettingen tijdens aanleg over enkele maanden op te volgen. Bij de opvolging van toekomstige suppleties in de Oosterschelde is het belangrijk dat de zettingen van de ondergrond betrouwbaarder worden opgevolgd (zie ook Bijlage B1.6.3) zodat het volumeverlies van suppletie-elementen door zettingen van de ondergrond nauwkeuriger kan worden ingeschat.

Sedimentsamenstelling en transportprocessen

De waargenomen veranderingen in korrelgrootte en slibgehalte kunnen nog niet goed worden gekoppeld aan sturende processen. Veranderingen in sedimentsamenstellingen kunnen zowel een fysische als biologische oorsprong hebben. Inzichten in het sedimenttransport zijn nodig voor het beter begrijpen van de veranderingen in bodemsamenstelling en ruimtelijke verspreiding van het suppletiesediment. Aanvullende metingen met hogere ruimtelijke resolutie, gecombineerd met hydrodynamische waarnemingen en modellering, kunnen helpen om relaties tussen stroming, stormimpact, bodemdieren (benthos) en sedimentdynamiek (en interacties tussen deze) beter te begrijpen. Dergelijk onderzoek draagt bij aan een effectiever suppletieontwerp en fundamenteel inzicht in sedimenttransport in intergetijdengebieden. Daarom wordt aanbevolen om, wanneer kansen zich voordoen, dergelijke metingen in de Oosterschelde op te zetten in samenhang met wetenschappelijke onderzoeksprojecten.

Sedimentvochtigheid en ecologische relaties

De vochtigheid van het sediment is een belangrijke factor voor bodemdieren en hun temperatuurtolerantie en foerageerbaarheid voor vogels (de penetreerbaarheid van het sediment). Standaardisatie van *in-situ* vochtmetingen, gekoppeld aan bodemdieronderzoek, kan inzicht geven in deze relaties. Aanvullend wordt aanbevolen om de soortspecifieke interacties tussen vogels en sediment (waaronder sedimentvochtigheid en korrelgrootte) te bestuderen, bij voorkeur in samenhang met bestaande, of nog op te zetten, vogeltrackingprogramma's die betere inzichten kunnen verschaffen over de relatie tussen vogels en de habitatkwaliteit. Observaties van vogeltellers waarbij kanoetstrandlopers en bonte strandlopers vaak foeragerend worden gezien in plassen die blijven staan op hogere delen van de plaat, ondersteunt het belang van deze onderzoeksrichting.

Ruimtelijke schaal en landschappelijke context

Het functioneren van suppleties wordt mede bepaald door de landschappelijke ligging (locatie) en samenhang tussen verschillende schaalniveaus (zowel tussen deelgebieden als Oosterschelde-breed). Toekomstig onderzoek kan zich richten op de relatie tussen lokale sedimentsamenstelling, morfologische diversiteit en de verspreiding van vogels. Het volgen van individuen (middels vogeltrackingstudies) kan daarbij helpen om inzicht te krijgen in de ruimtelijke aantrekkelijkheid van het benutten van getijdeplaten in relatie tot hoogwatervluchtplaatsen, b.v. door de vliegafstand tot die foerageerlocaties.

Kennisopbouw in samenhang met toekomstige suppleties

De Roggenplaatsuppletie maakt deel uit van een reeks suppleties in de Oosterschelde. Het is van belang dat kennisontwikkeling plaatsvindt in samenhang met de geplande suppleties in het Middengebied en de Kom van de Oosterschelde (PAGW). Voor project-overstijgende kennisleemtes en aanbevelingen wordt ook verwezen naar Hoofdstuk 5 van de voorstudie van de suppletie in het Middengebied van de Oosterschelde (de Vet et al., 2023). Integratie van inzichten uit deze projecten kan bijdragen aan effectievere, ecologisch onderbouwde suppleties in de toekomst. Dit vormt dan ook het uitgangspunt voor de onderzoeksactiviteiten rond de Oosterscheldesuppleties van Deltares (o.a. met RWS binnen de Subsidieregeling Instituten voor Toegepast Onderzoek; SITO-PS) en WMR (o.a. met RWS via het Toegepast Onderzoek Programma; TOP).

Literatuur

Arts, F., Hoekstein, M.H.J., Lilipaly, S., van Straalen, K.D., Wolf, P. A., Wijnants, L. (2017) Watervogels en zeezoogdieren in de Zoute Delta 2015/2016. Rapport. BM 17.20. Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening, Lelystad.

Baptist, M. J., Gerkema, T., van Prooijen, B. C., van Maren, D. S., van Regteren, M., Schulz, K., Colosimo, I., Vroom, J., van Kessel, T., Grasmeyer, B., Willemsen, P., Elschot, K., de Groot, A. V., Cleveringa, J., van Eekelen, E. M. M., Schuurman, F., de Lange, H. J., & van Puijenbroek, M. E. B. (2019). Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor.' *Ecological Engineering*, 127, 312–323. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.019>

Belliard, J. P., Silinski, A., Meire, D., Kolokythas, G., Levy, Y., Van Braeckel, A., Bouma, T. J., & Temmerman, S. (2019). High-resolution bed level changes in relation to tidal and wave forcing on a narrow fringing macrotidal flat: Bridging intra-tidal, daily and seasonal sediment dynamics. *Marine Geology*, 412, 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.03.001>

Bakker, W., Ens, B.J., Dokter, A., van der Kolk, H.J., Rappoldt, K., van de Pol, M., Troost, K., van der Veer, H.W., Bijleveld, A.I., van der Meer, J., Oosterbeek, K., Jongejans, E., Allen, A.M. (2021). Connecting foraging and roosting areas reveals how food stocks explain shorebird numbers. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 259, 107458

Bijleveld, A. I., R. B. MacCurdy, Y.-C. Chan, E. Penning, R. M. Gabrielson, J. Cluderay, E. L. Spaulding, A. Dekinga, S. Holthuijsen, J. ten Horn, M. Brugge, J.A. van Gils, D.W. Winkled, T. Piersma. 2016. Understanding spatial distributions: negative density-dependence in prey causes predators to trade-off prey quantity with quality. *Proceedings of the Royal Society B* 283:20151557.

Boersema, M.P., Bouma, T.J., Brink, A.M. van den, Lodewijk, P., Salvador de Paiva, J.N., Soissons, L., Vet, M. de, Walles, B., Werf, J.J. van der, Ysebaert, T.J.W. (2018). Oesterdam sand nourishment : ecological and morphological development of a local sand nourishment. Wageningen Marine Research, Deltares, NIOZ. Documentnummer 897286. 78 p.

Bouwmeester R. 2015. Het gebruik van intergetijdengebieden in de Oosterschelde door steltlopers. HZ University of Applied Science, Vlissingen.

Bolam, S. G. (2011). Burial survival of benthic macrofauna following deposition of simulated dredged material. *Environmental Monitoring and Assessment*, 181(1–4), 13–27. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1809-5>

Borsje, B.W., Cronin, K., Holzhauser, H., De Mesel, I., Ysebaert, T., Hibma, A., 2012. Biogeomorphological Interactions on a Nourished Tidal Flat: Lessons Learnt on Building With Nature. *Terra et Aqua*, 126, page 3–12.

Bouma, H., Duiker, J. M. C., de Vries, P. P., Herman, P. M. J., & Wolff, W. J. (2001). Spatial pattern of early recruitment of *Macoma balthica* (L.) and *Cerastoderma edule* (L.) in relation to sediment dynamics on a highly dynamic intertidal sandflat. *Journal of Sea Research*, 45(2), 79–93. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(01\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(01)00054-5)

Bouma, T. J., van Belzen, J., Balke, T., van Dalen, J., Klaassen, P., Hartog, A. M., Callaghan, D. P., Hu, Z., Stive, M. J. F., Temmerman, S., & Herman, P. M. J. (2016). Short-term mudflat dynamics drive long-term cyclic salt marsh dynamics. *Limnology and Oceanography*, 61(6), 2261–2275. <https://doi.org/10.1002/lno.10374>

Bouma, T. J., Vries, M. B. De., Low, E., Kusters, L., Herman, P. M. J., Tanczos, I. C., Temmerman, S., Hesselink, A., Meire, P., & Regenmortel, S. van. (2005). Flow hydrodynamics on a mudflat and in salt marsh vegetation: identifying general relationships for habitat characterisations. *Hydrobiologia*, 540(1–3), 259–274. <https://doi.org/10.1007/s10750-004-7149-0>

Compton, T. J., Holthuijsen, S., Koolhaas, A., Dekinga, A., ten Horn, J., Smith, J., Galama, Y., Brugge, M., van der Wal, D., van der Meer, J., van der Veer, H. W., & Piersma, T. (2013). Distinctly variable mudscapes: Distribution gradients of intertidal macrofauna across the Dutch Wadden Sea. *Journal of Sea Research*, 82, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2013.02.002>

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253–260.

Cozzoli, F., Smolders, S., Eelkema, M., Ysebaert, T., Escaravage, V., Temmerman, S., Meire, P., Herman, P. M. J., & Bouma, T. J. (2017). A modeling approach to assess coastal management effects on benthic habitat quality: A case study on coastal defense and navigability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 184, 67–82. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.043>

De Ronde, J.G., J.P.M. Mulder, L.A. Van Duren, T.J.W. Ysebaert (2013). Eindadvies ANT Oosterschelde, Deltares rapport 1207722-000-ZKS-0010.

De Vet, P.L.M., Van Prooijen, B.C., Colosimo, I., Steiner, N., Ysebaert, T., Herman, P.M.J., Wang, Z.B. (2020). Variations in storm-induced bed level dynamics across intertidal flats. *Scientific Reports*, 12877.

De Vet, P. L. M., Van Prooijen, B. C., Herman, P. M. J., Bouma, T. J., Van Maren, D. S., Walles, B., Van der Werf, J.J., Ysebaert, T., Van Zanten, E., Wang, Z. B. (2024). Response of estuarine morphology to storm surge barriers, closure dams and sea level rise. *Geomorphology*, 467, 109462.

De Vet, P. L. M., Van Prooijen, B. C., Schrijvershof, R. A., Van der Werf, J. J., Ysebaert, T., Schrijver, M. C., & Wang, Z. B. (2018). The importance of combined tidal and meteorological forces for the flow and sediment transport on intertidal shoals. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(10), 2464–2480.

De Vet, P.L.M., B.C. van Prooijen, Z.B. Wang (2017). The differences in morphological development between the intertidal flats of the Eastern and Western Scheldt. *Geomorphology*, 281,31-42.

De Vet, L., Walles, B., Vermeer, N., Van der Werf, J., Van Donk, S., Escaravage, V., 2023. Voorstudie Suppletie Middengebied Oosterschelde: Systeembekendheid en aanbevelingen voor het ontwerpproces. Rapport 11208553-002-ZKS-0004, Deltares & Wageningen Marine Research.

Drabsch, J., M., Parnell, K., E., T., Hume, M., Dolphin, T. J. 1999. The Capillary Fringe and the Water Table in an Intertidal Estuarine Sand Flat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (1999) 48, 215–222.

Dunn, F. E., & Minderhoud, P. S. J. (2022). Sedimentation strategies provide effective but limited mitigation of relative sea-level rise in the Mekong delta. *Communications Earth and Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00331-3>

Escaravage, V., T. Ysebaert, M. Bos en H. Hummel, 2003. Karakteristieken van het macrobenthos in de Oosterschelde in verband met actuele beheersvragen. Verworming?, Zandhonger en Steltlopers? Uitheemse versus Inheemse soorten?, NIOO-CEME Rapport 2003-06, ISSN Nummer 1381-6519, Nederlands Instituut voor Ecologie, Yerseke.

Escaravage, V., 2024. Semi-kwantitatieve opname bodemdieren Roggenplaat 2017-2022; Resultaten en vergelijking met de kwantitatieve monitoring. Wageningen Marine Research rapport C040/24.

Escaravage, V., Van Donk, S., De Vet, L., Vermeer, N., De Bakker, A., Van der Werf, J. & Van Belzen, J., 2024. Roggenplaatsuppleties (Oosterschelde): morfologische en ecologische ontwikkelingen over de eerste drie jaren (2020T1-2021T2-2022T3) na aanleg. Wageningen Marine Research rapport C006/24.

Esselink, P., & Zwarts, L. (1989). Seasonal trend in burrow depth and tidal variation in feeding activity of *Nereis diversicolor*. *Marine Ecology Progress Series*, 56(3), 243-254.

French, P. W. (2006). Managed realignment – The developing story of a comparatively new approach to soft engineering. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(3), 409–423.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.11.035>

Friedrichs, C. T. (2012). Tidal Flat Morphodynamics: A Synthesis. In *Treatise on Estuarine and Coastal Science* (Vol. 3, pp. 137–170). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00307-7>

Giosan, L., Syvitski, J., Constantinescu, S., & Day, J. (2014). Climate change: Protect the world's deltas. *Nature*, 516, 31–33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/516031a>

Grandjean, T. J., de Smit, J. C., van Belzen, J., Fivash, G. S., van Dalen, J., Ysebaert, T., & Bouma, T. J. (2023). Morphodynamic signatures derived from daily surface elevation dynamics can explain the morphodynamic development of tidal flats. *Water Science and Engineering*, 16(1), 14–25.
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.11.003>

Grandjean, T. J., Weenink, R., van der Wal, D., Addink, E. A., Hu, Z., Liu, S., Wang, Z. B., Lin, Y., & Bouma, T. J. (2024). Critical turbidity thresholds for maintenance of estuarine tidal flats worldwide. *Nature Geoscience*, Accepted.

Green, M.O., Coco, G. (2014). Review of wave-driven sediment resuspension and transport in estuaries. *Reviews of Geophysics*, 52, 77-117.

Hoekstein, M.S.J., Sluijter, M., van Straalen, K.D., Janse, W., 2024. Watervogels en zeehonden in de Zoute Delta in 2022/2023. Rijkswaterstaat, Cent. informatievoorziening Rapp. BM 24.01. Deltamilieu Proj. Rapp. 2024-01. Deltamilieu Proj. Vlissingen.

Hinchey, E. K., Schaffner, L. C., Hoar, C. C., Vogt, B. W., & Batte, L. P. (2006). Responses of Estuarine Benthic Invertebrates to Sediment Burial: The Importance of Mobility and Adaptation. *Hydrobiologia*, 556(1), 85–98. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1029-0>

Hu, Z., Borsje, B. W., van Belzen, J., Willemsen, P. W. J. M., Wang, H., Peng, Y., Yuan, L., De Dominicis, M., Wolf, J., Temmerman, S., & Bouma, T. J. (2021). Mechanistic Modeling of Marsh Seedling Establishment Provides a Positive Outlook for Coastal Wetland Restoration Under Global Climate Change. *Geophysical Research Letters*, 48(22). <https://doi.org/10.1029/2021GL095596>

Hu, Z., W. Lenting, D. van der Wal, T.J. Bouma (2015a). Continuous monitoring bed-level dynamics on a intertidal flat: introducing novel, stand-alone, high-resolution SED-sensors. *Geomorphology* 245: 223-230

Hu, Z., Wang, Z. B., Zitman, T. J., Stive, M. J. F., & Bouma, T. J. (2015b). Predicting long-term and short-term tidal flat morphodynamics using a dynamic equilibrium theory. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(9), 1803–1823. <https://doi.org/10.1002/2015JF003486>

Hu, Z., Willemsen, P. W. J. M., Borsje, B. W., Wang, C., Wang, H., Van Der Wal, D., Zhu, Z., Oteman, B., Vuik, V., Evans, B., Möller, I., Belliard, J. P., Van Braeckel, A., Temmerman, S., & Bouma, T. J. (2021). Synchronized high-resolution bed-level change and biophysical data from 10 marsh-mudflat sites in northwestern Europe. *Earth System Science Data*, 13, 405–416. <https://doi.org/10.5194/essd-13-405-2021>

Hu, Z., Yao, P., Van Der Wal, D., & Bouma, T. J. (2017). Patterns and drivers of daily bed-level dynamics on two tidal flats with contrasting wave exposure. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07515-y>

Jacobusse C. (2014). *Water- en wadvogels van het Nationaal Park Oosterschelde*. Uitgeverij Digitalis, ISBN 9789462283879, 108 pp.

Jentink, R. (2016). *Ontwikkelingen suppletie Galgeplaat*. Ontwikkelingen op basis van de metingen 2015 en 2016. Rijkswaterstaat Centrale Informatie Voorzieningen. Versienummer M151103488-01.

Le Hir, P., Roberts, W., Cazaillet, O., Christie, M., Bassoullet, P., Bacher, C. (2000). Characterization of intertidal flat hydrodynamics. *Continental Shelf Research*, 20(12-13), 1433-1459.

Lee, H. J., Jo, H. R., Chu, Y. S., & Bahk, K. S. (2004). Sediment transport on macrotidal flats in Garolim Bay, west coast of Korea: significance of wind waves and asymmetry of tidal currents. *Continental Shelf Research*, 24(7-8), 821-832. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.01.005>

Leopold, M.F., Smit, C.J., Goedhart, P.W., van Roomen, M., van Winden, E., van Turnhout, C. (2004). *Langjarige trends in aantallen wadvogels, in relatie tot de kokkelvisserij en het gevoerde beleid in deze; Eindverslag EVA II (Evaluatie Schelpdiervisserij tweede fase) Deelproject C2*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 954. 165 pp.

Meire PM, Seys J, Buijs J & Coosen J., (1994). Spatial and temporal patterns of intertidal macrobenthic populations in the Oosterschelde: are they influenced by the construction of the storm-surge barrier? *Hydrobiologia* 282/283: 157-182.

Mu, T., & Wilcove, D. S. (2020). Upper tidal flats are disproportionately important for the conservation of migratory shorebirds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1928). <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0278>

Mulligan, R. P., Smith, P. C., Tao, J., & Hill, P. S. (2019). Wind-wave and Tidally Driven Sediment Resuspension in a Macrotidal Basin. *Estuaries and Coasts*, 42(3), 641-654. <https://doi.org/10.1007/s12237-018-00511-z>

Murray, N. J., Phinn, S. R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M. B., Clinton, N., Thau, D., & Fuller, R. A. (2019). The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565(7738), 222-225. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8>

Nambu, R., Saito, H., Tanaka, Y., Higano, J., & Kuwahara, H. (2012). Wave actions and topography determine the small-scale spatial distribution of newly settled Asari clams *Ruditapes philippinarum* on a tidal flat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 99, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.11.010>

Passeri, D. L., Hagen, S. C., Medeiros, S. C., Bilskie, M. V., Alizad, K., & Wang, D. (2015). The dynamic effects of sea level rise on low-gradient coastal landscapes: A review. In *Earth's Future* (Vol. 3, Issue 6, pp. 159-181). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/2015EF000298>

Pigot, A.L., Sheard, C., Miller, E.T., Bregman, T.P., Freeman, B.G., Roll, U., Seddon, N., Trisos, C.H., Weeks, B.C. and Tobias, J.A., 2020. Macroevolutionary convergence connects morphological form to ecological function in birds. Nature Ecology & Evolution, 4(2), pp.230-239

Queirós, A. M., Birchenough, S. N. R., Bremner, J., Godbold, J. A., Parker, R. E., Romero-Ramirez, A., Reiss, H., Solan, M., Somerfield, P. J., Van Colen, C., Van Hoey, G., & Widdicombe, S. (2013). A bioturbation classification of European marine infaunal invertebrates. *Ecology and Evolution*, 3(11), 3958-3985. <https://doi.org/10.1002/ece3.769>

Rappoldt C, Kersten M, Ens BJ (2006). Scholeksters en de droogvalduur van kokkels in de Oosterschelde; Modelberekeningen voor de periode 1990 - 2045 aan het effect van zandhonger en zeespiegelstijging op het aantal scholeksters. EcoCurves (Haren) en SOVON Vogelonderzoek Nederland (Beek-Ubbergen), EcoCurves rapport 2, SOVON onderzoeksrapport 2006/12

R Core Team, 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Found. Stat. Comput. Vienna. <https://www.R-project.org>.

Saengsupavanich, C., Pranzini, E., Ariffin, E. H., & Yun, L. S. (2023). Jeopardizing the environment with beach nourishment. *Science of The Total Environment*, 868, 161485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161485>

Schaap, J., 2012. Benthos herstel Suppletie: Onderzoek naar het herstel van de benthische macrofauna na de proefsuppletie op de Galgeplaat en bepaling van mogelijke factoren die de herkolonisationsnelheid beïnvloeden.

Shi, B., Yang, S. L., Temmerman, S., Bouma, T., Ysebaert, T., Wang, S., Zhang, Y., Wu, J., Yang, H., Zhang, L., Zuo, L., & Wang, Y. P. (2021). Effect of typhoon-induced intertidal-flat erosion on dominant macrobenthic species (*Meretrix meretrix*). *Limnology and Oceanography*, 66(12), 4197–4209. <https://doi.org/10.1002/lno.11953>

Shi, Y., Li, J., & Xie, M. (2018). Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai. *Ecological Indicators*, 85, 729–741. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.033>

Smaal, A. C., & Nienhuis, P. H. (1992). The eastern Scheldt (The Netherlands), from an estuary to a tidal bay: A review of responses at the ecosystem level. *Netherlands Journal of Sea Research*, 30, 161–173. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(92\)90055-J](https://doi.org/10.1016/0077-7579(92)90055-J)

Solanki, P., Jain, B., Hu, X., & Sancheti, G. (2023). A Review of Beneficial Use and Management of Dredged Material. *Waste*, 1(3), 815–840. <https://doi.org/10.3390/waste1030048>

Stolte, W., F. Baart, S. Muis, M. Hijma, M. Taal, D. Le Bars, S. Drijfhout (2023). Zeespiegelmonitor 2022. Deltares & KNMI rapport 11209266-000-ZKS-0001.

Tobias, J.A., Sheard, C., Pigot, A.L., Devenish, A.J., Yang, J., Sayol, F., Neate-Clegg, M.H., Alioravainen, N., Weeks, T.L., Barber, R.A. and Walkden, P.A., 2022. AVONET: morphological, ecological and geographical data for all birds. *Ecology letters*, 25(3), pp.581-597.

Troost, K., & Ysebaert, T., 2011. ANT Oosterschelde: Long-term trends of waders and their dependence on intertidal foraging grounds. (Report / IMARES Wageningen UR; No. C063/11). IMARES.

van Belzen, J., Fivash, G. S., Hu, Z., Bouma, T. J., & Herman, P. M. J. (2022). A probabilistic framework for windows of opportunity: the role of temporal variability in critical transitions. *Journal of The Royal Society Interface*, 19(190). <https://doi.org/10.1098/rsif.2022.0041>

van Bijsterveldt, C. E. J., van der Wal, D., Mancheño, A. G., Fivash, G. S., Helmi, M., & Bouma, T. J. (2023). Can cheniers protect mangroves along eroding coastlines? – The effect of contrasting foreshore types on mangrove stability. *Ecological Engineering*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106863>

van Bijsterveldt, C. E. J., van Wesenbeeck, B. K., van der Wal, D., Afati, N., Pribadi, R., Brown, B., & Bouma, T. J. (2020). How to restore mangroves for greenbelt creation along eroding coasts with abandoned aquaculture ponds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106576>

Van de Kam, J., Ens, B., Piersma, T., & Zwarts, L., 2017. Shorebirds: an illustrated behavioural ecology. Brill.

-
- Van den Berg, J.H. (1986). Aspects of sediment-and morphodynamics of subtidal deposits of the Oosterschelde (the Netherlands). PhD thesis. Technical University of Delft.
- Van der Meer, J., 1991. Exploring macrobenthos-environment relationship by canonical correlation analysis. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 148, 1991. 105-120.
- van der Wal, D., Forster, R. M., Rossi, F., Hummel, H., Ysebaert, T., Roose, F., & Herman, P. M. J. (2011). Ecological evaluation of an experimental beneficial use scheme for dredged sediment disposal in shallow tidal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 62(1), 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.09.005>
- van der Wal, D., Ysebaert, T., & Herman, P. (2017). Response of intertidal benthic macrofauna to migrating megaripples and hydrodynamics. *Marine Ecology Progress Series*, 585, 17–30. <https://doi.org/10.3354/meps12374>
- van der Werf, J., de Vet, P. L. M., Boersema, M. P., Bouma, T. J., Nolte, A. J., Schrijvershof, R. A., Soissons, L. M., Stronkhorst, J., van Zanten, E., & Ysebaert, T. (2019). An integral approach to design the Roggenplaat intertidal shoal nourishment. *Ocean and Coastal Management*, 172, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.023>
- Van der Werf, J., Reinders, J., van Rooijen, A. (2013). Evaluatie Galgeplaat proefsuppletie 2008-2012. Delft.
- Van der Werf J, Reinders J, van Rooijen A, et al. 2015. Evaluation of a tidal flat sediment nourishment as estuarine management measure. *Ocean Coast Manag* 114:77–87.
- Van der Werf, J., M. Boersema, A. Nolte, R. Schrijvershof, J. Stronkhorst, L. De Vet, B. Walles, T. Ysebaert (2016a). Variantenstudie Roggenplaat suppletie. Centre of Expertise Delta Technology, Deltares rapport 1220324-000-ZKS-0008.
- Van der Werf, J., M. Boersema, A. Nolte, R. Schrijvershof, J. Stronkhorst, L. De Vet, B. Walles, T. Ysebaert (2016b). Definitief ontwerp Roggenplaat suppletie. Centre of Expertise Delta Technology, Deltares rapport 1220324-000-ZKS-0009.
- van Dijk, W. M., Cox, J. R., Leuven, J. R. F. W., Cleveringa, J., Taal, M., Hiatt, M. R., Sonke, W., Verbeek, K., Speckmann, B., & Kleinhans, M. G. (2021). The vulnerability of tidal flats and multi-channel estuaries to dredging and disposal. *Anthropocene Coasts*, 4(1), 36–60. <https://doi.org/10.1139/anc-2020-0006>
- Van Dusen, B.,M., Fegley, S.,R., Peterson, C.,H., 2012. Prey Distribution, Physical Habitat Features, and Guild Traits Interact to Produce Contrasting Shorebird Assemblages among Foraging Patches. *PLoS ONE* 7(12).
- Vanoverbeke, J., van Ryckegem, G., 2015. Statistische analyse van het gebruik van het litoraal door steltlopers in de Westerschelde, Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2015 (INBO.R.2015.11358580). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- van Rijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867–887. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004>
- Vanden Eede, S., Van Tomme, J., De Busschere, C., Vandegheuchte, M. L., Sabbe, K., Stienen, E. W. M., Degraer, S., Vincx, M., & Bonte, D. (2014). Assessing the impact of beach nourishment on the intertidal food web through the development of a mechanistic-envelope model. *Journal of Applied Ecology*, 51(5), 1304–1313. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12314>
- Van Zanten, E., Adriaanse, L.A., 2008. Verminderd getij: verkenning naar mogelijke maatregelen om het verlies van platen, slikken en schorren in de Oosterschelde te beperken. Middelburg.

Wallès, B., Salvador de Paiva, J., van Prooijen, B. C., Ysebaert, T., & Smaal, A. C. (2015). The ecosystem engineer *Crassostrea gigas* affects tidal flat morphology beyond the boundary of their reef structures. *Estuaries and Coasts*, 38(3), 941-950.

Wallès B., S. van Donk, A. Hamer, J. Wijsman, T. Ysebaert, E. Ruranga, L. de Vet, J. van der Werf, A. Slager (2021a). Roggenplaatsuppletie (Oosterschelde): ontwikkeling 2015 – 2019 (T0). C017/21, Wageningen Marine Research.

Wallès B., S. van Donk, A. Hamer, J. Wijsman, T. Ysebaert, E. Ruranga, L. de Vet, J. van der Werf, A. Slager (2021b). Roggenplaatsuppletie (Oosterschelde): ontwikkelingen voor (T0: 2015 – 2019) en het eerste jaar na aanleg (T1: 2020) van de suppleties. C038/21, Wageningen Marine Research.

Waltham, N. J., Elliott, M., Lee, S. Y., Lovelock, C., Duarte, C. M., Buelow, C., Simenstad, C., Nagelkerken, I., Claassens, L., Wen, C. K.-C., Barletta, M., Connolly, R. M., Gillies, C., Mitsch, W. J., Ogburn, M. B., Purandare, J., Possingham, H., & Sheaves, M. (2020). UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030—What Chance for Success in Restoring Coastal Ecosystems? *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00071>

Wiegmann, N., Perluka, R., Oude Elberink, S., Vogelzang, J. (2005). Vaklodgingen: de inwintechnieken en hun combinaties: vergelijking tussen verschillende inwintechnieken en de combinaties ervan. Technical Report. 271766, Rijkswaterstaat, Adviesdienst Geo-Informatica en ICT (AGI).

Wiesebron, L. E., Cheng, C. H., de Vet, P. L. M., Wallès, B., van Donk, S., van Dalen, J., van de Lageweg, W., Ysebaert, T., & Bouma, T. J. (2024). How restoration engineering measures can enhance the ecological value of intertidal flats. *Restoration Ecology*, 32(8). <https://doi.org/10.1111/rec.14247>

Wiesebron, L. E., Teeuw, L., van Dalen, J., van IJzerloo, L., Troost, K., Wallès, B., Ysebaert, T., & Bouma, T. (2022). Contrasting strategies to cope with storm-induced erosion events: a flume study comparing a native vs. introduced bivalve. *Limnology and Oceanography*, 67(11), 2572–2585. <https://doi.org/10.1002/lno.12223>

Wijsman, J.W.M., M. Kraan (2017). Plan van aanpak risicomonitoring Roggenplaatsuppletie; Monitoring effecten op de nabijgelegen mosselkweekpercelen. Wageningen Marine Research, Rapport nummer: C037.17, 51 p.

Wijsman, J.W.M., (2023). Risicomonitoring suppletie Roggenplaat: Monitoring effecten van de suppletie op nabijgelegen mosselkweekpercelen. Rapport C014/23, WMR

Willemsen, P. W. J. M., Borsje, B. W., Hulscher, S. J. M. H., Van der Wal, D., Zhu, Z., Oteman, B., Evans, B., Möller, I., & Bouma, T. J. (2018). Quantifying Bed Level Change at the Transition of Tidal Flat and Salt Marsh: Can We Understand the Lateral Location of the Marsh Edge? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 2509–2524. <https://doi.org/10.1029/2018JF004742>

Willemsen, P. W. J. M., Horstman, E. M., Bouma, T. J., Baptist, M. J., van Puijenbroek, M. E. B., & Borsje, B. W. (2022). Facilitating Salt Marsh Restoration: The Importance of Event-Based Bed Level Dynamics and Seasonal Trends in Bed Level Change. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.793235>

Witteveen+Bos, (2011). MIRT-Verkenning Zandhonger Oosterschelde. Ontwerp-structuurvisie, Witteveen+Bos rapport RW1809-28/torm/231.

Wood, S.N., 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2nd edition). Chapman and Hall/CRC.

Xu, K., Bentley, S. J., Day, J. W., & Freeman, A. M. (2019). A review of sediment diversion in the Mississippi River Deltaic Plain. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 225, 106241. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.05.023>

-
- Yang, S. L., Milliman, J. D., Li, P., & Xu, K. (2011). 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Global and Planetary Change*, 75, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.09.006>
- Ysebaert, T., Herman, P. M. J., Meire, P., Craeymeersch, J., Verbeek, H., & Heip, C. H. R. (2003). Large-scale spatial patterns in estuaries: estuarine macrobenthic communities in the Schelde estuary, NW Europe. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(1–2), 335–355. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00359-1](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00359-1)
- Ysebaert, T., J. van der Werf, L. de Vet, T. Bouma (2016). Monitoringsplan Roggenplaat suppletie. Centre of Expertise Delta Technology, Wageningen Marine Research rapport.
- Yuan, L., Liu, D., Tian, B., Yuan, X., Bo, S., Ma, Q., Wu, W., Zhao, Z., Zhang, L., & Keesing, J. K. (2022). A solution for restoration of critical wetlands and waterbird habitats in coastal deltaic systems. *Journal of Environmental Management*, 302, 113996. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113996>
- Zandvoort, M., Van der Zee, E., Vuik., V., (2019). De effecten van zeespiegelstijging en zandhonger op de Oosterschelde. Rijkswaterstaat.
- Zheng, J., Elmilady, H., Rübke, B. R., Taal, M., Wang, Z. B., van Prooijen, B. C., de Vet, P. L. M., & van der Wegen, M. (2021). The impact of wind-waves and sea level rise on the morphodynamics of a sandy estuarine shoal. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(15), 3045–3062. <https://doi.org/10.1002/esp.5207>
- Zhou, Z., Grandjean, T. J., de Smit, J., van Belzen, J., Fivash, G. S., Walles, B., Beauchard, O., van Dalen, J., Blok, D. B., van IJzerloo, L., Ysebaert, T., & Bouma, T. J. (2024). Sediment dynamics shape macrofauna mobility traits and abundance on tidal flats. *Limnology and Oceanography*, 69(10), 2278–2293. <https://doi.org/10.1002/lno.12669>
- Zhu, Q., van Prooijen, B. C., Wang, Z. B., & Yang, S. L. (2017). Bed-level changes on intertidal wetland in response to waves and tides: A case study from the Yangtze River Delta. *Marine Geology*, 385, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.01.00>
- Zwarts, L., Wanink, J. (1989). Siphon size and burying depth in deposit- and suspension-feeding benthic bivalves. *Mar. Biol.* 100: 227-240
- Zwarts L, Ens BJ, Goss-Custard JD, Hulscher JB, Le V. Dit Durell S. (1996). Causes of variation in prey profitability and its consequences for the intake rate of the Oystercatcher *Haematopus ostralegus*, *Ardea* 84A: 229-268
- Zwarts, L. (2009). Voedsel voor wadvogels in de Oosterschelde: nazomer 2009. A&W rapport 1346: 1-79.
- Zwarts, L., A-M. Blomert, D. Bos, M. Sikkema, (2011). Exploitation of intertidal flats in the Oosterschelde by estuarine birds, A&W rapport 1657, Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek, Feanwâlden.

Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2015 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV.

Het Chemisch en Benthos laboratorium beschikken over een EN-ISO/IEC 17025:2017 accreditatie voor testlaboratoria met nummer L097. Deze accreditatie is verleend door de Raad voor Accreditatie. Het Chemisch en Benthos laboratorium hebben hierdoor aangetoond in staat te zijn op technisch bekwaame wijze valide resultaten te leveren en te werken volgens de ISO17025 norm. De scope (L097) met de geaccrediteerde analysemethoden is te vinden op de website van de Raad voor Accreditatie (www.rva.nl).

Op grond van deze accreditatie is het kwaliteitskenmerk Q toegekend aan de resultaten van die componenten die op de scope staan vermeld, mits aan alle kwaliteitseisen is voldaan. Het kwaliteitskenmerk Q staat vermeld in de tabellen met de oorspronkelijke onderzoeksresultaten.

De kwaliteit van de analysemethoden wordt op verschillende manieren gewaarborgd. De juistheid van de analysemethoden wordt regelmatig getoetst door deelname aan ringonderzoeken cq bekwaamheidsonderzoeken (3^e lijnscontrole).

Daarnaast worden bij iedere meetserie nog andere kwaliteitscontroles uitgevoerd waaronder 1^e lijns (controlemonsters) en 2^e lijns controles.

Indien gewenst kunnen gegevens met betrekking tot de prestatiekenmerken van de analysemethoden bij het laboratorium worden opgevraagd.

Indien sprake is van onbeheerste kwaliteit worden passende maatregelen genomen.

Verantwoording

Rapport: C095/25

Projectnummer: 4313100153

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het verantwoordelijk lid van het managementteam van Wageningen Marine Research.

Akkoord: Evert de Froe
Collega-onderzoeker

Handtekening:



Datum: 28 november 2025

Akkoord: Jeroen Wijsman
Collega-onderzoeker

Handtekening:



Datum: 28 november 2025

Akkoord: Dr. C.J. Wiebinga
Business Manager Projecten

Handtekening:



Datum: 28 november 2025

Bijlage 1 Morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat en de suppletie-elementen

Bijlage 1 Morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat en de suppletie-elementen 79

B1.1	Inleiding	80
	B1.1.1. Opbouw hoofdstuk	80
	B1.1.2. Onderzoeksvragen	80
	B1.1.3. Mate van relevantie van de verschillende morfologische onderzoeksvragen met betrekking tot de projectdoelstelling	81
B1.2	Methodologie	82
	B1.2.1. Studiegebied	82
	B1.2.2. Een overzicht van de uitgevoerde metingen en activiteiten	82
	B1.2.3. LiDAR correctie op basis van RTK raaien	88
	B1.2.4. Afbakening suppletie-elementen	90
	B1.2.5. Hydrodynamische modellering	90
B1.3	Achtergrond: historische ontwikkeling Roggenplaat voor suppleren (tot 2019)	92
B1.4	Achtergrond: wind-, golf-, en waterstandcondities tijdens de monitoringscampagne	97
	B1.4.1. Windcondities	97
	B1.4.2. Golfcondities	98
	B1.4.3. Waterstandcondities en sluitingen kering	100
B1.5	Evaluatie ontwikkeling Roggenplaatcomplex	103
B1.6	Evaluatie ontwikkeling suppletie-elementen	109
	B1.6.1. Eigenschappen suppletie-elementen	110
	B1.6.2. Morfologische ontwikkeling van de suppletie-elementen	111
	B1.6.3. Zetting van de ondergrond	116
B1.7	Verdiepend morfologisch procesbegrip	119
	B1.7.1. Wanneer en waar erosie optreedt	120
	B1.7.2. Sedimentverplaatsingen over de plaat en rondom suppleties	129
	B1.7.3. Veranderingen in sedimentsamenstelling	134
	B1.7.4. Invloed op niet-gesuppleerde gebieden	141
	B1.7.5. Veranderingen in stroming	153
	B1.7.6. Effect van oesterriffen op de morfologische ontwikkelingen	158

B1.1 Inleiding

B1.1.1. Opbouw hoofdstuk

In deze bijlage worden de analyses getoond van de morfologische toestand en ontwikkeling van de Roggenplaat en de suppletie-elementen (de termen suppletie-elementen en suppleties worden hierna door elkaar gebruikt) op basis van de uitgevoerde metingen sinds 2015 (vijf jaar voor suppleren) tot en met 2024 (vijf jaar na suppleren). Deze bijlage betreft een vervolg op Bijlage 1 in de T3 rapportage (Escaravage et al., 2024). De inhoud is herzien en aangevuld om de meest recente gegevens en inzichten weer te geven. Allereerst wordt in paragraaf B1.2 de methodologie van de analyses van dit hoofdstuk uiteengezet. Hierna volgen twee paragrafen met achtergrondinformatie: paragraaf B1.3 geeft een samenvatting van de historische ontwikkeling van de Roggenplaat; paragraaf B1.4 toont de meteorologische en hydrodynamische condities tijdens de monitoringsperiode. Hierna komt de beantwoording van de onderzoeksvragen zoals geformuleerd in paragraaf B1.1.2 aan bod. De evaluatievragen worden behandeld in paragrafen B1.5 en B1.6. Daarna worden in paragraaf B1.7 de analyses ter beantwoording van de kennisvragen doorlopen, die een verklarend doel dienen. De samenhang tussen de verschillende onderzoeksvragen en de relatie van deze vragen met de primaire projectdoelstelling zijn gegeven in paragraaf B1.1.3.

B1.1.2. Onderzoeksvragen

Onderstaande morfologische onderzoeksvragen komen aan bod in deze bijlage. Deze zijn, beperkte herformuleringen daargelaten, conform het monitoringsplan (Ysebaert et al., 2016). Daarnaast zijn er een aantal aanvullende onderliggende kennisvragen opgenomen (aangeduid met "toevoeging") die de beantwoording van de centrale kennisvraag dienen.

Evaluatievragen:

1. Hoe verandert het areaal droogvalduur op de gehele Roggenplaat in de jaren vóór en in de eerste vijf jaar na aanleg van de suppletie? (paragraaf B1.5)
2. Hoe ontwikkelen de suppletie-elementen zich morfologisch en is dit afhankelijk van de locatie op de Roggenplaat? (paragraaf B1.6)

Centrale kennisvraag:

Welke processen liggen ten grondslag aan de morfologische veranderingen van de Roggenplaat en specifiek de suppleties? (paragraaf B1.7)

Onderliggende kennisvragen:

1. Wanneer en waar treedt vooral erosie op (bijvoorbeeld bij stormen)? (paragraaf B1.7.1)
2. Blijft het geërodeerde suppletiesediment in de nabijheid van de suppleties of komt het (ook) elders terecht? (paragraaf B1.7.2)
3. Hoe is de sedimentsamenstelling op de Roggenplaat en specifiek de suppleties veranderd? (paragraaf B1.7.3)
4. Zijn er niet-gesuppleerde gebieden (geulen, intergetijdengebied) die beïnvloed worden door de aanwezigheid van de suppleties, vindt er bijvoorbeeld geulvorming plaats? (paragraaf B1.7.4)
5. Hoe is de stroming en afwatering op de Roggenplaat en in de oostelijke geul (het Middengeultje) veranderd door de aanleg van de suppleties? (paragraaf B1.7.5)
6. Hebben oesterriffen een rol in het vasthouden van (gesuppleerd) sediment op de Roggenplaat? (paragraaf B1.7.6)

Opgemerkt wordt dat de kennisvragen gerelateerd aan de sediment- en suspensietransportmetingen (paragraaf 5.3 in Ysebaert et al., 2016) niet zijn opgenomen omdat deze metingen zijn komen te vervallen.

B1.1.3. Mate van relevantie van de verschillende morfologische onderzoeksvragen met betrekking tot de projectdoelstelling

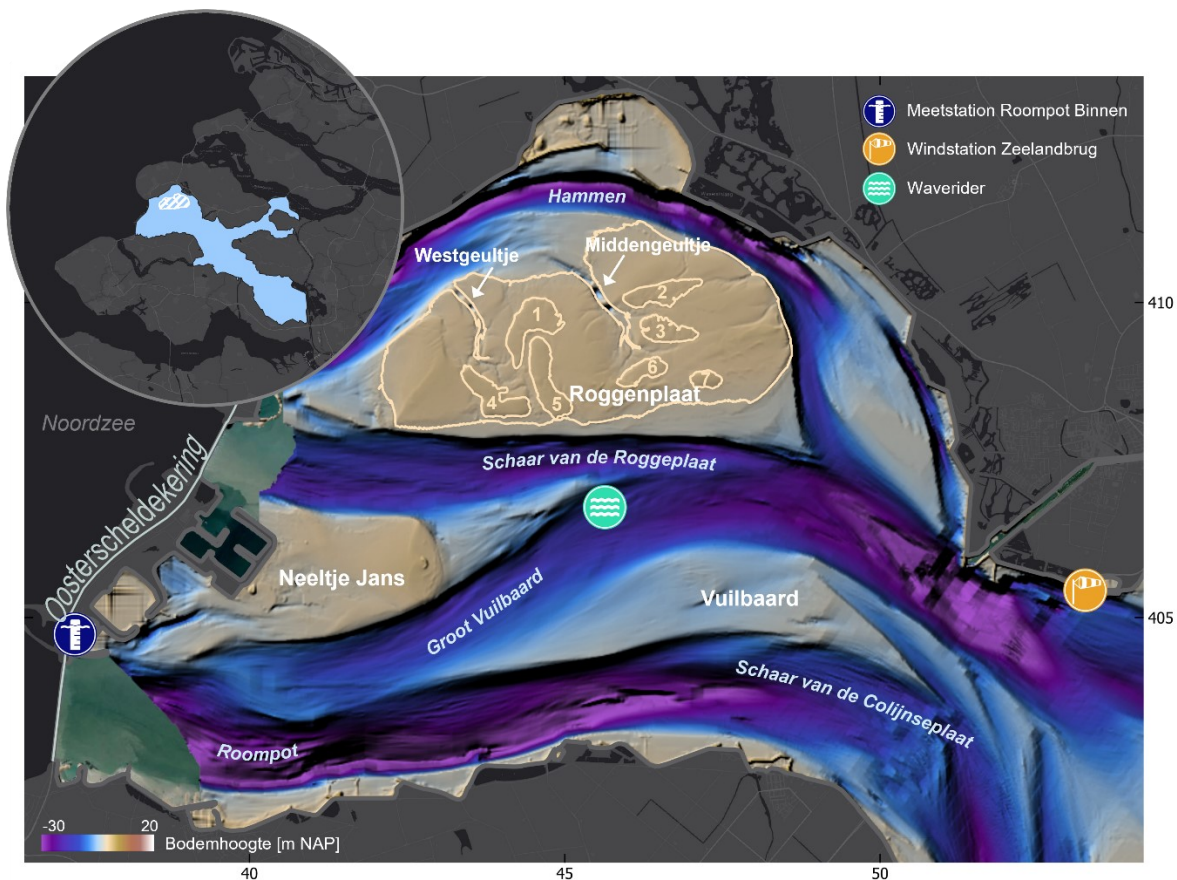
Het primaire doel van de Roggenplaatsuppletie is het behoud van de foerageerfunctie van het Roggenplaat/Neeltje Jans-complex voor 25 jaar ten opzichte van het referentiejaar 2010. In de ontwerpfase (Van der Werf et al., 2016b) is deze doelstelling geconcretiseerd tot het behoud van het areaal met een droogvalduur van 50-80%. In hoeverre de suppletie hierin slaagt wordt – voor zover met de beschikbare data mogelijk is – beoordeeld aan de hand van de evaluatievragen (paragrafen B1.5 en B1.6). Weten hoe en wanneer het sediment over de suppleties en plaat beweegt, is ook relevant in dit kader (kennisvragen 1 en 2; paragrafen B1.7.1 en B1.7.2). Daarnaast is, zoals ook benadrukt in de ontwerpstudie (Van der Werf et al., 2016b), ook de kwaliteit van het areaal sturend in de mate van ecologisch herstel. Hierin speelt de bodemsamenstelling (korrelgrootte) een belangrijke factor (kennisvraag 3; paragraaf B1.7.3).

Niet het primaire doel, maar wel relevant voor het succes van het suppletieproject, is weten of de suppletie de hydro-morfologie van de Roggenplaat heeft veranderd. Succes in dit verband betekent dat de suppletie netto heeft bijgedragen aan de uitbreiding in de droogvalduur van de plaat zonder ongewenste hydro-morfologische neveneffecten. Hiertoe zijn de veranderingen in de morfologie (kennisvraag 4; paragraaf B1.7.4) en stroming (kennisvraag 5; paragraaf B1.7.5) van de plaat en het Middengeultje beschouwd. Aanvullend is ook beoordeeld of de wilde oesterriffen op de plaat een invloed hebben op de ontwikkeling van de suppleties (kennisvraag 6; paragraaf B1.7.6). Dit zodat hier in toekomstige suppletieontwerpen op kan worden geanticipeerd.

B1.2 Methodologie

B1.2.1. Studiegebied

De Roggenplaat is het grootste intergetijdengebied in de Oosterschelde (*Figuur B1-8*). Het is één van de kerngebieden wat betreft vogelgebruik en staat bovenaan op de prioriteitenlijst voor de in stand te houden kerngebieden (De Ronde et al., 2013). In het najaar van 2019 heeft Rijkswaterstaat de Roggenplaat (1440 ha) met ruim 1,13 miljoen m³ zand (in-situ volume) gesuppleerd, verdeeld over zeven suppletie-elementen, om ervoor te zorgen dat deze zandplaat zijn foerageerfunctie voor vogels en rustplek voor zeehonden behoudt. De suppletie-elementen bedekken samen 211 hectare van de plaat en hebben een gemiddelde initiële dikte per suppletie-element van 27-79 cm. De suppletie-elementen verschillen in hoogte en dikte. Gestreefd is vooral het areaal 50-80% droogvalduur met deze suppletie-elementen te doen toenemen (Van der Werf et al., 2016b), aangezien vooral deze hoogteligging waardevolle toevoeging van het foerageergebied levert. Deze suppletie is uniek in zijn omvang, vormgeving en ligging. Niet eerder is er in Nederland, voor het behoud van ecologische waarden, een dermate grote hoeveelheid sediment direct op een intergetijdengebied gesuppleerd.



Figuur B1-8. Overzichtsfiguur van de Roggenplaat en omgeving op basis van de 2021 Vaklodingen (eerste gebiedsdekkende opname na suppleren). De laagwatercontour (-1.2 m NAP) van de Roggenplaat is weergegeven, evenals de contouren van de zeven suppletie-elementen (geel-beige lijnen). De locatie van het waterstandsstation Roompot Binnen, het windmeetstation Zeelandbrug en de golfmeetlocatie Waverider zijn weergegeven. De namen van geulen en platen zijn aangegeven.

B1.2.2. Een overzicht van de uitgevoerde metingen en activiteiten

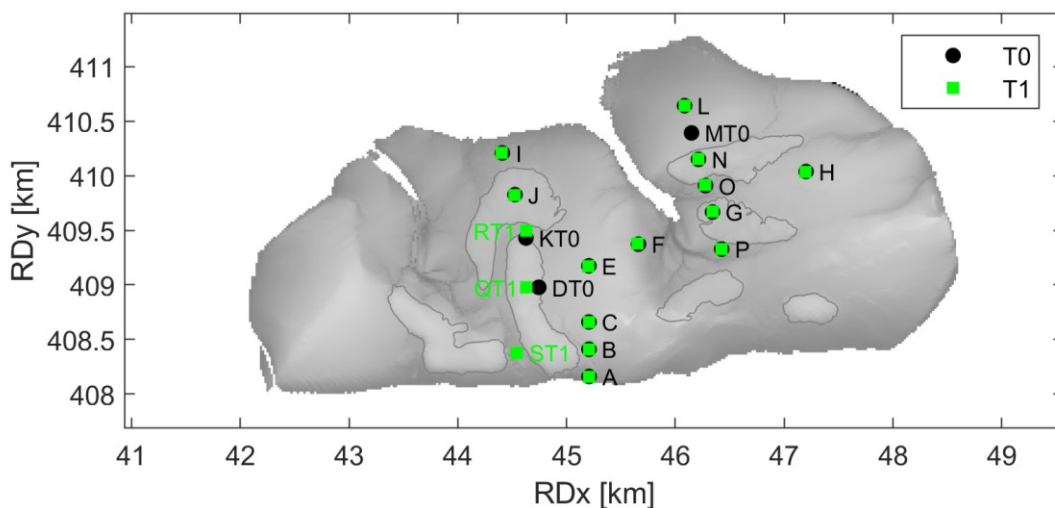
De monitoringsactiviteiten staan beschreven in de monitoringsplannen (Ysebaert et al. 2016, Wijsman & Kraan 2017). De monitoring maakt gebruik van lopende Oosterschelde-brede monitoring (o.a. de Rijkswaterstaat Vaklodingen), maar bestaat grotendeels uit nieuwe, project-specifieke monitoring. In Tabel B1-1 staat aangegeven welke project-specifieke morfologische metingen zijn uitgevoerd vóór (T0; januari 2015 t/m september 2019), tijdens (oktober t/m december 2019) en één (T1; 2020), twee (T2; 2021), drie (T3; 2022), vier (T4; 2023) en vijf (T5; 2024) jaar na aanleg van de suppleties. Nadere details over deze metingen zijn opgenomen in de volgende paragrafen.

Tabel B1-1. Monitoringsactiviteiten tussen januari 2015 en december 2024 (voor, tijdens en na aanleg van de suppletie). Per onderdeel staat aangegeven wanneer welke metingen uitgevoerd zijn. * is bemonsterd maar niet verwerkt. De RTK metingen zijn verspreid over verschillende meetdagen die soms in twee opvolgende maanden vallen. Ten behoeve van de overzichtelijkheid is in die gevallen maar één maand gemarkeerd. Met de RTK metingen zijn ook de zakbaken ingemeten. De LiDAR opname uit 2016 voldeed niet aan de kwaliteitseisen en is daarom buiten beschouwing gelaten.

Hydromorfologische metingen		T0																																			
		2015												2016																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12												
op de plaat	stroommetingen																																				
	golfmetingen																																				
	sed sensoren																																				
	LiDAR																																				
	zakbaken																																				
Middengeultje	RTK																																				
	sedimentsamenstelling																																				
Westgeultje	multibeam																																				
	stroommetingen																																				
Waverider	multibeam																																				
	golfmetingen																																				
		T0																																			
		2017												2018																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12												
op de plaat	stroommetingen																																				
	golfmetingen																																				
	sed sensoren																																				
	LiDAR																																				
	zakbaken																																				
Middengeultje	RTK																																				
	sedimentsamenstelling																					*															
Westgeultje	multibeam																																				
	stroommetingen																																				
Waverider	multibeam																																				
	golfmetingen																																				
		T0												Tijdens												T1											
		2019												2019												2020											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
op de plaat	stroommetingen																																				
	golfmetingen																																				
	sed sensoren																																				
	LiDAR																																				
	zakbaken																																				
Middengeultje	RTK																																				
	sedimentsamenstelling																																				
Westgeultje	multibeam																																				
	stroommetingen																																				
Waverider	multibeam																																				
	golfmetingen																																				
		T2												T3																							
		2021												2022																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12												
op de plaat	stroommetingen																																				
	golfmetingen																																				
	sed sensoren																																				
	LiDAR																																				
	zakbaken																																				
Middengeultje	RTK																																				
	sedimentsamenstelling																																				
Westgeultje	multibeam																																				
	stroommetingen																																				
Waverider	multibeam																																				
	golfmetingen																																				
		T4												T5																							
		2023												2024																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12												
op de plaat	stroommetingen																																				
	golfmetingen																																				
	sed sensoren																																				
	LiDAR																																				
	zakbaken																																				
Middengeultje	RTK																																				
	sedimentsamenstelling																																				
Westgeultje	multibeam																																				
	stroommetingen																																				
Waverider	multibeam																																				
	golfmetingen																																				

Hydro-morfologische metingen op de plaat

Om te observeren hoe de suppletie-elementen de stroming op de plaat beïnvloeden, zijn op 16 meetpunten verspreid over de Roggenplaat **stroommetingen** uitgevoerd (Figuur B1-9). De stroommetingen zijn gedaan met behulp van Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs). De metingen zijn uitgevoerd tussen 24 februari en 25 maart 2015 (T0 metingen) en 16 maart en 13 april 2021 (T1 metingen). Als een meetpunt alleen in T0 of alleen in T1 is gemeten of als een meetpunt verschoven is tussen T0 en T1 is in de naamgeving van het meetpunt aangegeven op welke meting (T0 dan wel T1) deze meetlocatie betrekking heeft. Meetpunt M is alleen in T0 en meetpunt S is alleen in T1 gemeten. Meetpunt K in T0 is in T1 (daar hernoemd naar meetpunt R) iets verschoven zodat deze tussen suppleties 1 en 5 in lag. Meetpunt D in T0 is in T1 (daar hernoemd naar meetpunt Q) iets verschoven zodat deze boven op suppletie 4 lag. Dit omdat tijdens de T0 meting de precieze locatie van de suppleties nog niet bekend was.



Figuur B1-9. Locatie van de ADCPs op de plaat (T0 = 2015; T1 = 2021). Meetpunten die identiek waren in T0 en T1 hebben geen toevoeging, voor afwijkende meetpunten is aangegeven of deze in T0 of in T1 gemeten zijn.

Naast stroommetingen zijn er vanaf november 2019 continue **golfmetingen** uitgevoerd op de Roggenplaat. Deze metingen zijn uitgevoerd met druksensoren (OSS1 waveloggers) en met sommige van de SED-sensoren (ingebouwde sensor, voor zover de registratie van de waterdruk aanstond). De locatie van deze sensoren is aangegeven in Figuur B1-10. Deze metingen zijn benut voor de afstelling van het Delft3D model (kalibratie van de golfdissipatie over de plaat).

Op een aantal locaties op de Roggenplaat zijn **SED-sensoren** geplaatst na aanleg van de suppleties (Figuur B1-10). SED-sensoren (Surface Elevation Dynamics sensoren) meten continu veranderingen in bodemhoogte en kunnen inzicht verschaffen onder welke (weers)omstandigheden veranderingen optreden (Hu et al., 2015a). Inmiddels bestaan er 2 versies van deze SED-sensoren: Optische en Akoestische. De Optische sensoren (eerste meetprincipe) meten alleen wanneer deze droog staan en hebben om de 2 mm een sensor die de lichtinval meet. Met een meetinterval van 30 minuten wordt een zeer gedetailleerde verandering van de bodemhoogte gemeten. De akoestische sensoren (verbeterd instrument) meten alleen onder water en geven een akoestische puls die weer door de sensor wordt opgevangen. Hierdoor wordt er nog nauwkeuriger gemeten, mede omdat de bodemontwikkeling niet beïnvloed wordt door het instrument op de meetlocatie (deze akoestische sensoren staan met twee paaltjes in de grond en meten tussen deze paaltjes). Omdat deze onder water meten, vindt de meting plaats wanneer er daadwerkelijke verandering van bodemhoogte optreedt. Dit met uitzondering van eolisch transport, al zijn er geen aanwijzingen dat dit op de Roggenplaat optreedt (op de Oesterdam was eolisch transport waargenomen maar alleen voor de delen van de dijkvoetsuppletie nabij de gemiddeld hoogwaterlijn, waarna deze met bulldozers was verlaagd; Boersema et al., 2018).

Legend

- A-SED
- SED
- Wavelogger
- ◆ Benthos locations
- Roggenplaat2019QS
- RTK transects
- Priming_Plots
- Suppletion_Plots
- Reference_Plots
- CocklePrimed_Plots
- Suppletions
- Aquaculture

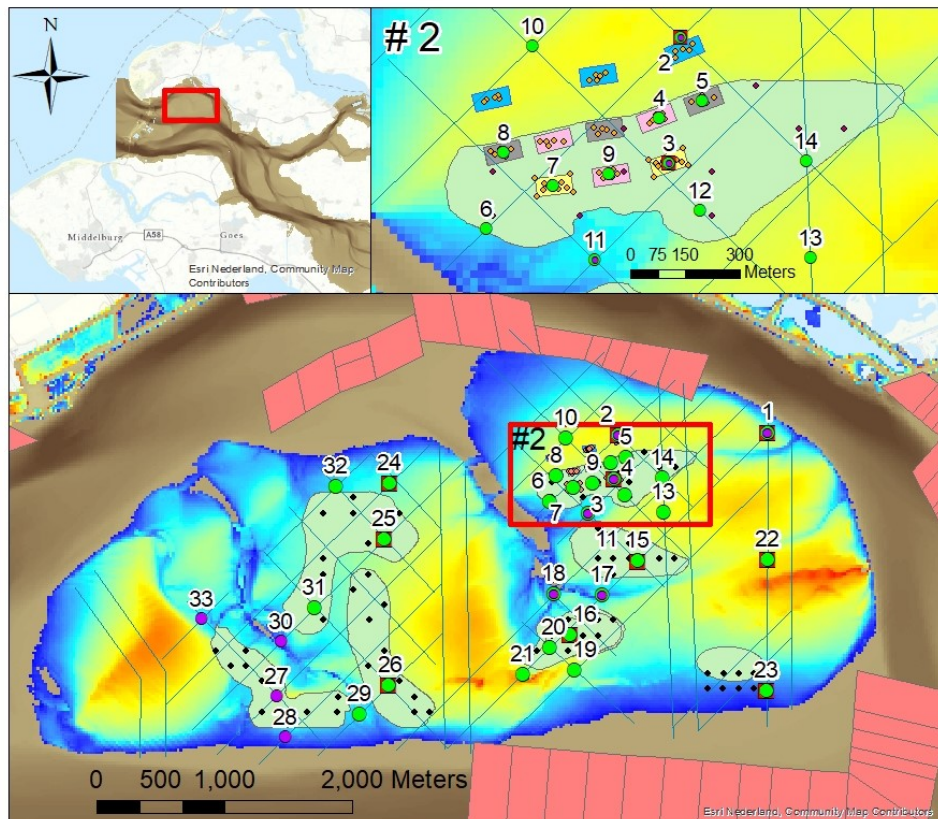
Oosterschelde

cm NAP

- High : 125
Low : -125



Jeroen van Dalen
2019-11-14

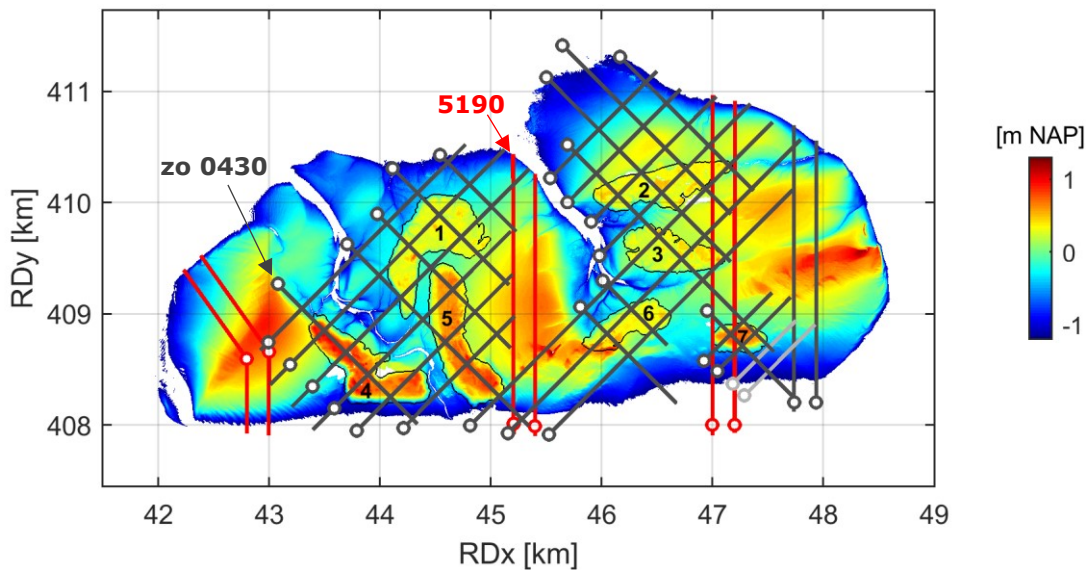


Figuur B1-10. Locatie van SED sensoren, akoestische SED sensoren (A-SED) en waloggers op de Roggenplaat. Op de inzet van suppletie 2 (rechtsboven) zijn de verschillende plots met een kleur aangegeven: Grijs = geprimed met toplaag omgevings sediment, Roze = 'kale' suppletie, Blauw = Referentie/onverstoord gebied en Geel = 'kale' suppletie geprimed met individuele kokkels. Daarnaast zijn ter referentie de suppletie-locaties waar benthos monsters (inclusief sedimentsamenstelling) zijn genomen en waar veldscreening (QS) is uitgevoerd weergegeven.

Hoogtekaarten zijn verkregen middels laseraltimetrie (**LiDAR**). Dit is een meting van de afstand tussen een vliegtuig en het grondoppervlak waarmee, in combinatie met de plaatsbepaling van het vliegtuig, de hoogte van het grondoppervlak kan worden gemeten. De hoogtekaarten verkregen middels laseraltimetrie geven de hoogte weer ten opzichte van NAP op een 2 m bij 2 m rooster met een verticale nauwkeurigheid van ± 10 cm van individuele meetpunten en een gemiddelde afwijking (bias) van maximaal 5 cm (Wiegmann et al., 2005). Er zijn hoogtekaarten verkregen in 2016, 2018, 2019, 2020 (tweemaal), 2021, 2022, 2023 en 2024. De hoogtekaart uit 2016 voldoet niet aan de kwaliteitseisen en wordt hier buiten beschouwing gelaten (zie ook Walles et al., 2021a). In de LiDAR-metingen van oktober 2020 ontbreekt een substantieel deel van de Roggenplaat (o.a. rond de noordelijke punt van de plaat). De dekking van de zeven suppletie-elementen is wel bijna volledig in deze LiDAR opname. In de berekening van de areaal- en volumeontwikkelingen zijn gaten in de LiDAR data met interpolatie opgevuld ten behoeve van robuuste analyses. Omdat de meetfouten van de LiDAR dermate groot zijn dat deze een nauwkeurige analyse van de morfologische veranderingen (van de suppleties) in de weg staan, zijn deze meetfouten gedeeltelijke gecorrigeerd aan de hand van de nauwkeurigere RTK raaien (correctiemethode wordt toegelicht in paragraaf B1.2.3). Bij de berekening van de bodemhellingkaarten (*Figuur B1-44*) is de LiDAR data eerst gefilterd met een laagdoorlaatfilter (Gaussian) met een standaarddeviatie van 200 pixels en een radius van 5 pixels. Hierdoor is ruis in de bathymetriedata (door meetfouten en lokale bodemvormen) verminderd. Dit komt neer op enige afvlakking van de bodemkaart, zodat de berekende bodemhellingen representatiever zijn voor de grootschalige morfologische structuren en minder beïnvloed worden door lokale ruis of kleine bodemvormen.

RTK (Real Time Kinematic - dGPS) metingen worden uitgevoerd in het kader van de RWS lange termijn monitoring van de slikken en platen van de Oosterschelde. Fouten in het GPS signaal worden met dit instrument gecorrigeerd met een correctie verkregen van een nabije referentieontvanger met een bekende (constante) positie, zodat een nauwkeurigheid van 2 cm kan worden behaald (Wiegmann et al., 2005). RTK metingen vinden plaats wanneer de plaat is drooggefallen en worden lopend uitgevoerd door langs een raai op vastgestelde afstanden de hoogte te meten. Op de Roggenplaat liggen zes reguliere raaien (waarvan de

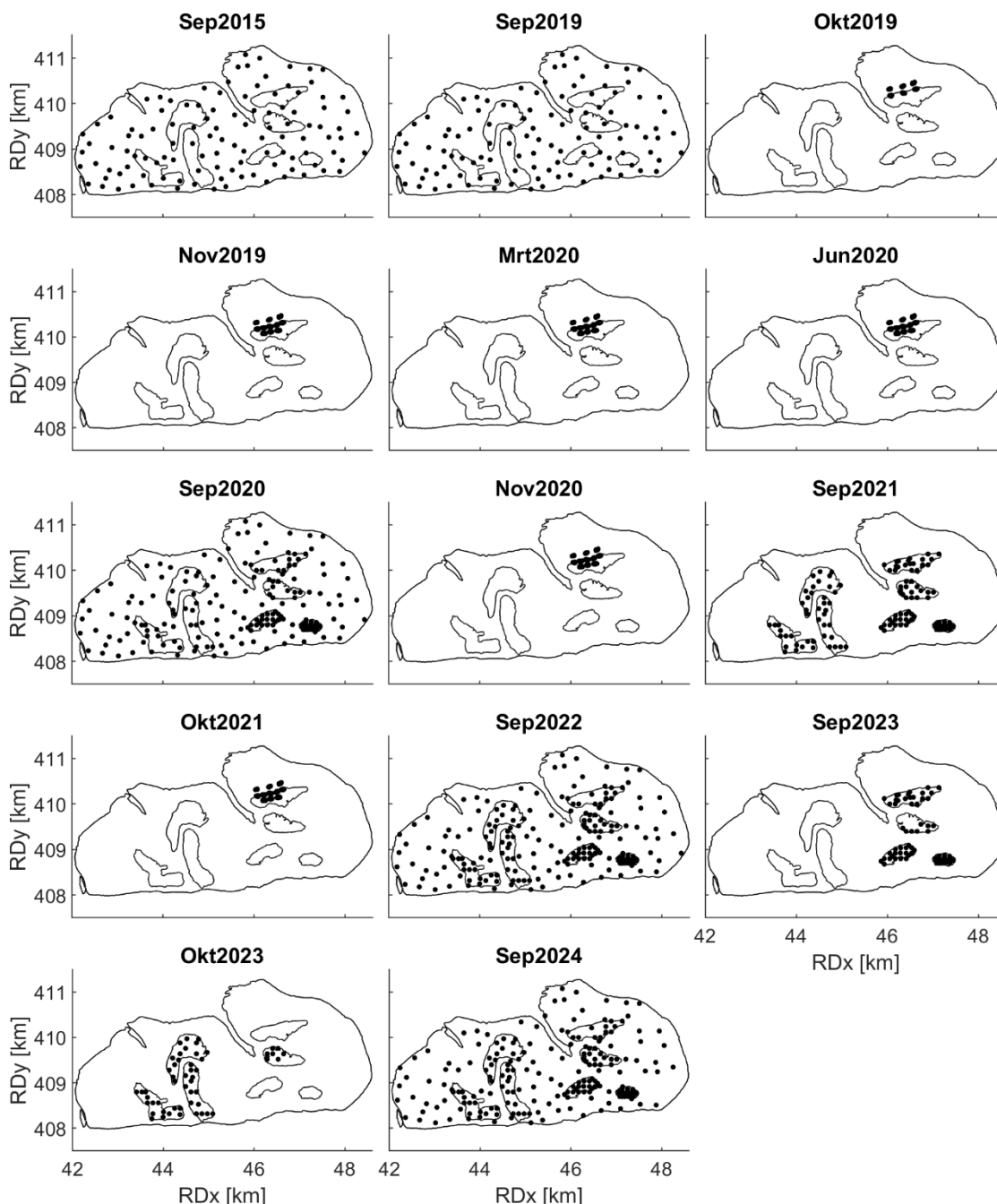
twee meest westelijke geknikte raaien formeel elk uit twee losse raaien bestaan) die jaarlijks eenmaal (in de periode april – september) opgemeten worden sinds 1988. In het kader van de Roggenplaatsuppletie zijn aanvullend 31 RTK raaien uitgezet die sinds 2018 vier keer per jaar gemeten worden (*Figuur B1-11*). Deze data geven inzicht in locaties waar erosie en sedimentatie optreden en hoe het sediment zich verplaatst over de Roggenplaat.



Figuur B1-11. Reguliere RTK raaien (rood) en aanvullende RTK raaien (donkergrijs) op de Roggenplaat. De cirkels geven het nulpunt van elke raai aan. De twee lichtgrijze raaien in het zuidoosten zijn wel in de T0 periode (mei en september 2019) gemeten, maar niet meer na suppleren (aangezien de suppletie buiten deze raaien is gerealiseerd). Op de achtergrond zijn de LiDAR data van februari 2020 weergegeven (boven laagwater). De contouren en de nummering van de suppletie-elementen is aangegeven.

Om zetting van de grond onder de suppleties te kunnen monitoren, heeft Boskalis bij de uitvoering **zakbaken** aangelegd onder de suppleties. Dit zijn platen van 1 x 1 m met een paal die boven de suppleties uitreikt. Omdat resterende zettingen na voltooiing van de suppletie relevant zijn in het kader van het verklaren van morfologische ontwikkelingen, zijn de zakbaken ook in de periode 2020-2024 nog opgevolgd. 32 zakbaken konden in het veld nog worden teruggevonden na de realisatiefase en deze zijn sindsdien met de meting van de RTK raaien ingemeten (middels een aanvullende, lokale RTK-dGPS meting). Opgemerkt wordt dat de kwaliteit van de hoogtebepaling met de zakbaken beperkt is, omdat diverse zakbaken scheefstand vertonen (beïnvloedt hoogtemeting) en een dergelijke langdurige monitoringscampagne niet beoogd was bij de positionering van deze zakbaken. De zakbaken geven geen informatie over het mogelijk compacter worden van het sediment in de suppleties over de tijd. De zakbaken zijn immers onder de suppleties gepositioneerd.

Sedimentsamenstelling is een van de bepalende factoren voor bodemfauna en dus ook voor de foerageerfunctie voor kust- en strandvogels. Sedimentsamenstelling en het slibgehalte is steeds tezamen met de benthos bemonsterd in september 2015 (113 locaties), september 2019 (113 locaties), oktober 2019 (30 locaties), november 2019 (61 locaties), maart 2020 (61 locaties), juni 2020 (61 locaties), september 2020 (185 locaties), november 2020 (61 locaties), september 2021 (120 locaties), oktober 2021 (61 locaties), september 2022 (209 locaties), september/oktober 2023 (120 locaties), september 2024 (209 locaties), zie *Figuur B1-12*. Bemonstering heeft ook plaatsgevonden in september 2018, maar die metingen zijn niet verwerkt (sedimentmonsters zijn veilig gesteld, maar er was geen reden om deze te verwerken). De bemonstering is uitgevoerd door het NIOZ wanneer alleen bij suppletie 2 is bemonsterd, de andere bemonsteringen zijn door Wageningen Marine Research uitgevoerd. Met een spuit (3 cm Ø) is een vast volume van de bovenste 3 cm van het sediment bemonsterd. Direct bij terugkomst in het lab zijn de monsters in een diepvries (-20 °C) geplaatst. Vervolgens zijn ze gevriesdroogd en is de korrelgrootteverdeling geanalyseerd met behulp van laserdiffractie (Malvern Particle Analyzer P2000). Hieruit is de mediane korrelgrootte verkregen (D50) en de verdeling grof zand, middel fijn zand, fijn zand, zeer fijn zand en slib bepaald. De slibfractie betreft de fractie < 63 µm.

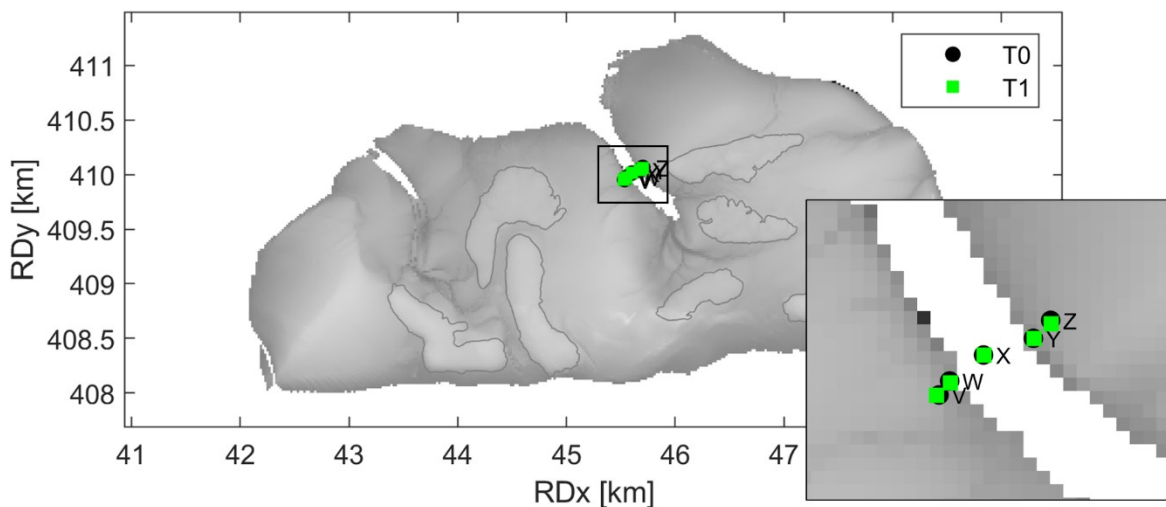


Figuur B1-12. Meetlocaties sedimentsamenstelling. De zwarte contourlijnen geven de laagwaterlijn van de Roggenplaat en de suppletiecontouren weer.

Hydro-morfologische metingen in het Middengeultje

Op de Roggenplaat zijn twee grote afwateringsgeulen aanwezig (Middengeultje en Westgeultje, *Figuur B1-8*). Deze geulen zijn onderdeel van de morfologie van de Roggenplaat en beïnvloeden de stroming op de plaat. Beide geulen zijn voor dit project met **Multibeam** ingemeten in mei 2015. Voor het Middengeultje zijn de metingen in april en december 2019 herhaald. In 2021 en 2022 zijn de metingen elk kwartaal uitgevoerd. In 2023 zijn er drie metingen gedaan (geen najaarsmeting). In 2024 zijn de metingen in maart en juni uitgevoerd. Sinds 2021 is het meetdomein uitgebreid met het gebied direct voor de uitstroomopening van het Middengeultje. De metingen zijn beschikbaar op een 1 m bij 1 m rooster, hebben een verticale nauwkeurigheid van ± 5 cm tot enkele meters diepte (Wiegmann et al., 2005) en zijn daarmee geschikt om te bepalen of het Middengeultje migreert en/of in omvang verandert. Voor het Westgeultje is de meting na suppleren eenmaal uitgevoerd (juni 2024).

Om te observeren hoe de suppletie-elementen de stroming in het Middengeultje beïnvloeden, zijn op 5 meetpunten in de geul **stroommetingen** uitgevoerd (*Figuur B1-13*). De metingen zijn gedaan met behulp van Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs). Voor het middelste meetpunt is een meetframe ingezet dat vanuit een schip is gepositioneerd. De metingen zijn zowel in de T0 situatie (2017) als in de T1 situatie (2021) voor één maand uitgevoerd.



Figuur B1-13. Locatie van de ADCPs in het Middengeultje (T0 = 2017; T1 = 2021).

System-brede wind-, golf- en waterstandsmetingen

Wind- golf- en waterstandsmetingen zijn over de gehele monitoringsperioden (vóór en na suppleren) gemeten op vaste stations. Golfkarakteristieken zijn gemeten door de **Waverider** die gepositioneerd is aan de zuidrand van de Roggenplaat (*Figuur B1-8*). Hiervoor is de Waverider Schelphoek in 2015 verplaatst naar de zuidrand van de Roggenplaat. **Waterstanden** zijn elke 10 minuten gemeten op de reguliere waterstandsstations Roompot Binnen (binnenzijde Oosterscheldekering, zie *Figuur B1-8*) en Buiten (zeezijde Oosterscheldekering), waarvoor ook astronomische waterstanden beschikbaar zijn. De **windkarakteristieken** (snelheid en richting) zijn gemeten door station Zeelandbrug, zie *Figuur B1-8*.

B1.2.3. LiDAR correctie op basis van RTK raaien

De LiDAR opnamen bevatten opname-specifieke meetfouten die dermate groot kunnen zijn dat deze precieze analyses van volumeveranderingen in de weg staan. Omdat de gemiddelde afwijking (bias) van een LiDAR opname tot wel 5 cm kan bedragen (Wiegmann et al., 2005), kan deze afwijking de morfologische ontwikkelingen overstijgen. Voor de suppleties kan dit zelfs betekenen dat metingen volumetoename aangeven, terwijl de suppleties in werkelijkheid eroderen. Ter indicatie, elke centimeter (absolute) afwijking leidt bij een areaal van 211 ha (het gesuppleerde areaal) tot een meetfout van 21.100 m³ (2% van het totale gesuppleerde volume). Er was bij het ontwerp van de monitoring al geanticipeerd op meetfouten; dit was namelijk één van de motivaties voor de uitgebreide RTK metingen. De RTK metingen zijn nauwkeuriger (± 2 cm), hebben een hogere resolutie in de tijd en de RTK biedt de mogelijkheid om de LiDAR data te corrigeren.

De LiDAR data zijn dus gevalideerd en gecorrigeerd met behulp van de RTK metingen ten bate van robuuste morfologische analyses. Hiertoe is de verandering in bodemhoogte gemeten met LiDAR vergeleken met de metingen langs de RTK raaien. Echter, waar de LiDAR data gebiedsdekkend zijn, dekken de RTK raaien maar een deel van de Roggenplaat. Bovendien hebben de opnamen een ander meetmoment in de tijd. Om de twee tijdseries te kunnen vergelijken, zijn de RTK raaien opgedeeld in segmenten van 50 m (constant in de tijd). De afstand van 50 m is groot genoeg om voldoende raaimetingen te bevatten (er is gemiddeld genomen in de Roggenplaatdataset elke 10,3 m een RTK meting uitgevoerd) en klein genoeg opdat er relatief gezien weinig segmenten op de suppletie-plaat overgangen liggen (hoe meer segmenten, hoe groter de kans dat deze óf op de suppletie óf in de niet-gesuppleerde delen liggen). Binnen elk segment is de gemiddelde bodemligging bepaald. Vervolgens is ook de gemiddelde bodemligging binnen hetzelfde segment op basis

van de LiDAR data bepaald. Wat het verschil in meetmomenten tussen de LiDAR en RTK betreft, is er gewerkt met lineaire interpolatie van de RTK data in de tijd, zodat de schatting van de afwijking tussen beide datasets zo precies als mogelijk is.

Er is gewerkt met twee type correcties: een plaat-brede correctie en een nauwkeurigere, suppletie-specifieke correctie. De RTK dekking is namelijk het hoogst op de suppleties. Daarom is gekozen om voor maximale nauwkeurigheid te gaan als de ontwikkeling van individuele suppletie-elementen wordt beschouwd. Voor alle andere analyses die niet suppletie-specifiek zijn, is een plaat-brede correctie toegepast. *Tabel B1-2* laat zien welke correctie voor welke evaluatie- en kennisvraag is gebruikt (zie paragraaf B1.1.2 voor de onderzoeksvragen).

Voor de plaat-brede correctie is gewerkt met het gemiddelde verschil in gemiddelde bodemligging (=meetfout) tussen de LiDAR en RTK data in de gebieden buiten de suppleties. In principe had hier ook het verschil voor de gehele plaat genomen kunnen worden (inclusief suppleties), maar de suppleties ondergaan ook nog een suppletie-specifieke correctie (zie volgende alinea). De plaat-brede LiDAR data (buiten én binnen de suppleties) zijn met behulp van deze waarde gecorrigeerd. De plaat-brede meetfout en daarmee correctie was beperkt tot maximaal 2,6 cm (*Tabel B1-3*). Het is opvallend dat de plaat-brede meetfouten in het geval van de 2018-2024 opnamen allemaal positief zijn. Dit suggereert dat plaatgemiddeld al deze LiDAR opnamen te hoog liggen (wat overigens niet opgaat voor alle suppletie-specifieke afwijkingen; *Tabel B1-3*). Dit kan het gevolg zijn van verschillen in hoe de bodemligging is gedefinieerd tussen de LiDAR en RTK methoden. Bijvoorbeeld, als de RTK-metstok gemiddeld genomen enigszins in de grond is gedrukt, ligt de LiDAR data relatief gezien hoger. Ook beïnvloedt het LiDAR opwerkingsalgoritme de gemiddelde hoogte (bijvoorbeeld hoe deze omgaat met lokale hoogtevariëaties zoals zandribbels). Implicaties hiervan zijn beperkt omdat de correctie-methodiek consistent is toegepast en dit project relatieve morfologische veranderingen beschouwt.

Voor de aanvullende suppletie-specifieke correctie is de plaat-breed gecorrigeerde LiDAR data als uitgangspunt genomen. Vervolgens is het dan nog resulterende verschil in gemiddelde bodemligging (=meetfout) tussen de LiDAR en RTK data binnen de suppletiecontouren bepaald. De LiDAR data binnen de suppletiecontouren zijn met behulp van deze waarde gecorrigeerd. Uitzondering hierop is de eerste LiDAR opname (februari 2020). De RTK meting vóór deze LiDAR opname was nog vóór suppleren en in de eerste RTK meting na deze LiDAR opname waren de suppleties al substantieel ontwikkeld (paragraaf B1.7.1). De LiDAR opname van februari 2020 is daarom gecorrigeerd met het verschil in gemiddelde bodemligging (=meetfout) tussen de LiDAR en RTK data binnen een band van 50 tot 100 m rondom de suppleties. De gedachte hierachter is dat deze zone dicht genoeg bij de suppleties ligt om representatief te zijn voor de suppleties, maar ver genoeg van de suppleties verwijderd is om vrij te zijn van initiële invloeden van de suppleties. De grootte van de aanvullende suppletie-specifieke correctie is maximaal -5,2 cm (suppletie-element 3) in de 2024 opname (*Tabel B1-3*). De grootte van de netto correctie (plaat-breed en suppletie-specifiek tezamen) is maximaal 6,2 cm (suppletie-element 7) in de 2024 opname (*Tabel B1-3*). De LiDAR opname van 2024 was relatief onnauwkeurig maar kon dankzij deze correctie-methode toch nog voldoen aan de doeleinden van dit project.

Tabel B1-2. Overzicht van welke LiDAR-correctie (suppletie-specifiek of plaat-breed) is gebruikt voor welke evaluatie- of kennisvraag. Indien n.v.t., is er geen LiDAR data gebruikt voor de vraag. Zie paragraaf B1.1.2 voor de onderzoeksvragen.

Type correctie	Evaluatievraag			Kennisvraag					
	1	2	1	2	3	4	5	6	
Suppletie-specifiek			n.v.t.		n.v.t.		n.v.t.		
Plaat-breed			n.v.t.		n.v.t.		n.v.t.		

Tabel B1-3. Overzicht van de suppletie-specifieke en plaat-brede meetfouten [cm] per LiDAR opname op basis van de RTK data. Een positief getal betekent een overschatting van de LiDAR bodemligging en een negatief getal een onderschatting. In de correctie zijn deze meetfouten dus van de LiDAR opnamen afgehaald. De suppletie-specifieke correctie is uitgevoerd bovenop de plaat-brede correctie. Bijvoorbeeld, voor suppletie 1 betekent dit dat voor februari 2022 de ruwe LiDAR metingen netto met 1,6 cm zijn gecorrigeerd (de plaat-brede correctie was voor deze suppletie in dit geval te groot).

	14-mrt-2018	1-apr-2019	7-feb-2020	31-okt-2020	1-apr-2021	26-feb-2022	3-apr-2023	25-jun-2024
Suppletie-specifiek								
1			-0,1	0,6	-0,7	-1,0	-1,0	-3,4
2			-2,2	-1,2	-1,5	1,0	0,7	-0,1
3			0,6	-1,0	-1,3	-0,1	-0,2	-5,2
4			0,4	-1,1	1,1	-0,7	-0,2	0,6
5			1,1	-1,0	0,5	-1,1	0,9	-0,4
6			0,6	-2,1	0,0	0,7	1,4	-3,6
7			0,8	-1,5	-0,5	-0,3	-0,9	3,6
Plaat-breed	2,4	0,5	2,2	1,5	0,1	2,6	0,3	2,6

B1.2.4. Afbakening suppletie-elementen

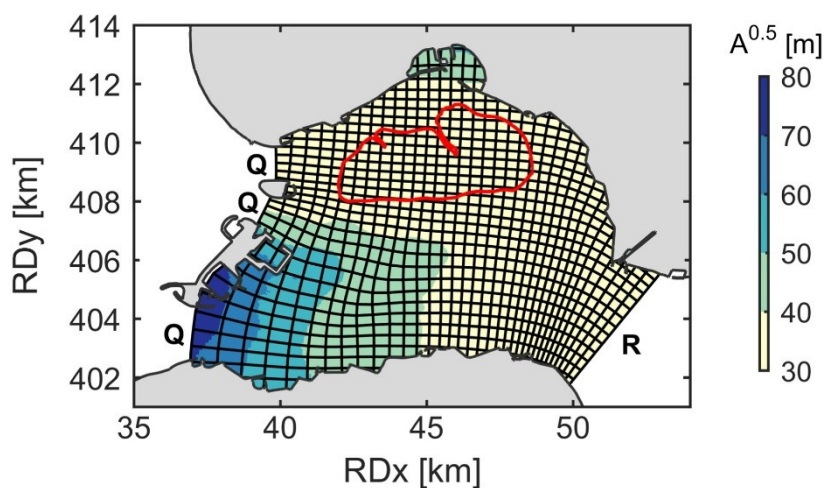
Voor een robuuste bepaling van de ontwikkeling van de suppletie-elementen is een precieze definitie van de initiële contouren van de elementen essentieel. De initiële contouren (constant in de tijd) zijn in deze studie op de volgende manier vastgesteld. Contourlijnen zijn getrokken rondom de suppletie-elementen waarvoor de toename in bodemhoogte tussen april 2019 (voor aanleg) en februari 2020 (na aanleg) meer dan 20 cm betrof (overschrijdt ruim de meetonnauwkeurigheden). De priming vakken op suppletie-element 2 zijn ook bij de contouren betrokken, ondanks dat de toename in bodemhoogte hier lokaal minder dan 20 cm was. Vervolgens zijn deze contourlijnen met 10 m – de horizontale afstand corresponderend bij 20 cm hoogteverschil bij een helling van 1 op 50 (beoogde aanleghelling) – naar buiten toe uitgebreid. Dit geeft een goede benadering van de initiële contouren van de voet van de suppleties die niet gedomineerd wordt door meetfouten in de LiDAR data of beïnvloed wordt door centimeters aan autonome ontwikkeling tussen de twee hoogteopnamen.

B1.2.5. Hydrodynamische modellering

In de ontwerpfase is een **Delft3D model** opgezet om de invloed van verschillende suppletieontwerpen op de hydro-morfologie te kunnen bepalen (Van der Werf et al., 2016a). Het domein van dit model is in *Figuur B1-14* weergegeven. In deze monitoringstudie is het model opnieuw ingezet om ruimtelijke veranderingen in stroomsnelheden door de suppletie af te schatten. Dit ter ondersteuning van de stroomsnelheidsmetingen die een beperkte ruimtelijke dekking hebben. Daarnaast zijn met het model de bodemschuifspanningen door golven berekend – als zijnde het verschil in bodemschuifspanning tussen een simulatie met en een simulatie zonder golven – zodat de ruimtelijke variatie van de golfforcering kan worden beoordeeld op de Roggenplaat en de suppletie in het bijzonder. Dit is relevante informatie bij het verklaren van de ruimtelijke variaties van de gemeten bodemveranderingen.

Het model is gedraaid met de 2019 bodemligging (vóór suppleren) en de 2020 bodemligging (na suppleren). Wat betreft de Vaklodingen – benut voor het gehele domein (behalve de Roggenplaat waarvoor LiDAR data beschikbaar waren en het Westgeultje en het Middengeultje waarvoor Multibeam data waren) – was alleen data beschikbaar van 2019, die zijn dus ook gebruikt in de 2020 simulatie. Beide simulaties zijn uitgevoerd met de hydrodynamische randvoorwaarden van 15 januari tot 14 februari 2015 (twee spring-doodtij cycli die representatief zijn qua waterstanden). Op deze manier zijn verschillen in stroomsnelheden en golven tussen beide simulaties alleen het gevolg van verschillen in bodemligging (aanwezigheid/afwezigheid suppleties). De bodemschuifspanningen door golven zijn berekend voor golven geforceerd met een wind van 10 m/s (wordt in dit gebied 1/8^e van de tijd overschreden) vanuit het ZZW (dominante windrichting). Dit zodat de bodemschuifspanningen qua patronen representatief zijn voor relatief vaak voorkomende windomstandigheden. Omdat de ruimtelijke patronen van de bodemschuifspanningen zijn beschouwd

(Bijlage B1.7.1) en niet de precieze getalwaarden, voldoet het gebruik van deze constante windsnelheid voor de doeleinden van deze studie. Voor een verdere beschrijving en validatie van het model wordt verwezen naar Van der Werf et al. (2016b) en De Vet et al. (2018).

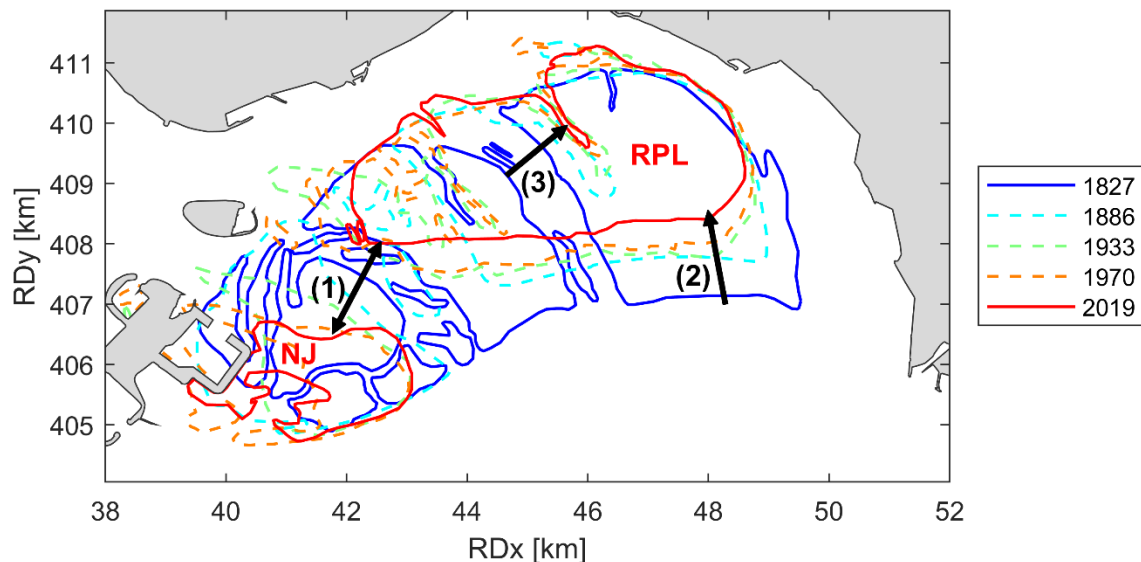


Figuur B1-14. Modeldomein van het Roggenplaat Delft3D model. Het rooster is in zwart aangegeven (1% van de roosterlijnen is getoond t.b.v. de leesbaarheid van het figuur) met de roosterresolutie in kleur. De laagwaterlijn van de Roggenplaat is getoond in rood. De debietranden over de Oosterscheldekering zijn aangegeven met Q en de Riemann rand langs de Zeelandbrug met R. Figuur is overgenomen uit De Vet et al. (2018).

B1.3 Achtergrond: historische ontwikkeling Roggenplaat voor suppleren (tot 2019)

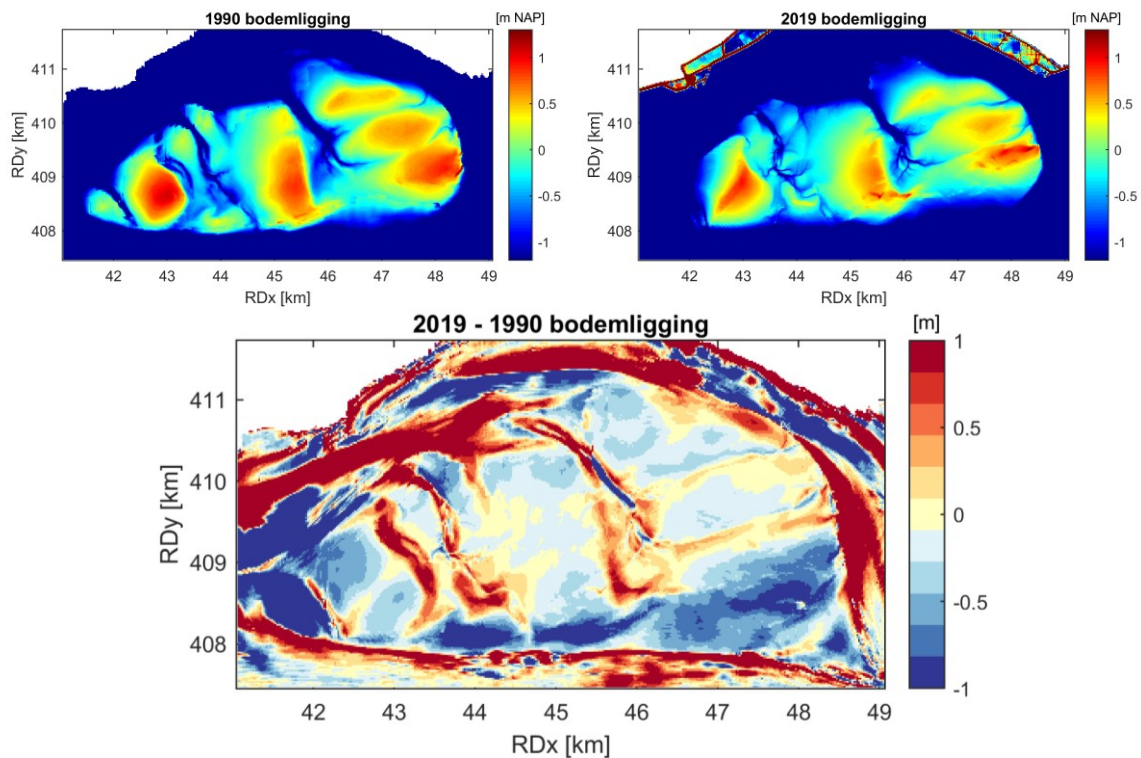
Bij de beantwoording van de onderzoeksvragen zijn de analyses gefocust op de ontwikkeling van de Roggenplaat(suppleties) van enkele jaren vóór aanleg tot vijf jaar na aanleg. Omdat ook de lange termijn morfologische ontwikkeling relevant is voor de hedendaagse ontwikkelingen van de plaat en suppleties, wordt in deze paragraaf een samenvatting gegeven van de morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat over de afgelopen decennia met ook een beschouwing van de ontwikkeling van de laagwaterlijn over de afgelopen twee eeuwen. Deze paragraaf is grotendeels gebaseerd op paragraaf 4.2 van de rapportage van de T0 situatie van de Roggenplaat (Walles et al., 2021a).

Figuur B1-15 toont de ontwikkeling van de laagwaterlijn van de Roggenplaat van 1827 tot 2019 op basis van historische kaarten afkomstig uit Van den Berg (1986), aangevuld met de 2019 Vaklodingen. Hieruit blijkt dat de Roggenplaat kleiner en meer aaneengesloten is geworden (kortere waterlijn). Het zuidelijke, en dan met name het zuidwestelijke gedeelte is het meeste veranderd. De noordelijke plaatrand is vrij stabiel. De noordelijk gelegen getijdgeul de Hammen houdt een sterke noordelijke verplaatsing van de Roggenplaat mogelijk tegen, omdat de ligging van de geul en de kust van Schouwen vastligt. Deze figuur laat zien dat de Roggenplaat lang voor de aanleg van de Oosterscheldekering in 1986 onderhevig was aan significante morfologische veranderingen. In *Figuur B1-15* zijn drie grootschalige ontwikkelingen gemarkeerd: (1) het afsplitsen van Neeltje Jans en de Roggenplaat, (2) de noordelijke migratie van de zuidelijke plaatrand (erosie) en (3) de noordoostelijke migratie van het Middengeultje (oorspronkelijk een volledige kortsluitgeul, nu een kleinere afwateringsgeul).



Figuur B1-15. Ontwikkeling laagwaterlijn Roggenplaat tussen 1827 en 2019, overgenomen uit De Vet et al. (2018) en geactualiseerd met de 2019 situatie. De hedendaagse ligging van het vaste land is grijs gemarkeerd. Aangegeven is de afsplitsing van Neeltje Jans (1), de noordelijke migratie van de zuidelijke plaatrand (2) en de migratie van het Middengeultje (3).

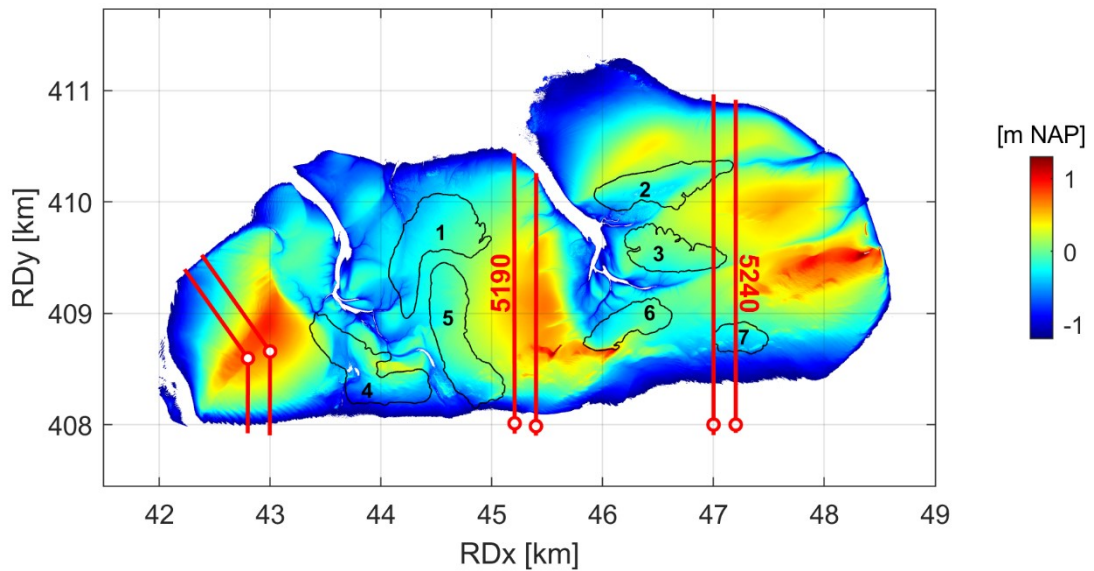
Figuur B1-16 toont de bodemligging in 1990 en 2019 (vóór suppleren), en het verschil hiertussen. Deze zijn gebaseerd op de Vaklodingen (een combinatie van echolodingen en LiDAR data). De algehele plaaterosie is goed zichtbaar; met name het oppervlakte van de gebieden hoger dan +0,5 m NAP is sterk verminderd tussen 1990 en 2019. Verder is de zuidrand sterk geërodeerd (in lijn met de ontwikkelingen van vóór 1990, zie *Figuur B1-15*) en lijken de geulen en plaatdelen zich in noordoostelijke richting te verplaatsen (in lijn met de noordoostelijke migratie van het Middengeultje).



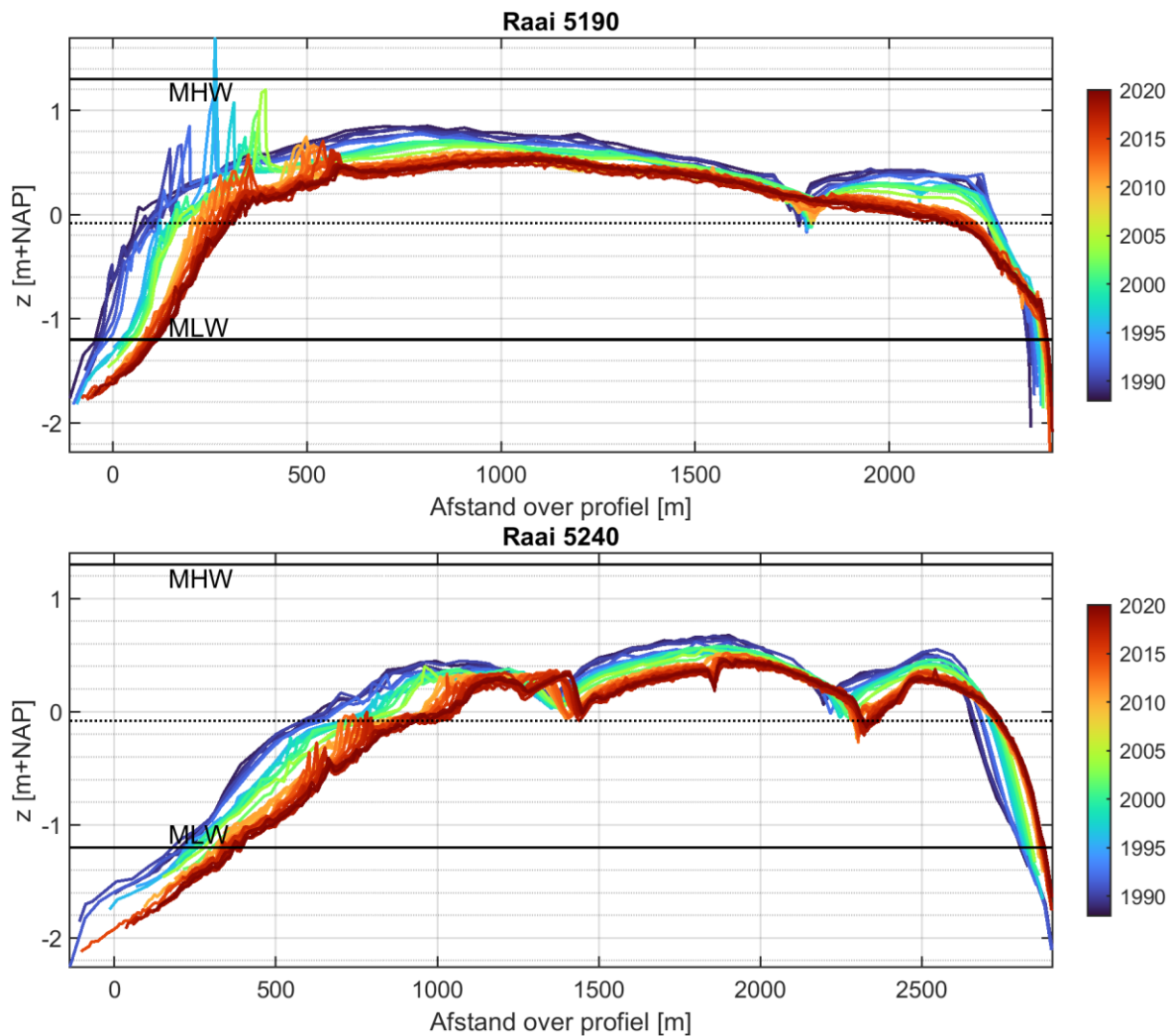
Figuur B1-16. Bodemligging Roggenplaat in 1990 en 2019 op basis van de Vaklodingen, en het verschil hiertussen. De geulen zijn veel dieper dan de kleurschaal aangeeft. Een positief verschil in bodemligging is sedimentatie (rood) en een negatief verschil in bodemligging is erosie (blauw).

In aanvulling op de Vaklodingen wordt de bodemligging sinds 1988 langs 6 raaien over de Roggenplaat met de nauwkeurigere (Bijlage B1.2.2) RTK-dGPS gemeten (Figuur B1-17). Figuur B1-18 toont de bodemligging langs raaien 5190 (midden Roggenplaat) en 5240 (oostelijk deel). Ook hieruit blijkt de sterke erosie van de zuidelijke plaatrand. Deze is tussen 1988 en 2019 ongeveer 200 m verschoven in noordelijke richting. Het midden van de plaat erodeert met $\sim 0,2-0,5$ m over deze periode. De noordelijke plaatrand ligt vrij stabiel en vertoont een kleine noordelijke migratie over deze periode (sedimentatie).

Vanaf de 1990 meting zijn er schelpenruggen op de zuidelijke rand van raai 5190 zichtbaar die in noordwaartse richting verplaatsen. Er ontstaan twee schelpenruggen. In 2019 zijn de schelpenruggen afgenomen in grootte. De oostelijke raai (5240) laat duidelijk de hogere gedeelten/ruggen van de Roggenplaat zien die ook in noordelijke richting verplaatsen (een sterkere migratie van het profiel dan waargenomen in raai 5190). Dit kan duiden op een netto sedimenttransport met een sterke noordwaartse component, in lijn met de overheersende zuidwestelijke windrichting. In De Vet et al. (2018) is aangetoond dat de wind tijdens stormen inderdaad in belangrijke mate de richting van de sedimenttransporten stuurt (middels wind-gedreven stroming en golven). En het is juist tijdens de stormen wanneer het sedimenttransport op de Roggenplaat hoofdzakelijk plaatsvindt. Voor de zuidelijke zone kan het sediment ook (gedeeltelijk) in zuidelijke richting worden verplaatst tijdens stormen. De laatste jaren, 2010-2019, lijkt de bodemligging minder sterk te veranderen dan de jaren ervoor. Dit is een lijn met systeem-brede waarnemingen in de Oosterschelde (De Vet et al., 2024).



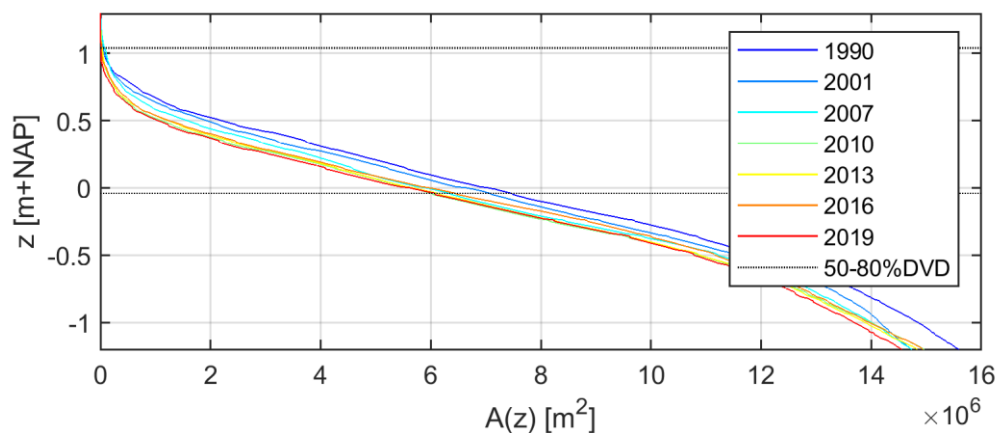
Figuur B1-17. RTK raaien op de Roggenplaat die sinds 1988 ongeveer jaarlijks zijn ingemeten. Voor raai 5190 en raai 5240 zijn de data weergegeven in Figuur B1-18. De cirkels geven het nulpunt van elke raai aan. Op de achtergrond zijn de LiDAR data van april 2019 (vóór suppleren) weergegeven (boven laagwater). Ter referentie zijn de contouren en nummering van de suppletie-elementen aangegeven (realisatie eind 2019).



Figuur B1-18. Bodemligging langs RTK raaien 5190 en 5240 tot vóór de realisatie van de suppletie (eind 2019). De afstand neemt toe in noordelijke richting. De gemiddeld-laagwater (MLW) en -hoogwater (MHW) lijnen zijn aangegeven, net als de gemiddeld water lijn (stippellijn). Zie Figuur B1-17 voor de ligging van de raaien.

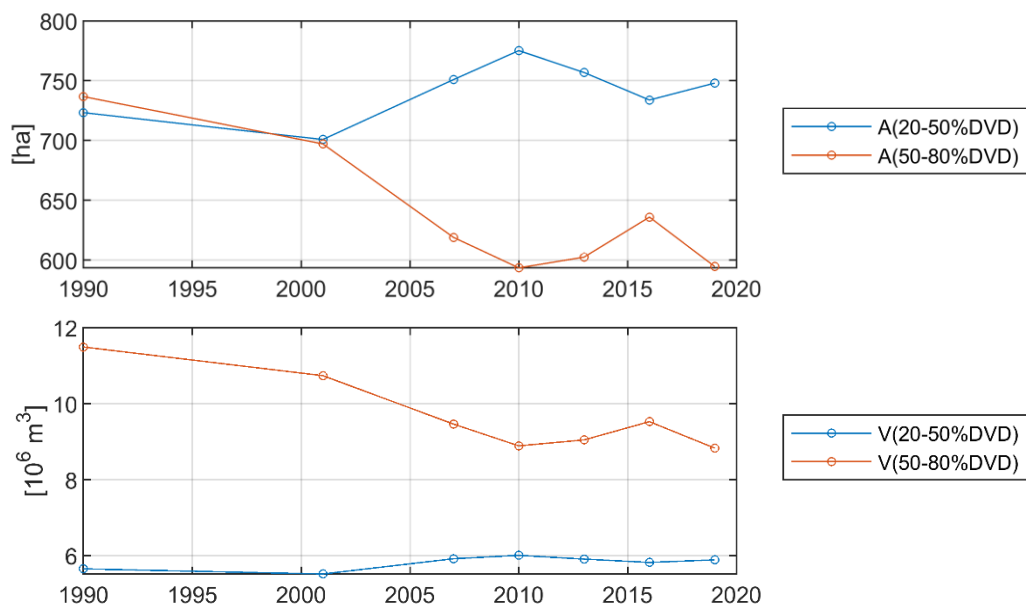
Volgens De Ronde et al. (2013) is de erosie tussen 1990 en 2010 het sterkste in het noorden en zuiden van de plaat (gemiddeld 24 mm/jaar). Het westelijke gedeelte erodeert 14 mm/jaar en het grote middengedeelte 5 mm/jaar. De Ronde et al. (2013) koppelen de sterke erosie van de zuidrand aan golfwerking. Dit gedeelte is onderhevig aan golven uit de dominante zuidwestelijke richting. Gemiddeld erodeerde de Roggenplaat de afgelopen decennia 0,7-1,0 cm/jaar (gebaseerd op de RTK data en de Vaklodingen). De laatste paar jaren lijkt de erosietrend van de Roggenplaat iets af te vlakken (De Vet et al., 2017). Enige afname in plaaterosie is een systeem-brede ontwikkeling over de afgelopen decennia in de Oosterschelde (De Vet et al., 2024). Voor de recente ontwikkelingen van de Roggenplaat wordt verwezen naar Bijlage B1.5.

Hypsometrische curves zijn een manier om de morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat te bestuderen. Deze curves tonen een cumulatieve verdeling van het plaatoppervlakte als functie van de hoogte. Figuur B1-19 laat deze zien op basis van de Vaklodingen data voor de periode 1990-2019. Hierin zijn verticaal niveaus ingetekend die corresponderen met een 50% droogvalduur (NAP-0,04 m) en 80% droogvalduur (NAP+1,04 m) op basis van de waterstanden die in 2013 bij station Roompot Binnen zijn gemeten (representatief voor de recente jaren). Uit deze figuur blijkt dat de hoogteverandering op de Roggenplaat vrij uniform verloopt; na 2010 lijken de veranderingen wel kleiner. Een uitzondering op dit uniforme verloop is de relatief snelle erosie van de plaatranden (dieper dan ca. NAP -0,8 m), wat ook zichtbaar is in de ruimtelijke verdeling van de erosie (Figuur B1-16). Verder laat deze figuur zien dat er nauwelijks areaal op de Roggenplaat is (en was) dat meer dan 80% van de tijd droogvalt (nog slechts 1 ha in 2019). Dit betekent dat het totale areaal dat meer dan 50% van de tijd droogvalt nagenoeg identiek is aan het areaal met een 50-80% droogvalduur.



Figuur B1-19. Hypsometrische curves van de Roggenplaat voor de jaren 1990, 2001, 2007, 2010, 2013, 2016 en 2019 op basis van de Vaklodingen data (geen LiDAR in 1990).

De foerageerfunctie van de Roggenplaat wordt in belangrijke mate bepaald door de droogvalduur (DVD). Van 1990 naar 2019 is het areaal en volume 20-50% DVD toegenomen, terwijl tegelijkertijd het areaal en volume 50-80% DVD is afgenomen (Figuur B1-20, Tabel B1-4 en Tabel B1-5). Afwijkingen in de trend, bijvoorbeeld in 2016, kunnen wijzen op meetfouten (de Vaklodingen in deze paragraaf zijn niet gecorrigeerd). Het zand wordt dus in hoofdlijnen van de hogere naar de lagere delen verplaatst. De afname is sterker dan de toename, in lijn met de algehele erosie van de Roggenplaat. In 2019 ligt 594 ha van de Roggenplaat tussen de 50 en 80% van de tijd droog (Tabel B1-5). Het grootste deel hiervan (429 ha) zit overigens in de 50-60% droogvalduurklasse. Van 1990 tot aan 2019 is er ca. 2,7 miljoen kuub aan zand tussen de 50-80% DVD klasse verloren gegaan (Tabel B1-5).



Figuur B1-20. Ontwikkeling areaal (boven) en volume (onder) 20-50% en 50-80% DVD (droogvalduur) op basis van de Vaklodingen data.

Tabel B1-4. Aandeel van de Roggenplaat (in ha) dat een bepaald percentage van de tijd droogvalt voor verschillende jaren in de periode 1990 – 2019 op basis van de Vaklodingen data (geen LiDAR in 1990).

	1990	2001	2007	2010	2013	2016	2019
A(>10%DVD)	1546	1462	1459	1480	1467	1479	1440
A(>20%DVD)	1462	1402	1377	1370	1362	1371	1343
A(>30%DVD)	1334	1293	1258	1233	1232	1243	1214
A(>40%DVD)	1111	1066	1027	990	998	1033	990
A(>50%DVD)	739	702	626	595	605	637	595
A(>60%DVD)	318	268	233	175	189	198	166
A(>70%DVD)	55	40	35	22	22	24	17
A(>80%DVD)	2	5	7	2	3	1	1
A(>90%DVD)	0	0	0	0	0	0	0

Tabel B1-5. Areaal en volume van verschillende droogvalduurklassen op de Roggenplaat in 1990 en 2019 op basis van de Vaklodingen data (geen LiDAR in 1990). De volumes in deze klassen zijn berekend ten opzichte van de gemiddeld laagwaterlijn. Mede hierdoor is het volume in de 10-20% droogvalduurklasse in deze analyse zeer beperkt. Dit is ook de verklaring voor het feit dat het volume in de 50-80% droogvalduurklasse substantieel groter is dan in de 20-50% droogvalduurklasse, ondanks dat het oppervlakte van de 50-80% klasse vergelijkbaar (1990) of kleiner (2019) is dan de lager gelegen 20-50% klasse.

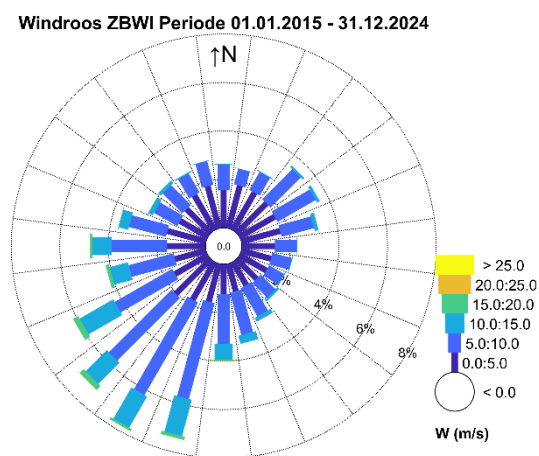
Droogvalduurklasse	1990		2019	
	Areaal ha (%)	Volume 10 ⁶ m ³	Areaal ha (%)	Volume 10 ⁶ m ³
10-20%	84 (5%)	0,1	97 (7%)	0,1
20-50%	723 (47%)	5,7	748 (52%)	5,9
50-80%	737 (48%)	11,5	594 (41%)	8,8
80-100%	2 (0%)	0,1	1 (0%)	0,0

B1.4 Achtergrond: wind-, golf-, en waterstandcondities tijdens de monitoringscampagne

In deze paragraaf worden de wind-, golf-, en waterstandcondities gepresenteerd die gedurende de monitoringscampagne (T0 t/m T5) zijn opgetreden. In deze beschouwing worden jaargemiddelde condities behandeld en worden extreme stormen uitgelicht, met speciale aandacht voor de sluitingen van de Oosterscheldekering. Deze informatie faciliteert de beantwoording van diverse morfologische onderzoeksvragen. De stroming op de Roggenplaat valt buiten de focus van deze paragraaf, omdat daar een specifieke onderzoeksvraag aan is gewijd (paragraaf B1.7.5).

B1.4.1. Windcondities

De windmetingen bij de Zeelandbrug (zie *Figuur B1-8* voor de locatie) worden in deze studie als representatief beschouwd voor de Roggenplaat. De windrichting is nautisch gedefinieerd, dat wil zeggen 0° correspondeert met een wind afkomstig uit het noorden. De windroos (*Figuur B1-21*) toont dat het windklimaat op deze locatie wordt gedomineerd door zuidwestelijke wind.



*Figuur B1-21. Windroos van metingen bij windstation Zeelandbrug (ZBWI) van 1 januari 2015 tot 31 december 2024. De locatie van het windstation is in *Figuur B1-8* weergegeven.*

Ter illustratie, in deze periode zijn windsnelheden 40% van de tijd onder de 5 m/s, 48% van de tijd tussen de 5 en 10 m/s, en ruim 12% van de tijd meer dan 10 m/s (*Tabel B1-6*). De maximale gemeten snelheid was in deze periode 26,2 m/s op 18 februari 2022.

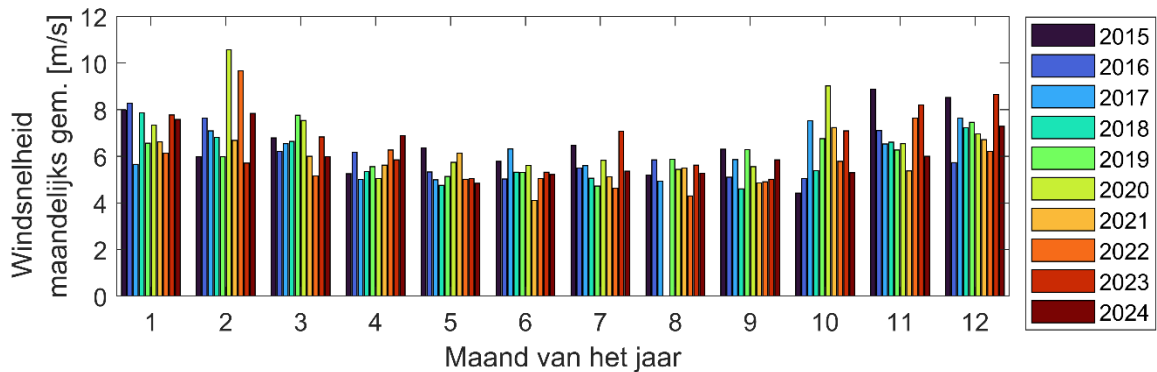
Tabel B1-6. Percentage van voorkomen van de windsnelheden. Deze percentages zijn zowel getoond voor de gehele monitoringscampagne als twee stormrijke perioden (februari 2020 en 2022).

Windsnelheden	% van voorkomen jan 2015-dec 2024	% van voorkomen februari 2020	% van voorkomen februari 2022
0-5 m/s	39,8 %	10,7 %	10,6 %
5-10 m/s	47,5 %	33,2 %	48,4 %
10-15 m/s	11,4 %	40,0 %	28,0 %
15-20 m/s	1,2 %	14,7 %	11,6 %
> 20 m/s	<0,1 %	1,4 %	1,1 %

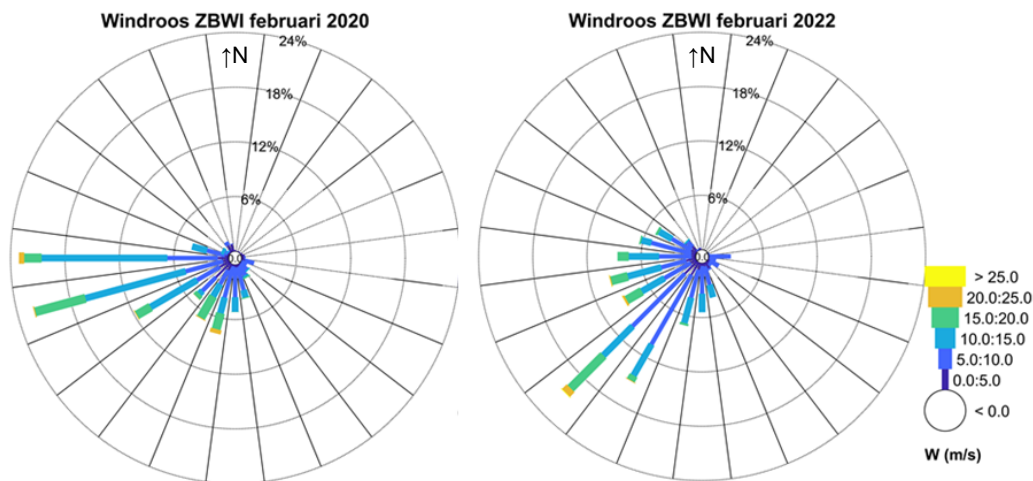
Gemiddelde windsnelheden per maand variëren tussen 5 m/s in de zomermaanden en 7 m/s tijdens de wintermaanden (*Figuur B1-22*). De maanden februari van 2020 en 2022 waren relatief stormachtig, met gemiddeld 3 m/s grotere windsnelheden dan in andere februarimaanden (zie de specifieke windrozen in *Figuur B1-23*, en windklassen in *Tabel B1-6*). Waar over de hele periode 2015-2020 de windsnelheid 1% van de tijd 15-20 m/s bedroeg, was dit in februari 2020 15% van de tijd en in februari 2022 12% van de tijd.

In februari 2020 zijn er vier stormen opgetreden; op 9 februari storm Ciara, op 11 februari een naamloze westerstorm, op 16 februari storm Dennis en op 24 februari nogmaals een naamloze westerstorm. In februari 2022 zijn er 5 (zuid)westerstormen opgetreden; op 31 januari storm Corrie, op 6 februari een

naamloze westerstorm, op 16 februari storm Dudley, op 18 februari Eunice en op 20 februari Franklin. Dit was een uitzonderlijk stormachtige periode. Daarbij komt het feit dat deze laatste 3 stormen kort na elkaar optraden (een drielingstorm genoemd), de laatste keer dat dit voorkwam was in 1928. De KNMI geeft aan dat storm Eunice in de top 3 staat van de zwaarste stormen in ruim vijftig jaar. Desondanks werd de Oosterscheldekering niet gesloten tijdens Eunice (paragraaf B1.4.3). Dit omdat de wind tijdens Eunice vanuit het zuidwesten kwam waardoor de waterstandsopzet relatief beperkt bleef.



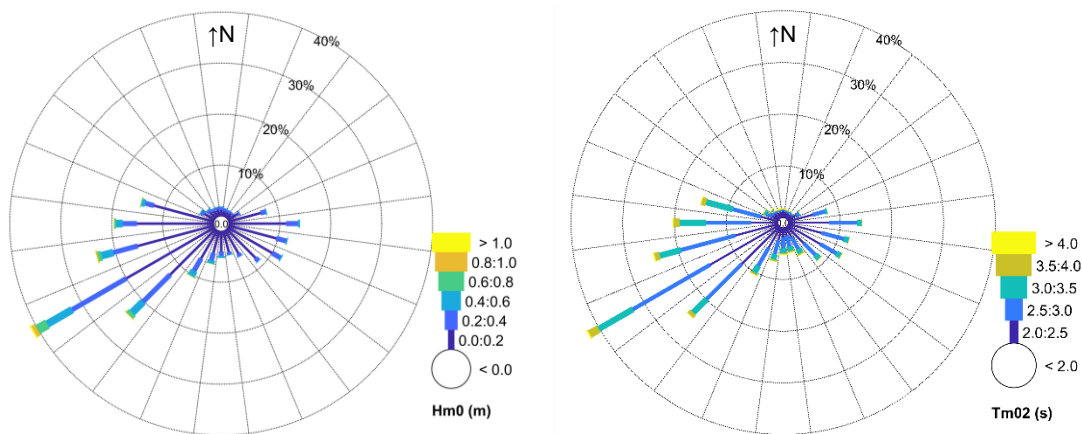
Figuur B1-22. Gemiddelde windsnelheden per maand bij windstation Zeelandbrug (voor de locatie zie Figuur B1-8).



Figuur B1-23. Windroos van februari 2020 (links) en februari 2022 (rechts) bij windstation Zeelandbrug (voor de locatie zie Figuur B1-8).

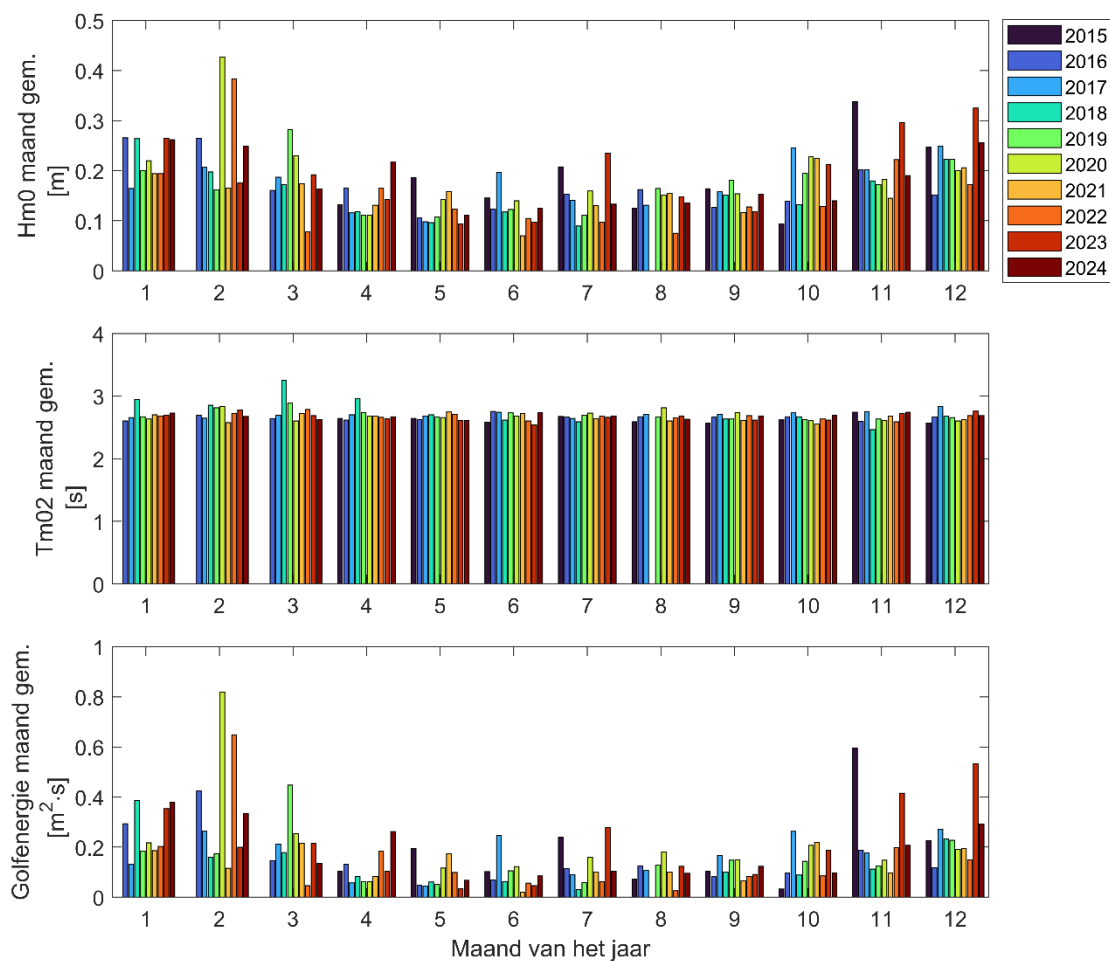
B1.4.2. Golfcondities

De golfmetingen worden weergegeven in de vorm van golfrozen van representatieve eigenschappen; de significante golfhoogte $Hm0$ en golfperiode $Tm02$ (Figuur B1-24). Deze laten zien dat lokaal opgewekte windgolven dominant zijn, aangezien de golfhoogte grotendeels lager is dan 0,4 m met relatief korte golfperiodes van minder dan 4 s. De golfrichtingen zijn typisch uit oostelijke of zuidwestelijke richting. Golven uit noordelijke richting zijn relatief klein in de geulen ten zuiden van de Roggenplaat doordat de Roggenplaat golven uit deze richting grotendeels tegenhoudt.



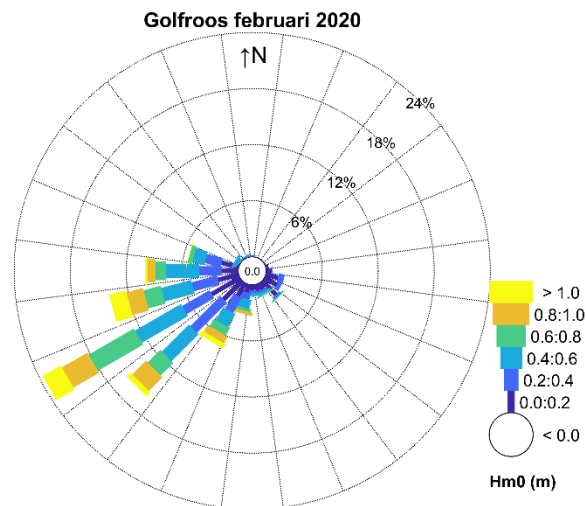
Figuur B1-24. Golfrozen voor de periode van 1 januari 2015 tot 31 december 2024 gemeten op de locatie van de Waverider zoals aangegeven in Figuur B1-8. Links, significante golfhoogte H_{m0} (m), rechts, golfperiode T_{m02} (s).

De maandgemiddelde golfcondities zijn weergegeven in Figuur B1-25, en tonen een typische golfhoogte van 20 cm en golfperioden van orde 2,5-3 s. Tijdens de periode na suppleren zijn er twee uitzonderlijk stormachtige maanden zichtbaar, februari 2020 en februari 2022 (conform de windcondities in paragraaf B1.4.1), met een verdubbeling van de gemiddelde golfhoogte en meer dan driemaal de gemiddelde golfenergie ($H_{m0}^2 \times T_{m02}$). Deze twee stormachtige perioden worden hieronder verder toegelicht. Zie paragraaf B1.7.1 voor de morfologische implicaties van deze stormen.



Figuur B1-25. Gemiddelde significante golfhoogte (m), golfperiode (s) en golfenergie (m^2s) gemeten op de locatie zoals aangegeven in Figuur B1-8. Opgemerkt wordt dat de Waverider van 8 juli tot 30 september 2018 en van 9 februari tot 23 maart 2022 buiten bedrijf was. De maandgemiddelde waarden zijn voor deze maanden dus op minder data gebaseerd en daarmee minder representatief.

Tijdens de februaristormen van 2020 zijn er door de Waverider ten zuiden van de Roggenplaat golfhoogten gemeten van 1-1,5 m. De golfperioden waren kleiner dan 5 s, en kwamen uit westzuidwestelijke richting (~230-270 graden). De golfroos voor februari 2020 is weergegeven in *Figuur B1-26*.

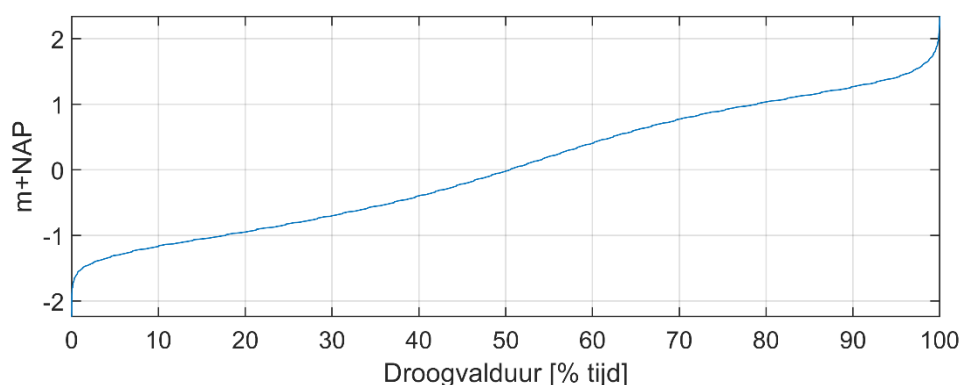


Figuur B1-26. Golfroos van februari 2020 gemeten op de locatie zoals aangegeven in Figuur B1-8.

Omdat de Waverider gedurende de tweede helft van februari 2022 niet gefunctioneerd heeft (onderhoud; o.a. tijdens de drielingstorm is er niet gemeten), is er voor die maand geen golfroos opgesteld. Tijdens Corrie functioneerde de Waverider wel en zijn er golfhoogten gemeten tot 0,9 m. Tijdens de daaropvolgende westerstorm (6 februari 2022) was de golfhoogte maximaal 1,3 m, waren de golfperioden tot 4 s, en kwamen de golven uit een westzuidwestelijke richting (~240 graden).

B1.4.3. Waterstandcondities en sluitingen kering

Waterstanden zijn gemeten zeewaarts (Roompot Buiten) en landwaarts (Roompot Binnen) van de Oosterscheldekering (voor de locaties zie *Figuur B1-8*). De waterstanden variëren door astronomische en meteorologische invloeden. Rond de Roggenplaat is de gemiddelde laagwaterstand -1,2 m NAP en de gemiddelde hoogwaterstand +1,3 m NAP. De droogvalduurcurve is weergegeven in *Figuur B1-27* en de corresponderende droogvalduurwaarden zijn getoond in *Tabel B1-7*. Deze waarden zijn tijdens de ontwerpstudie afgeleid op basis van de waterstandmetingen bij Roompot Binnen in 2013 (Van der Werf et al., 2016b).

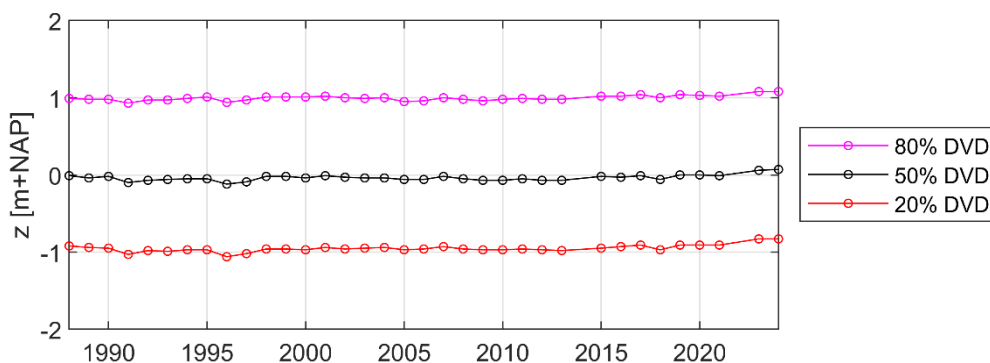


Figuur B1-27. De droogvalduurcurve gebaseerd op de waterstanden gemeten in 2013 bij Roompot Binnen (zie Figuur B1-8 voor de locatie van het meetstation).

Tabel B1-7. Droogvalduurwaarden (t.o.v. NAP) bepaald voor 2013 bij Roompot Binnen.

10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
-1,19 m	-0,97 m	-0,73 m	-0,44 m	-0,04 m	0,39 m	0,76 m	1,02 m	1,24 m

Opgemerkt wordt dat de gemiddelde getijdekaracteristieken in werkelijkheid over de jaren variëren, zie *Figuur B1-28*. Variaties over de jaren zijn onder meer het gevolg van zeespiegelstijging en de 18,6-jarige cyclus (veroorzaakt door de afwijking van het baanvlak van de maan ten opzichte van dat van de aarde). De tijdvariaties in droogvalduurwaarden zijn echter maximaal $\sim 0,1$ m (*Figuur B1-28*). Door in deze studie vast te houden aan de droogvalduurwaarden op basis van de 2013 waterstanden bij Roompot Binnen (consistent met de ontwerpstudie) wordt volledig gefocust op de morfologische veranderingen en zijn directe vergelijkingen met de berekeningen van de ontwerpstudie (Van der Werf et al., 2016b) mogelijk. Implicaties van zeespiegelstijging op de areaalontwikkelingen van de Roggenplaat zijn separaat beschouwd in paragraaf 5.1 van het hoofdrapport.

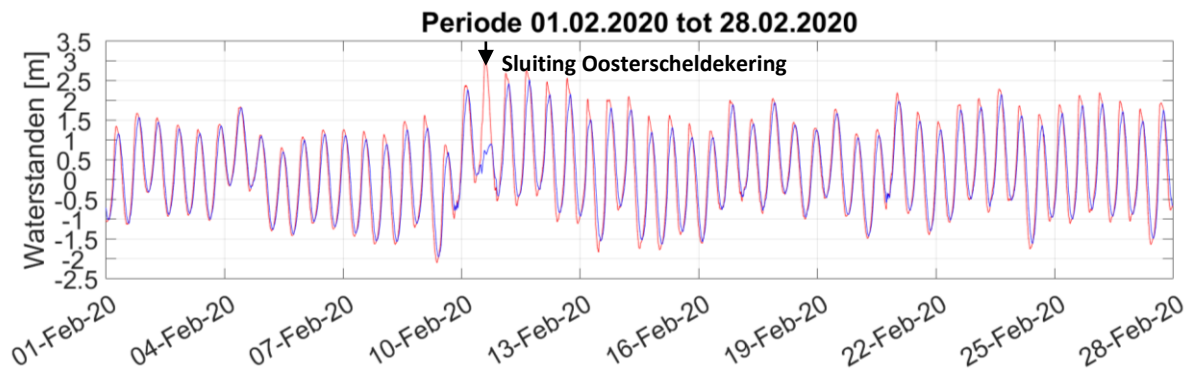


Figuur B1-28. Ontwikkeling waterstanden bij Roompot Binnen die corresponderen met 20%, 50% en 80% droogvalduur.

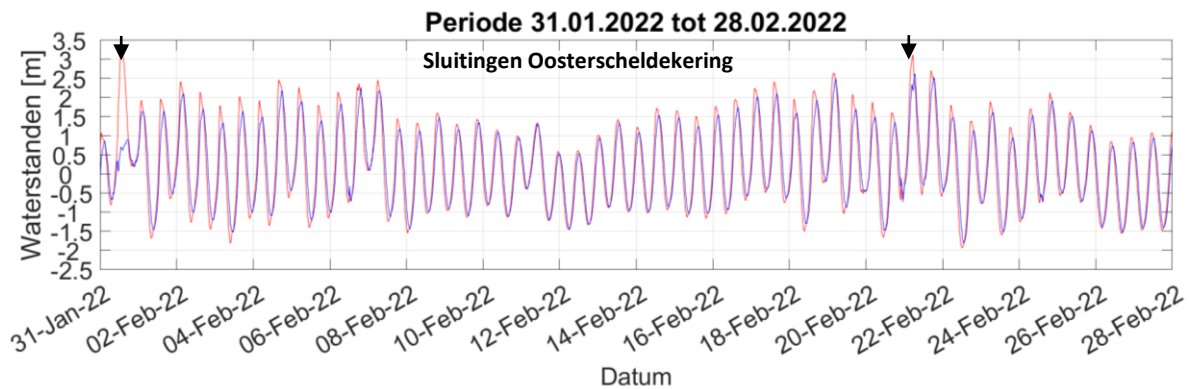
De Oosterscheldekering is gedurende de monitoringsperiode (2015 t/m 2024) op de volgende dagen enkele uren, afhankelijk van de duur van de storm en de waterstand, gesloten geweest:

- 3 januari 2018
- 10 februari 2020
- 31 januari 2022
- 21 februari 2022 (late sluiting, streefpeil binnen met 1,5 m overschreden)
- 21 december 2023

De sluitingen na aanleg van de suppletie (eind 2019) worden hierna in meer detail besproken. In februari 2020 is de Oosterscheldekering gesloten op 10 februari naar aanleiding van de verwachte hoogwaterstand van +3,05 m NAP bij Roompot Buiten (*Figuur B1-29*). Tijdens de sluiting waren de waterstanden binnen de Oosterschelde tussen de +0,4 m NAP en +1,0 m NAP. Begin 2022 is de Oosterscheldekering twee keer binnen één maand gesloten. De eerste sluiting vond plaats op 31 januari vanwege een verwachte waterstand van +3,1 meter NAP. De tweede sluiting was op 21 februari, toen een verwachte waterstand van +2,80 meter NAP uiteindelijk opliep tot +3,11 meter NAP. Hierdoor werd de kering later dan gebruikelijk gesloten (*Figuur B1-30*). De waterstanden binnen waren rond de +0,8 m NAP (sluiting 31 januari) en de +2,5 m NAP (sluiting 21 februari). Vanwege de late sluiting op 21 februari 2022 is het reguliere streefpeil (+1,0 m NAP) binnen de Oosterschelde niet behaald (1,5 m overschrijding). Tot slot is de kering in de eerste vijf jaar na aanleg van de suppletie nog éénmaal gesloten op 21 december 2023 in verband met een waterstand van +3,2 m NAP.



Figuur B1-29. Waterstanden tussen 1 februari 2020 en 28 februari 2020, gemeten bij Roopot Buiten (rood) en Roopot Binnen (blauw) met de sluiting van de Oosterschelde aangegeven op 10 februari.



Figuur B1-30. Waterstanden tussen 29 januari 2022 en 28 februari 2022, gemeten bij Roopot Buiten (rood) en Roopot Binnen (blauw) met de sluitingen van de Oosterscheldekering aangegeven op 31 januari en 21 februari.

B1.5 Evaluatie ontwikkeling Roggenplaatcomplex

In deze paragraaf staat evaluatievraag 1 centraal:

Evaluatievraag morfologie 1

Hoe verandert het areaal droogvalduur op de gehele Roggenplaat in de jaren vóór en in de eerste vijf jaar na aanleg van de suppletie?

Samenvattende beantwoording:

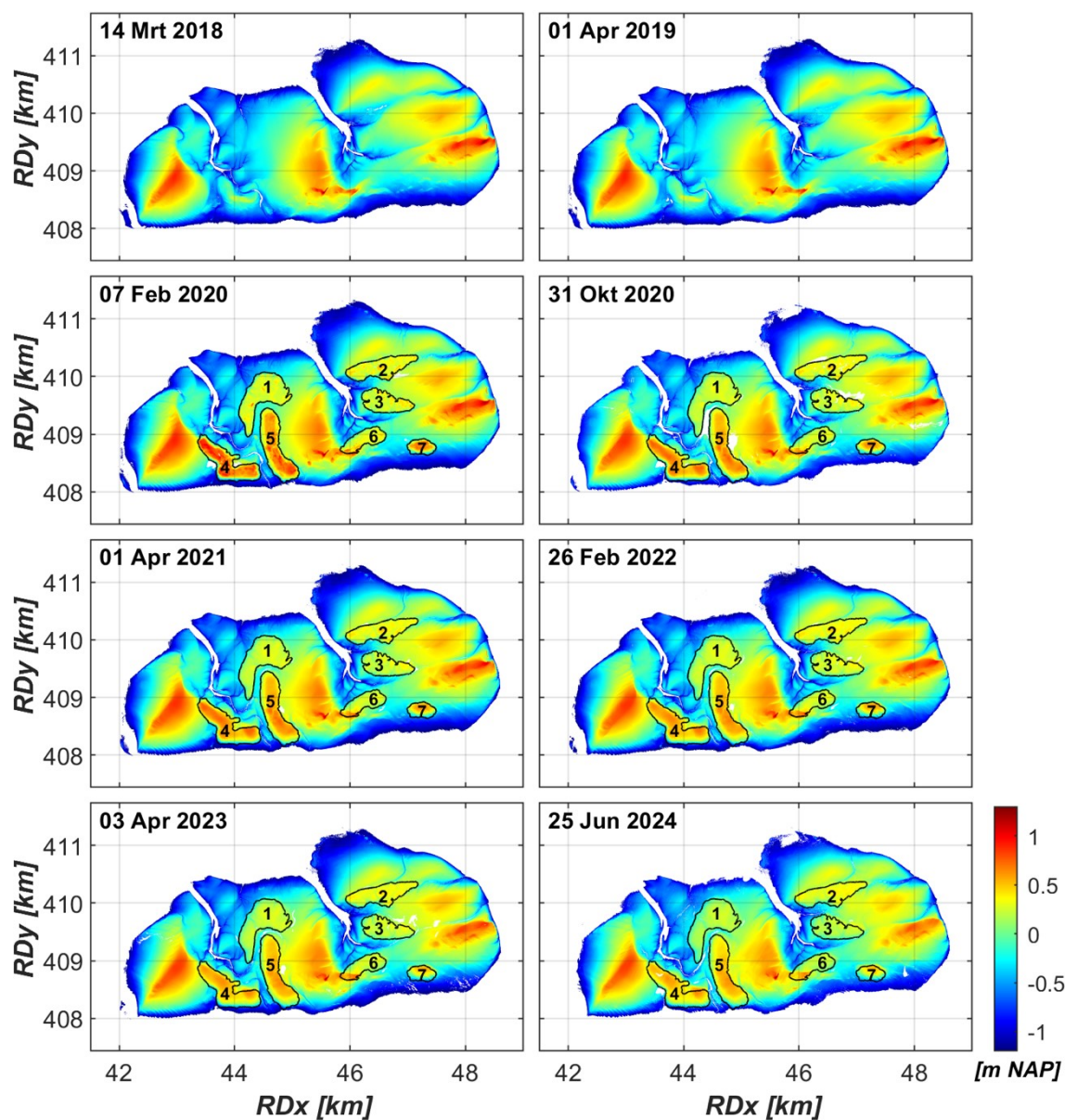
De veranderingen in droogvalduur van de Roggenplaat hangen direct samen met de morfologische ontwikkelingen en de aanleg van de suppleties. In het jaar vóór aanleg van de suppleties (van 2018 tot eind 2019) waren de morfologische veranderingen beperkt, in lijn met de ontwikkeling (afname in hoogte) over het afgelopen decennium. Met de aanleg van de suppleties is het areaal met een droogvalduur van meer dan 50% toegenomen met 124 ha (een toename van 21%). Dit betekende met name een vermindering van het areaal met een droogvalduur van 20-50%. Na aanleg is het areaal met een droogvalduur van meer dan 50% afgenomen van 726 ha in februari 2020 tot 698 ha in juni 2024, wat neerkomt op een afname van 4%. De klasse met een droogvalduur van 70-80% ondervond de grootste relatieve achteruitgang (78%) in areaal. Het areaal met een droogvalduur van meer dan 80% was vóór suppleren al zeer beperkt (1 ha) en is in het jaar na suppleren (2020) verloren gegaan. De RTK-raaimetingen en vlakdekkende LiDAR-metingen vertonen beide een afname in hoogte van de (met name zuidelijke) suppletie-elementen en tonen lokaal sedimentatie ten noorden van deze elementen. Kortom, na aanleg een afname in het areaal van de hoogste droogvalduurklassen van de plaat en een lokale toename in droogvalduur in de nabijheid van de suppleties.

Plaat-brede ontwikkelingen in droogvalduur

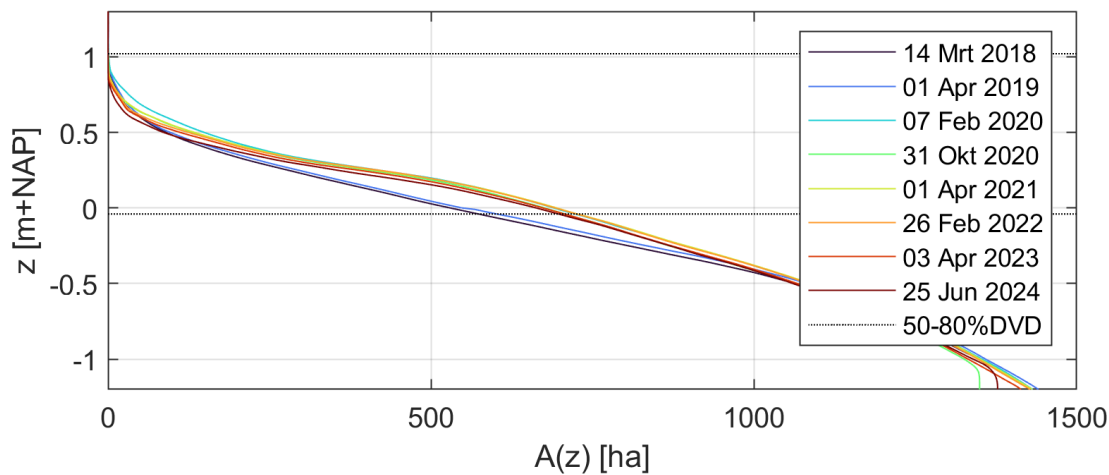
Het areaal droogvalduur van de gehele Roggenplaat is een centrale doelindicator voor dit suppletieproject. De ontwikkeling van het areaal droogvalduur is direct gekoppeld aan de morfologische ontwikkeling van de plaat. De (plaat-breed gecorrigeerde, zie paragraaf B1.2.3) LiDAR opnamen tonen aan dat de hoogteveranderingen tussen 2018 en 2019, vóór de plaatsing van de suppletie-elementen, beperkt zijn (jaarlijks typisch tot enkele centimeters bodemveranderingen; *Figuur B1-31*). Dit komt ook tot uitdrukking in de zeer vergelijkbare hypsometrische curves voor die jaren (*Figuur B1-32*). Dit is in lijn met de ontwikkeling van de hoogteveranderingen op de Roggenplaat tussen 1990 en 2019 (paragraaf B1.3; Walles et al. 2021a). De realisatie van de suppletie resulteerde in een substantiële verandering van de hypsometrische curves. Het areaal met een droogvalduur van meer dan 50% is bijvoorbeeld tussen april 2019 en februari 2020 met 124 ha (na opvulling van eventuele gaten in de LiDAR kaarten met lineaire interpolatie) toegenomen (21%). De LiDAR opnamen tonen dat er in de eerste drie jaar na suppleren variaties in droogvalduur optreden in de orde van enkele hectaren, gevolgd door meer substantiële afnamen in de laatste twee jaar (2023/2024; ruim 10 ha per jaar) van dit areaal met een droogvalduur van meer dan 50% (zie ook *Tabel B1-8* en *Figuur B1-33*). Het areaal met een droogvalduur van meer dan 80% is geheel verloren gegaan (was 1 ha direct na suppleren). De vergelijking van het areaal met een droogvalduur van meer dan 50% in februari 2020 (gelijk na suppleren) en april 2021 laat een kleine stijging van het areaal zien (5 ha). Tussen april 2021 en juni 2024 neemt het areaal met 30 ha af.

Zoals eerder vermeld, neemt het areaal met een droogvalduur van meer dan 50% ofwel het areaal 50-80% droogvalduur na suppleren af. De afname tussen februari 2020 en juni 2024 bedraagt 6,2 ha/jr (lineair verband met een correlatiecoëfficiënt $r^2 = 0,73$). Het areaal droogvalduur ontwikkelt zich echter niet monotoon: als (de hoge delen van) de suppleties eroderen blijven deze geruime tijd nog boven de 50% droogvalduur liggen. Daarnaast verhoogt sediment afkomstig van de suppleties de bodem in de nabije

omgeving (paragraaf B1.7.2) waardoor lokaal een toename in droogvalduur kan plaatsvinden. In het hoofdrapport (paragraaf 5.1) wordt de langjarige droogvalduurontwikkeling nader bediscussieerd.



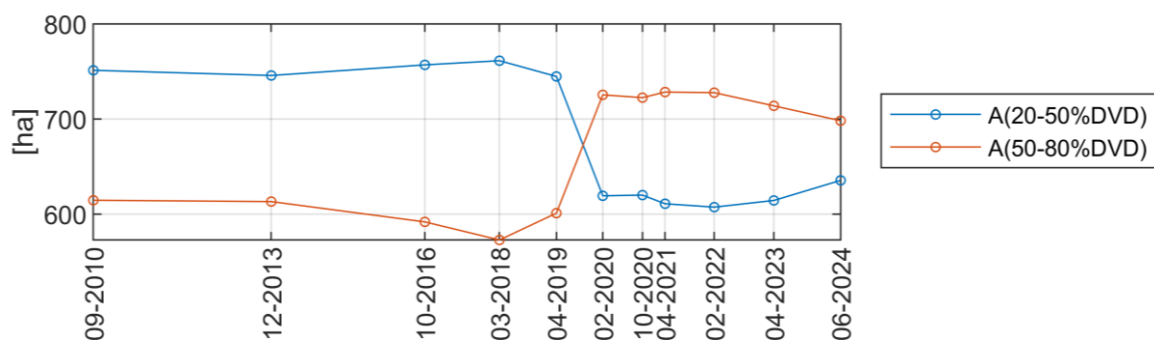
Figuur B1-31. Hoogtekaarten op basis van de niet-geïnterpoleerde LiDAR data van de Roggenplaat van 2018, 2019, 2020 (2x), 2021, 2022, 2023 en 2024. De LiDAR opnamen zijn gecorrigeerd met de plaat-brede correctiefactor op basis van de RTK metingen (zie paragraaf B1.2.3). De contouren en nummering van de suppletie-elementen zijn in de hoogtekaarten vanaf 2020 aangegeven.



Figuur B1-32. Hypsometrische curves van de Roggenplaat (links) voor de jaren 2018 t/m 2024 op basis van de plaat-breed gecorrigeerde LiDAR data. De ondergrens van de hypsometrische curves is gemiddeld laagwater, de bovengrens is gemiddeld hoogwater. Door het ontbreken van een substantieel deel van de Roggenplaat in de metingen van oktober 2020 (91 ha t.o.v. 2019) toont de curve van oktober 2020 een totaal areaal dat kleiner is dan het areaal in februari 2020 (te zien aan het horizontale verschil rechtsonder in de curve).

Tabel B1-8. Het areaal (ha) van verschillende droogvalduurklassen voor 2018 t/m 2024 op basis van de (plaat-breed gecorrigeerde) LiDAR data na interpolatie van eventuele ontbrekende data.

DVD-klasse	Mrt-2018	Apr-2019	Feb-2020	Okt-2020	Apr-2021	Feb-2022	Apr-2023	Jun-2024
20-50%	761	745	619	620	611	607	614	635
50-60%	416	431	492	504	503	510	509	516
60-70%	142	152	205	204	210	203	193	176
70-80%	15	18	29	15	16	14	12	6
80-90%	1	1	1	0	0	0	0	0
>50%	573	602	726	723	728	728	714	698
>80%	1	1	1	0	0	0	0	0



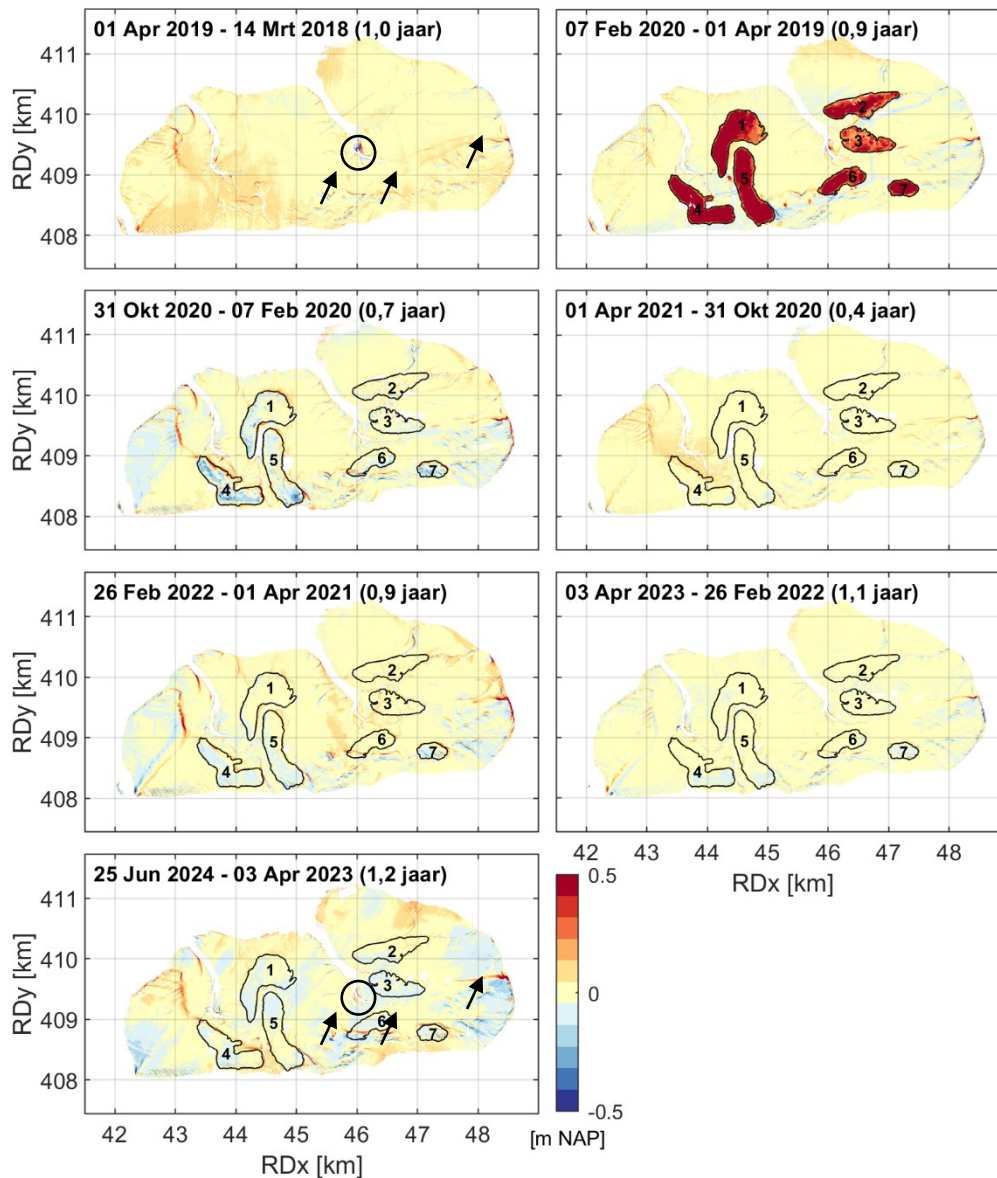
Figuur B1-33. Ontwikkeling areaal van de 20-50% en 50-80% DVD(droogvalduur)klassen op basis van de RTK-gecorrigeerde LiDAR data.

Lokale morfologische ontwikkelingen

De veranderingen in morfologie zijn nader beschouwd met verschilkaarten op basis van de LiDAR opnamen (*Figuur B1-34*). Er zijn in het zuidoosten van het Middengeultje tientallen centimeters aan veranderingen zichtbaar die duiden op een migratie van één van de aftakkingen van het Middengeultje (aangegeven met een cirkel in *Figuur B1-34*). Deze veranderingen zijn in paragraaf B1.7.4 nader onderzocht met de Multibeam data.

Verder migreren de bodemvormen (o.a. schelpenruggen) op de Roggenplaat tussen 2018 en 2019 naar het noordoosten (gemarkeerd met de pijlen in *Figuur B1-34*). Deze migratie is in lijn met de ontwikkeling zoals in de afgelopen decennia is waargenomen (paragraaf B1.3) en is ook in metingen na aanleg van de suppleties zichtbaar (bijvoorbeeld aangegeven met de pijlen in de verschilkaart tussen 2023 en 2024 in *Figuur B1-34*). Migrerende bodemvormen resulteren in beginsel niet in substantiële veranderingen in droogvalduurarealen op de plaat, omdat sedimentatie aan de ene kant samen gaat met erosie aan de andere kant.

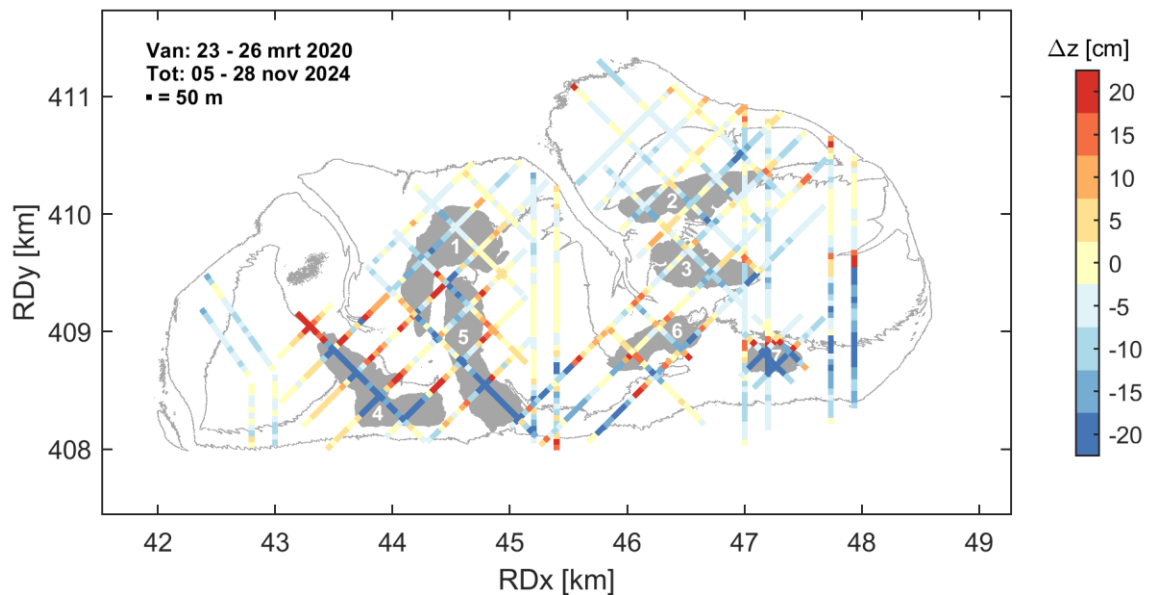
In de verschilkaart tussen april 2019 en februari 2020 domineren de zeven suppletie-elementen. De toename in bodemhoogte overschrijdt de kleurschaal substantieel (meer dan 0,5 m verhoging, zie *Figuur B1-37* voor de dikte van de suppletie-elementen). Dit staat logischerwijs in direct verband met de eerder benoemde 20% toename in areaal met een droogvalduur van meer dan 50%. Wanneer we kijken naar de verandering in areaal binnen de verschillende droogvalduurklassen (*Tabel B1-5*), zien we dat het areaal in alle subklassen boven de 50% droogvalduur (50-60%, 60-70%, en 70-80%) toenam tussen april 2019 en februari 2020. Het areaal met een droogvalduur van 20-50% nam daarentegen af met 17% omdat in deze gebieden de bodem door suppleren is verhoogd en in hogere droogvalduurklassen terecht is gekomen. Na suppleren is in de verschilkaarten (*Figuur B1-34*) een afname in hoogte van de suppletie-elementen zichtbaar. Dit impliceert een afname in het areaal van de hoogste droogvalduurklassen. Deze afname vindt in deze periode – het volledig verdwijnen van de 1 ha met een droogvalduur van meer dan 80% daargelaten – met name plaats in de droogvalduurklasse van 70-80% (*Tabel B1-8*). Zo nam het areaal met een droogvalduur van 70-80% tussen februari 2020 en juni 2024 met 78% af. De ontwikkeling van de individuele suppletie-elementen wordt nader beschreven in paragraaf B1.6.



Figuur B1-34. Verschilkaarten van de (plaat-breed gecorrigeerde) LiDAR data van de Roggenplaat. In de eerste (2019-2018) en laatste (2024-2023) verschilkaart tonen de pijlen de autonome migratierichting van de bodemvormen en de cirkel de morfologische activiteit in het uiteinde van het Middengeultje. De contouren en nummering van de suppletie-elementen zijn vanaf 2020 aangegeven.

In Figuur B1-35 zijn de veranderingen in bodemhoogte van maart 2020 tot november 2024, gemeten langs de RTK raaien, ruimtelijk weergegeven. De hogere nauwkeurigheid van de RTK-dGPS raaien (± 2 cm) ten opzichte van de LiDAR data (± 15 cm) maakt een analyse van kleinere bodemveranderingen mogelijk, vandaar de meer gedetailleerde kleurschaal in Figuur B1-35 dan in Figuur B1-34.

Globaal gezien onderbouwen de RTK raaimetingen (Figuur B1-35) de patronen in de verschilkaarten van de LiDAR data (Figuur B1-34) en is zichtbaar dat de grootste veranderingen op of nabij de suppleties plaatsvinden. Suppletie-element 7 toont bijvoorbeeld een daling in hoogte en sedimentatie ten noorden van dit element. Ook de raaimetingen laten zien dat elementen 4, 5 en 7 de grootste lokale daling in bodemhoogte en daarmee afname in droogvalduur ondervonden. Direct ten noordwesten van de noordpunt van suppletie-element 5 is lokaal erosie zichtbaar (vorming afwateringsgeultje; zie voor verdere analyse paragraaf B1.7.4). Bij afgaand water blijft tussen suppletie-elementen 1 en 5 lokaal water staan waar de plaat dus lokaal niet droogvalt (veldwaarneming). Dat verklaart ook het gebrek aan LiDAR data (Figuur B1-34) op deze plek. In paragraaf B1.6 wordt nader ingegaan op de ontwikkeling van de suppletie-elementen.



Figuur B1-35. Verschil in bodemhoogte tussen maart 2020 (eerste meting na aanleg, in 4 dagen gemeten) en november 2024 (laatste volledige meting van 2024, in 3 weken gemeten) op basis van alle RTK raaien, geprojecteerd op een bovenaanzicht van de Roggenplaat. De RTK raaien zijn opgedeeld in segmenten van 50 m. Binnen elk segment is de gemiddelde bodemligging van het deel van de raai binnen het segment bepaald. De contouren van de Roggenplaat bij gemiddeld laagwater en gemiddeld water en de ingevulde contouren van de suppletie-elementen zijn, op basis van de LiDAR data van februari 2020, weergegeven.

B1.6 Evaluatie ontwikkeling suppletie-elementen

In deze paragraaf staat evaluatievraag 2 centraal:

Evaluatievraag morfologie 2

Hoe ontwikkelen de suppletie-elementen zich morfologisch en is dit afhankelijk van de locatie op de Roggenplaat?

Samenvattende beantwoording:

Hoewel de grootste bodemveranderingen in het eerste jaar na aanleg plaatsvonden, eroderen de suppleties gestaag door. De morfologische ontwikkelingen variëren sterk tussen de verschillende suppleties. Suppleties 1-3 (noordelijk gelegen) en 6 (gelegen achter een schelpenrug) zijn substantieel minder erosief dan suppleties 4, 5 en 7 (zuidelijk gelegen; voor suppletie 5 is met name het zuidelijke deel erosief). Dit komt overeen met de verwachting uit de ontwerpfase dat de zuidelijke suppleties sterker zouden eroderen door meer golfwerking. Om hierop te anticiperen, zijn de zuidelijke suppleties bewust hoger aangelegd dan de noordelijke suppleties.

Tussen februari 2020 (net na aanleg) en juni 2024 (laatste meting) zijn de noordelijke suppleties 1-3 met 4-7 cm afgenomen in gemiddelde hoogte, wat overeenkomt met een relatieve afname in gemiddelde dikte van respectievelijk 15%, 10% en 22%. De zuidelijke suppleties 4, 5 en 7 zijn in deze periode met 11-23 cm in gemiddelde hoogte afgenomen, wat neerkomt op respectievelijk 18%, 20% en 37% van hun oorspronkelijke gemiddelde dikte. Ondanks de relatief zuidelijke ligging van suppletie 6 is deze, waarschijnlijk door de beschutte ligging achter een schelpenrug en het binnenwandelen van deze schelpenrug, nagenoeg niet veranderd in gemiddelde hoogteligging (gemiddelde dikte is met 1% toegenomen).

De zuidelijke suppleties kennen niet alleen een grotere absolute hoogteafname, ook de afname in suppletievolume was voor deze suppleties een stuk groter: tot 37% voor suppletie 7 (de kleinste suppletie). Let wel, dit is geen (volledig) sedimentverlies van de Roggenplaat omdat het sediment gedeeltelijk in de nabijheid van de suppletie terecht is gekomen (zie onderliggende kennisvraag 2).

Binnen de suppleties is sprake van ruimtelijke variaties in ontwikkeling en vormveranderingen. Bijvoorbeeld, suppletie-element 7 erodeerde aan de loefzijde en de top, terwijl deze aan sedimentatie onderhevig was aan de lijzijde. Daarnaast zijn met name de zuidelijke suppletieranden minder steil geworden en zijn er op de zuidelijke delen van de zuidelijke suppleties megaribbels (zandgolven) gevormd. Op sommige delen van de meest erosieve suppleties bedroeg de erosie meer dan een halve meter.

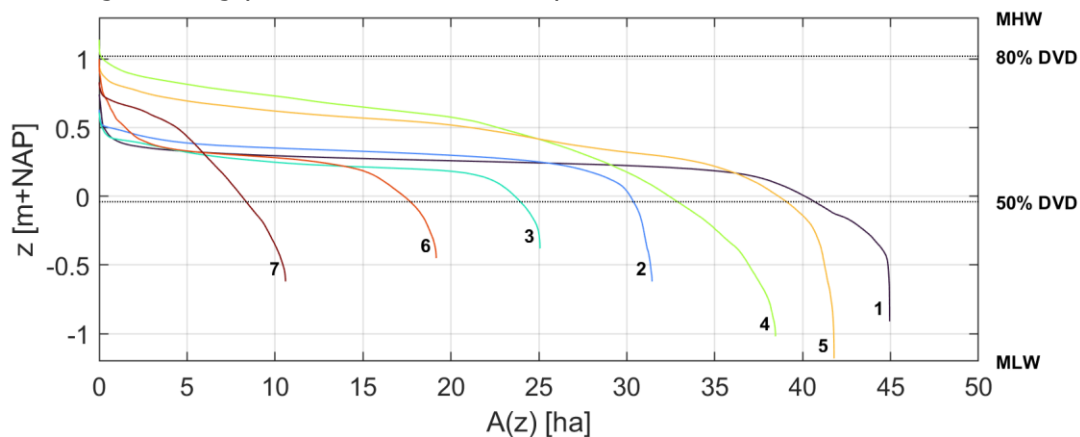
Hoewel de bodemveranderingen grotendeels het gevolg zijn van sedimenttransport, blijkt dat ook zettingen van de ondergrond hierin een rol speelden. Ondanks dat een precieze inschatting door meeton nauwkeurigheden en onzekerheden niet mogelijk is, is de gemiddelde zetting van de suppleties ingeschat op 0,6 cm/jaar (3 cm in 5 jaar) wat neerkomt op een volumeverlies van orde 12.000 m³/jaar.

In de LiDAR hoogtekaarten vanaf 2020 (Figuur B1-31), waar tevens de nummering van de elementen in is aangegeven, zijn de aangebrachte suppletie-elementen duidelijk te identificeren. Waar in de vorige paragraaf

de focus lag op de ontwikkeling van de plaat, wordt in deze paragraaf de morfologie van de suppletie-elementen nader beschouwd.

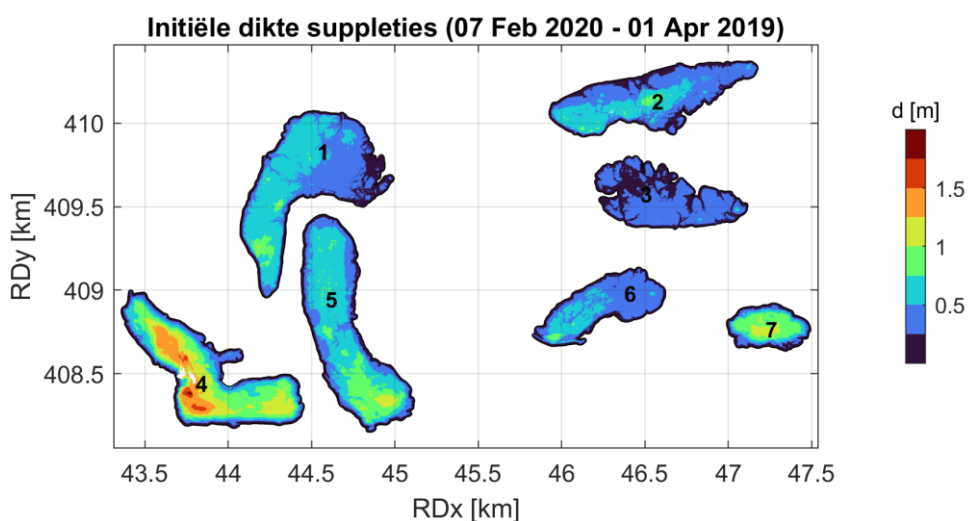
B1.6.1. Eigenschappen suppletie-elementen

Suppletie-elementen 4, 5 en 7 zijn het hoogst uitgevoerd (gemiddeld 8 cm hoger dan het gemiddelde van alle elementen; Tabel B1-9) en staken na aanleg lokaal tot 1 meter boven NAP uit (Figuur B1-36). De overige elementen zijn wat lager uitgevoerd en liggen voor het grootste deel enkele decimeters boven NAP en dus enkele decimeters boven de 50% droogvalduur klasse. Dit is goed zichtbaar in de hypsometrische curves van de individuele suppletie-elementen van februari 2020 (Figuur B1-36), 1,5 maand na voltooiing van het laatste suppletie-element. De aangelegde hogere hoogteligging (en daarmee dikkere sedimentlaag) voor suppleties 4, 5 en 7 is gekozen met het oog op de verwachte sterkere erosie aan de zuidrand van de Roggenplaat door golfwerking (van der Werf et al., 2016b).



Figuur B1-36. Hypsometrische curves van de individuele suppletie-elementen 1 t/m 7 op basis van de (suppletie-specifiek gecorrigeerde) LiDAR data van de Roggenplaat van februari 2020 (eerste opname na aanleg).

De initiële dikte van de suppletie-elementen (het verschil tussen de hoogteligging in april 2019 en februari 2020) varieert tussen de elementen en ook binnen de elementen (Figuur B1-37). De maximaal aangebrachte laagdikte is 1,9 m op suppletie-element 4. Op de aan de zuidkant gelegen suppleties 4, 5 en 7 is een dikkere sedimentlaag aangebracht dan op suppleties 1, 2 en 3 gelegen aan de noordkant van de Roggenplaat, zie ook Tabel B1-9. Deze verschillen in laagdikte zijn niet alleen het gevolg van verschillen in aanleghoogte t.o.v. NAP maar vooral ook het gevolg van ruimtelijke variaties in bodemligging vóór aanleg van de suppletie-elementen.



Figuur B1-37. Dikte van de zeven suppletie-elementen, gebaseerd op de LiDAR opnamen (suppletie-specifiek gecorrigeerd; paragraaf B1.2.3) van 1 april 2019 (vóór aanleg) en 7 februari 2020 (na aanleg). De nummering van de elementen is aangegeven.

Op basis van de suppletiecontouren (paragraaf B1.2.4) en de LiDAR opnamen van april 2019 (vóór aanleg) en februari 2020 (na aanleg) is het areaal, volume en de gemiddelde dikte van de suppletie-elementen in februari 2020 bepaald, zie *Tabel B1-9*. Deze hoeveelheden wijken iets af ten opzichte van de waarden zoals ingemeten door Boskalis (Aanlegdocument Boskalis 2020 in Walles et al., 2021b). Het totaalvolume van de suppleties ligt met 1.076.000 m³ bijvoorbeeld 5% lager dan de waarde zoals bepaald door Boskalis (1.134.000 m³; niet gebaseerd op de LiDAR data). Hier ligt een aantal mogelijke oorzaken aan ten grondslag. Ten eerste zijn de hoeveelheden in *Tabel B1-9* gebaseerd op metingen die enkele maanden later zijn uitgevoerd. De morfologie van de suppletie-elementen is dan al enigszins ontwikkeld (zeer waarschijnlijke verklaring; zie paragraaf B1.7.1). Ten tweede kunnen kleine verschillen in de contouren van de suppleties ook leiden tot kleine verschillen in de kentallen van de suppleties. Ten derde kunnen verschillen ook ontstaan door meetfouten.

Tabel B1-9. Kentallen van de suppletie-elementen op basis van de LiDAR data (suppletie-specifiek gecorrigeerd; paragraaf B1.2.3). Het oppervlakte (A), volume (V), de gemiddelde bodemligging (z_b) en gemiddelde dikte (d) zijn bepaald als het verschil tussen april 2019 en februari 2020. De ontwikkeling in volume (ΔV) en gemiddelde dikte/hoogte (Δd) van de elementen is bepaald als het verschil tussen februari en oktober 2020 en februari 2020 en juni 2024. Eventuele gaten in de LiDAR data zijn middels ruimtelijke interpolatie opgevuld.

Suppletie-element	A [ha]	V [10 ³ m ³]	z _b [m+NAP]	d [cm]	ΔV [10 ³ m ³ en %]		Δd [cm]	
	april 2019 - februari 2020				feb 2020 - okt 2020	feb 2020 - jun 2024	feb 2020 - okt 2020	feb 2020 - jun 2024
1	45	203	0,21	45	-16 (-8%)	-31 (-15%)	-4	-7
2	31	129	0,30	41	-2 (-2%)	-13 (-10%)	-1	-4
3	25	68	0,23	27	-1 (-2%)	-15 (-22%)	-1	-6
4	38	303	0,44	79	-16 (-5%)	-55 (-18%)	-4	-14
5	42	232	0,43	56	-10 (-4%)	-46 (-20%)	-2	-11
6	19	75	0,26	39	1 (2%)	1 (1%)	1	0
7	11	65	0,30	62	-4 (-6%)	-24 (-37%)	-4	-23
Totaal:	211	1076	0,32	51	-48 (-5%)	-183 (-17%)	-2	-9

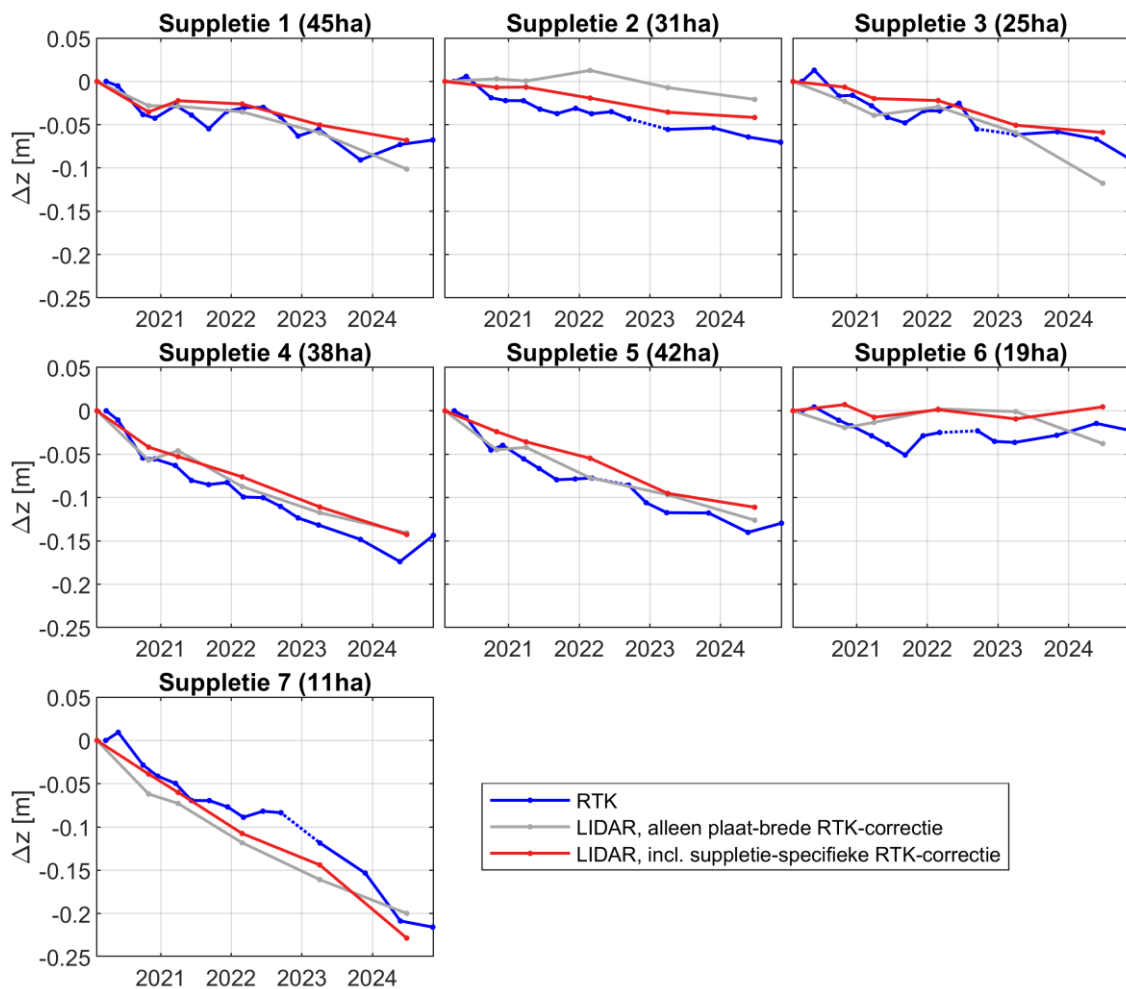
B1.6.2. Morfologische ontwikkeling van de suppletie-elementen

In de eerste vijf jaar na aanleg zijn de suppletie-elementen aan behoorlijke morfologische veranderingen onderhevig geweest, met substantiële verschillen tussen de verschillende suppletie-elementen. *Figuur B1-38* toont de ontwikkeling in gemiddelde hoogte op basis van de RTK en LiDAR metingen. Wat betreft de LiDAR data, zijn de tijdseries die ook voor lokale (suppletie-specifieke) bias gecorrigeerd (paragraaf B1.2.3) het meest betrouwbaar. Zeker voor de relatief onnauwkeurige LiDAR opname van 2024 is deze suppletie-specifieke correctie noodzakelijk gebleken om tot een betrouwbare inschatting van de suppletieontwikkelingen te komen (paragraaf B1.2.3).

Figuur B1-38 laat zien dat de sterkste veranderingen (voor met name suppletie 4) plaatsvonden in het eerste jaar na aanleg (zie ook *Figuur B1-34* en *Tabel B1-9*), al vertoont suppletie 7 aan het einde van de meetreeks juist weer een (tijdelijke) versnelling van de erosie. De morfologische veranderingen variëren sterk tussen suppleties. Het noordelijke suppletie-element 2 is bijvoorbeeld een stuk minder veranderlijk (verandering in gemiddelde dikte ≈ 1 cm) dan de zuidelijke elementen 4, 5 en 7 (tot 4 cm afname in gemiddelde dikte/hoogte over het eerste jaar). Zoals hiervoor al benoemd, was er voor deze elementen al in de ontwerpfase rekening gehouden met meer erosie door een grotere blootstelling aan golven (van der Werf et al., 2016b).

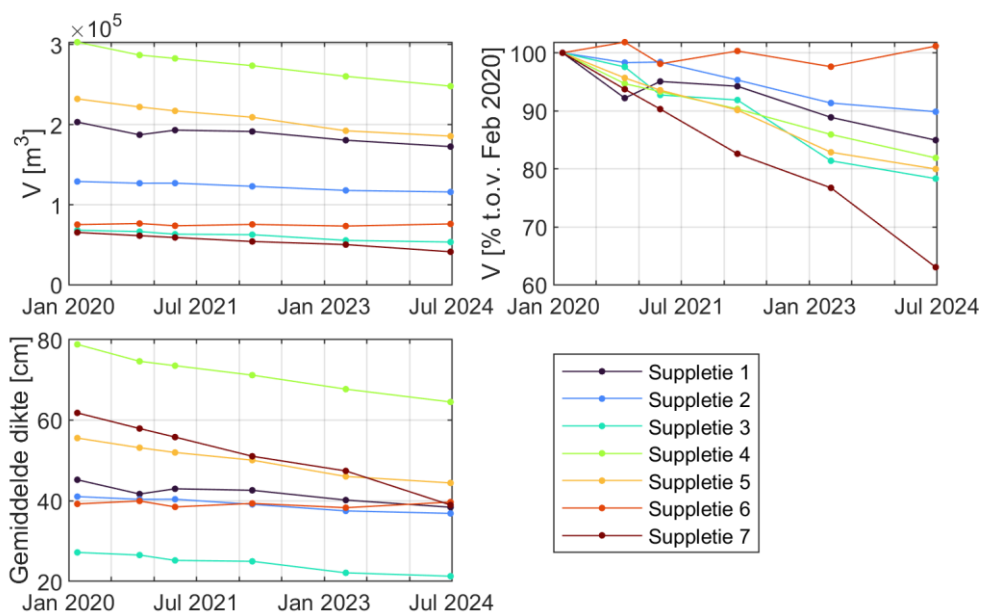
Ondanks dat deze metingen aanwijzingen geven voor relatief grote hoogteveranderingen in het eerste jaar, is het nog te vroeg om te concluderen dat daarmee de erosiesnelheid blijvend is afgenomen. Hoewel de RTK metingen van bijvoorbeeld suppletie-element 7 wel een geleidelijke afname in erosie tonen, wijken de metingen vanaf 2023 daar toch weer van af (gemiddelde bodemverandering vergroot weer). In het eerste jaar vonden uitzonderlijke stormen plaats (paragraaf B1.4) en het zou kunnen dat stormen de ontwikkeling van de suppleties sterk sturen (paragraaf B1.7.1). Aan de andere kant zou het ook kunnen dat suppletie-elementen minder eroderen naar mate de vorm van de suppleties aanpast. Het is echter waarschijnlijk dat de tijdschaal waarop de erosiesnelheden veranderen de huidige meetperiode (5 jaar) overschrijdt omdat de

vorm van de suppleties nog grotendeels intact is gebleven (geen volledige uitvlakking van de suppletie-elementen). Een verdere opvolging van de suppleties zal meer inzicht moeten geven in veranderingen in erosiesnelheden.



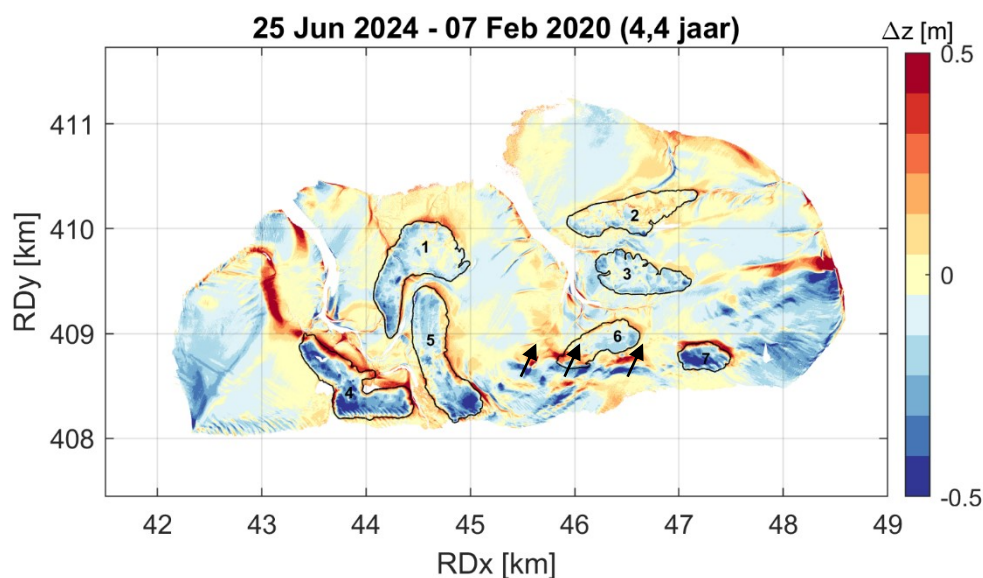
Figuur B1-38. Ontwikkeling van de gemiddelde dikte van de suppletie-elementen binnen de oorspronkelijke contouren t.o.v. de eerste opname (verschilt tussen de RTK en de LiDAR). Voor de ontwikkeling op basis van de RTK metingen is voor elk opnamemoment het gemiddelde van alle raaisegmenten genomen die vallen binnen het betreffende suppletiecontour (zie Figuur B1-11). Indien een suppletie tijdens een RTK meetcampagne niet is ingemeten, is dit met een stippellijn aangegeven. Voor de LiDAR tijdseries zijn zowel de data getoond op basis van de plaat-brede RTK-correctie als ook na een aanvullende suppletie-specifieke RTK-correctie (paragraaf B1.2.3). Verschillen tussen de LiDAR en RTK tijdseries kunnen komen doordat de RTK metingen niet noodzakelijk representatief zijn voor een geheel suppletie-element (beperkt aantal raaien).

In Figuur B1-39 zijn de tijdseries van de absolute ontwikkeling van het suppletievolumen, de relatieve volumeontwikkeling (t.o.v. de eerste meting na suppleren) en de ontwikkeling in gemiddelde dikte voor de zeven suppletie-elementen in één figuur weergegeven. Dit maakt een directe vergelijking tussen de suppletie-elementen mogelijk. Goed om op te merken is dat, omdat de ontwikkeling binnen de initiële suppletiecontouren is beschouwd, de volume ontwikkeling proportioneel is met de ontwikkeling in gemiddelde dikte. Ook deze figuur onderschrijft de substantiële verschillen in ontwikkeling tussen de suppletie-elementen. Suppletie-element 7 heeft het kleinste initiële volume en is relatief gezien het meest in volume veranderd (-37%, zie ook Tabel B1-9). Tussen februari 2020 en juni 2024 is de gemiddelde hoogte van de noordelijke suppleties met maximaal 7 cm afgenomen (suppleties 1-3 in Tabel B1-9 en Figuur B1-39), terwijl de gemiddelde hoogte van de zuidelijke suppleties tot 23 cm is afgenomen (suppleties 4-7). Opvallend is de afwijkende ontwikkeling van suppletie-element 6: deze heeft ondanks de relatief zuidelijke ligging – mede door de beschutte ligging achter een schelpenrug (paragraaf B1.7.1) – nagenoeg geen veranderingen ondergaan in gemiddelde dikte en volume.



Figuur B1-39. Ontwikkeling van het absolute suppletievolumen (a), relatieve suppletievolumen (t.o.v. februari 2020) (b) en de gemiddelde dikte/hoogte voor de zeven suppletie-elementen (c). Dit betreft de LiDAR data na de plaat-brede én suppletie-specifieke RTK-correctie (paragraaf B1.2.3).

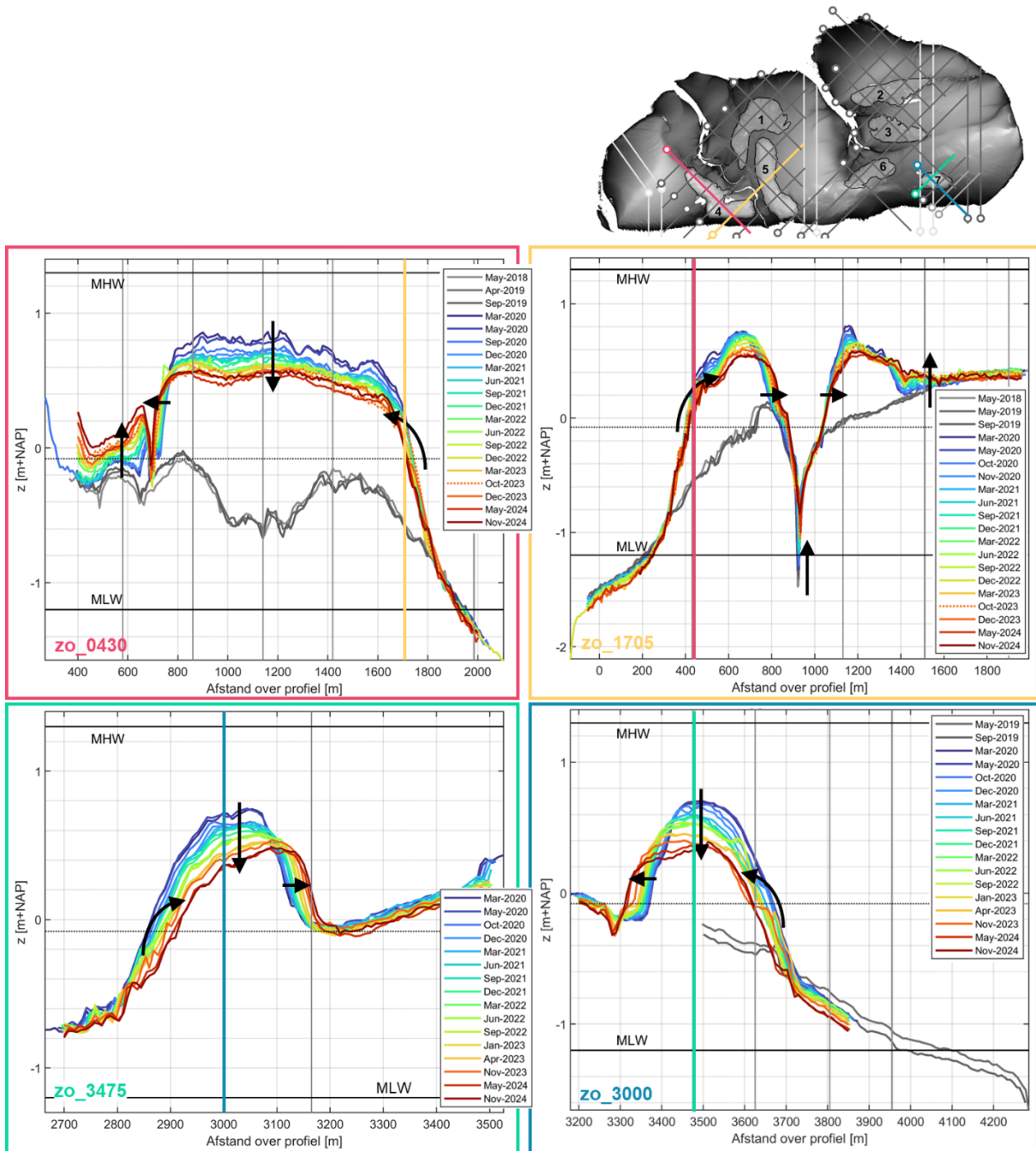
Belangrijk om te benadrukken is dat de voorgaande analyses de ontwikkeling in gemiddelde hoogteligging van de suppletie-elementen betreft. In werkelijkheid is er ook substantiële variatie in hoogteontwikkeling binnen de suppletiecontouren met lokaal uitschieters tot meerdere decimeters erosie (Figuur B1-40). Bijvoorbeeld, voor suppletie-element 7 is een patroon zichtbaar met erosie aan de loefzijde en de top van de suppletie, terwijl aan de lijzijde van de suppletie sedimentatie plaatsvindt. Voor suppletie-element 5 is het met name het zuidoostelijke deel dat sterk erodeert. Bij suppletie-element 6 is een invloed van de autonome ontwikkeling van de plaat zichtbaar: daar migreert een van de schelpenruggen (paragraaf B1.3) het suppletiecontour binnen. Ondanks deze ruimtelijke verschillen binnen de suppletiecontouren, staat nog steeds vast dat het de zuidelijke suppletie-elementen 4, 5 en 7 zijn die het sterkste eroderen.



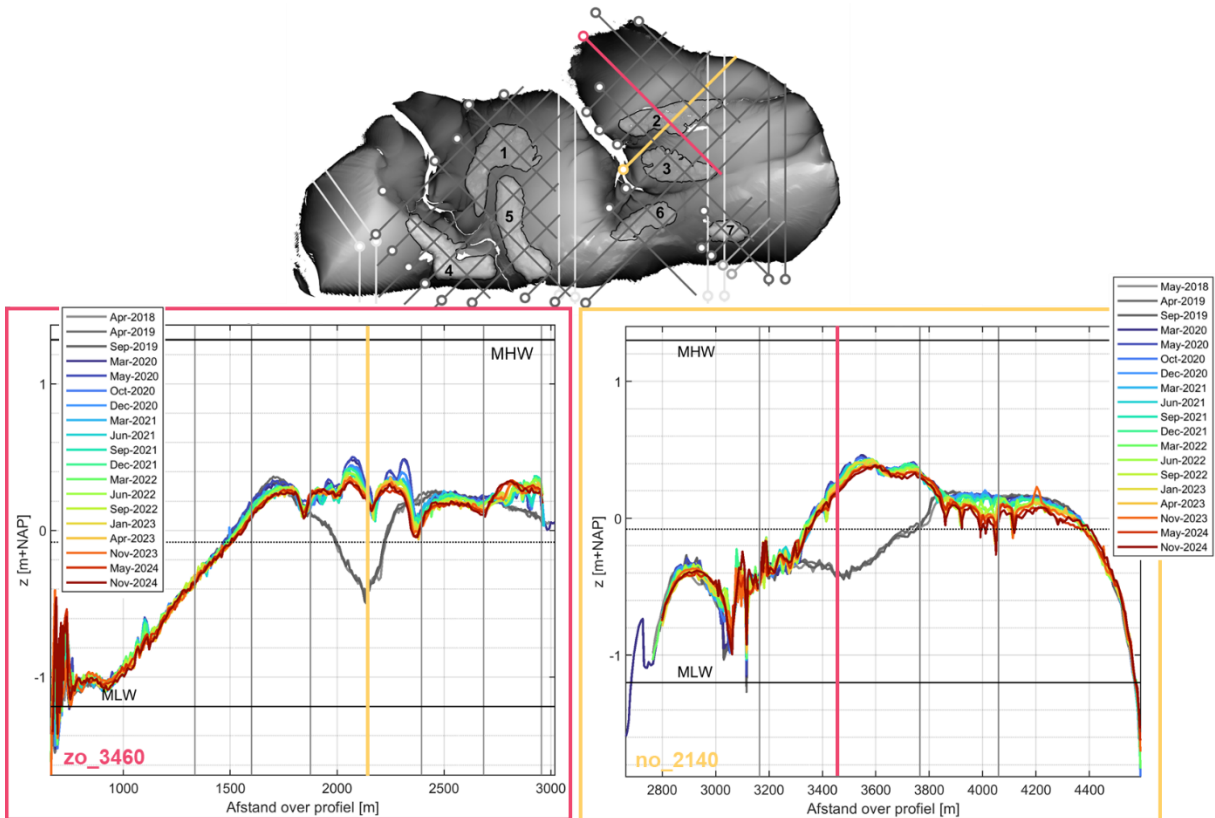
Figuur B1-40. Verschilkaart van de (plaat-breed gecorrigeerde) LiDAR data tussen februari 2020 en juni 2024 van de Roggenplaat. De pijlen tonen de autonome migratierichting van de bodemvormen met ook het binnenwandelen van de bodemvorm bij suppletie-element 6.

Ook uit de RTK metingen volgt dat de zuidelijke suppletie-elementen 4, 5 en 7 het meest erosief zijn (Figuur B1-41). De noordelijke suppletie-elementen zijn stabiel (Figuur B1-42). Opvallend is ook dat het microreliëf (variëaties in hoogteligging over orde 100 m) van de zuidelijke suppleties sneller verdwijnt dan het microreliëf van de noordelijke suppleties (ook zichtbaar in de bodemhellingkaarten op basis van de LiDAR metingen in Figuur B1-44). In de eerste vijf jaar is er lokaal tot 40 cm verlaging geobserveerd in deze RTK

metingen (Figuur B1-41). De grootste erosie hangt hierbij samen met het flauwer worden van de hellingen (zie ook *Figuur B1-44*). Deze ontwikkeling verloopt relatief geleidelijk, wat erop wijst dat niet alleen de meest extreme stormen maar ook de meer frequent voorkomende omstandigheden de suppleties uitvlakken. *Figuur B1-41* laat verder nog zien dat de zuidelijke suppleties eroderen en richting het noord(-oost)en migreren. Dit is in overeenstemming met *Figuur B1-40*. Opvallend is dat de positie van de zuidwestrand van suppletie 4 hierbij relatief stabiel is (no_1705 in *Figuur B1-41*), terwijl de zuidwestrand van suppletie 7 naar het noordoosten migreert (no_3475 in *Figuur B1-41*). Suppletie 7 is dus meer 'aan de wandel' dan suppletie 4.

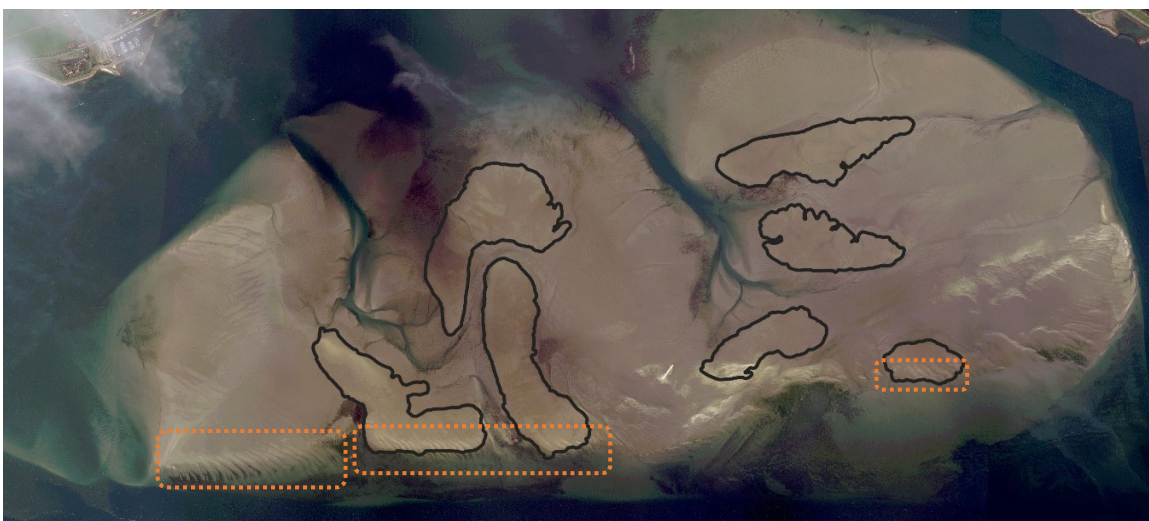


Figuur B1-41. Profielen op basis van de RTK metingen voor vier raaien in het zuiden van de Roggenplaat: zo_0430, no_1705, no_3475 en zo_3000. De locatie van deze raaien is weergegeven in de overzichtsfiguur rechtsboven waarbij de cirkels het nulpunt aangeven. De verticale lijnen in de figuren komen overeen met de kruising met andere raaien. Profielen vóór de aanleg van de suppleties zijn weergegeven in grijsinten.

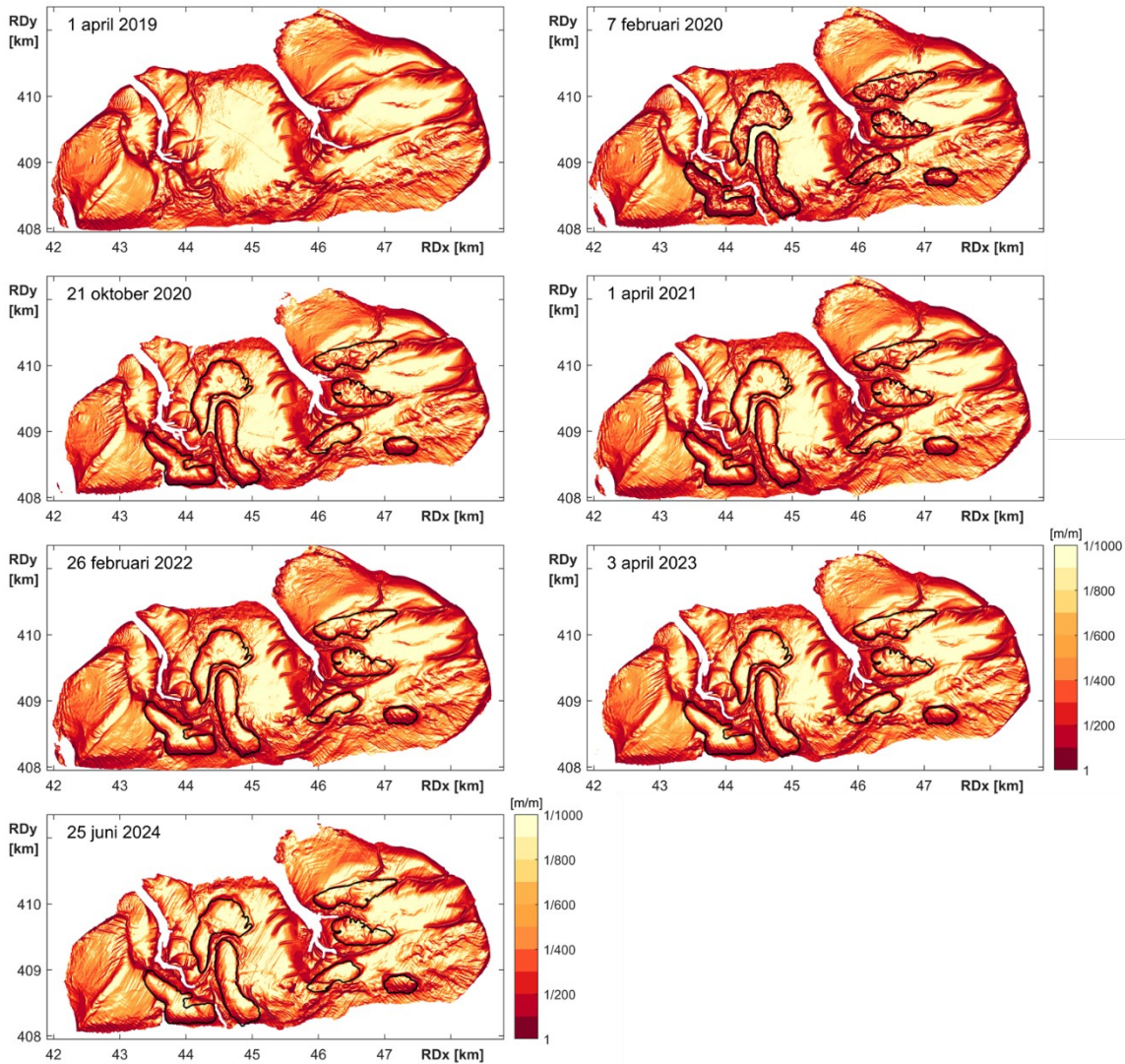


Figuur B1-42. Profielen op basis van de RTK metingen voor twee raaien in het noorden van de Roggenplaat: zo_3460 en no_2140. De locatie van deze raaien is weergegeven in de overzichtsfiguur rechtsboven waarbij de cirkels het nulpunt aangeven. De verticale lijnen in de figuren komen overeen met de kruising met andere raaien. Profielen vóór de aanleg van de suppleties zijn weergegeven in grijstinten.

In de ontwikkeling van de bodemhellingkaarten (Figuur B1-44) is zichtbaar dat de suppletieranden relatief steil zijn ten opzichte van de andere delen van de plaat. Daarnaast is, zoals reeds benoemd, zichtbaar dat het microreliëf dat tijdens de uitvoering op de suppletie-elementen is gevormd, gedeeltelijk verdwijnt (voor de zuidelijke suppleties sneller dan voor de noordelijke suppleties). Daarentegen ontstaan juist megaribbels (zandgolven) op de zuidelijke randen van de zuidelijke suppleties in de periode na aanleg, gekenmerkt door afwisselend flauwe en steile bodemhellingen. Dergelijke megaribbels zijn ook aanwezig in de niet-gesuppleerde gebieden in het zuidelijke deel van de Roggenplaat en in de bodemhellingkaart van 2019 (Figuur B1-44) en zijn dus niet noodzakelijk suppletie-gerelateerd. Deze megaribbels met een golflengte van 25-40 meter en een noordoostelijke oriëntatie (haaks op de kam van de megaribbels) zijn zichtbaar op satellietbeelden (Figuur B1-43).



Figuur B1-43. Megaribbels zichtbaar (gebieden gemarkeerd in oranje) op de satellietbeelden van september/oktober 2023 in de zuidelijke zone van de Roggenplaat en specifiek de zuidelijke delen van de zuidelijke suppleties. Suppletiecontouren zijn in zwart getoond. Bron: Satellietdataportaal / NSO.



Figuur B1-44. Kaart van de bodemhelling op basis van de LiDAR data voor de Roggenplaat (hoe roder, hoe steiler de helling). In paragraaf B1.2.2 is toegelicht hoe de bodemhelling berekend is. De contouren van de suppleties zijn vanaf 2020 in zwart weergegeven.

B1.6.3. Zetting van de ondergrond

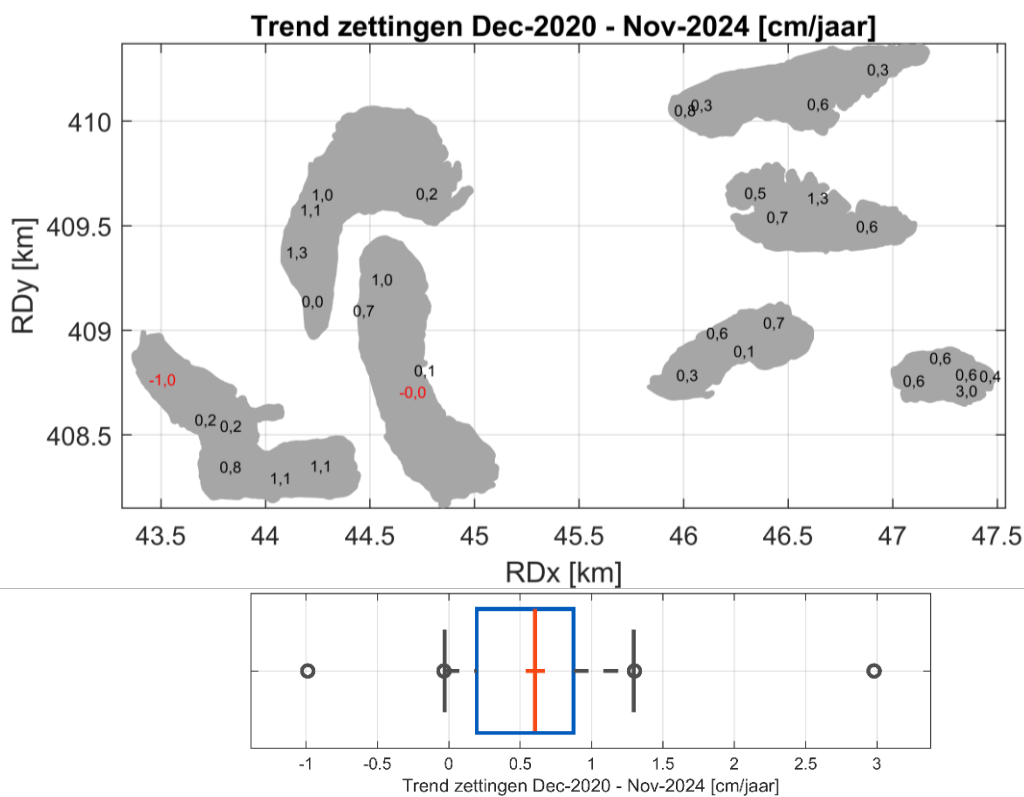
Omdat de suppletie de ondergrond belast, kan deze resulteren in zettingen van de bodem. Figuur B1-45 geeft voor alle zakbaken (zie paragraaf B1.2.2 voor achtergrondinformatie) de zettingen over deze meetperiode middels een lineaire trendbenadering van de onderliggende hoogtemetingen (Figuur B1-46). Zoals zichtbaar, wijzen de zakbaken – twee uitzonderingen daargelaten – op een netto verlaging van de bodem. De mediane en gemiddelde zetting van de zakbaken komen beide neer op 0,6 cm/jaar (het wegfilteren van de uitschieters in Figuur B1-45 verandert deze waarde niet). Het zettingsverlies van de suppletie van 211 ha kan daarmee worden ingeschat op orde 12.000 m³/jaar.

Bij deze inschatting van de zettingen passen wel kanttekeningen. Ten eerste bestaan er vraagtekens over de kwaliteit van de zakbaakdata omdat diverse zakbaken scheefstand hebben ondervonden. Als er sprake was van beperkte of constante scheefstand heeft dit de inschatting van de zettingen niet beïnvloed, maar dat is niet bekend. Ten tweede toont de zakbaakendata tot eind 2022 (T3 rapportage; Escaravage et al., 2024) geen eenduidige ontwikkeling (diverse zakbaken wezen op netto verhoging). Dit kan veroorzaakt zijn door meeton nauwkeurigheden (ruis als zijnde variatie rondom het signaal) in de relatief korte tijdseries (het signaal). Een individuele meting met RTK-dGPS heeft bijvoorbeeld een onzekerheid van meer dan een centimeter. Ten derde zijn er in de onderliggende tijdseries eigenaardigheden zichtbaar die niet door zettingen verklaard kunnen worden. Bijvoorbeeld, de plotselinge en substantiële daling over de laatste metingen van zakbaak 7-28 in Figuur B1-46 – met als gevolg een trend van 3,0 cm/jaar – kan niet door

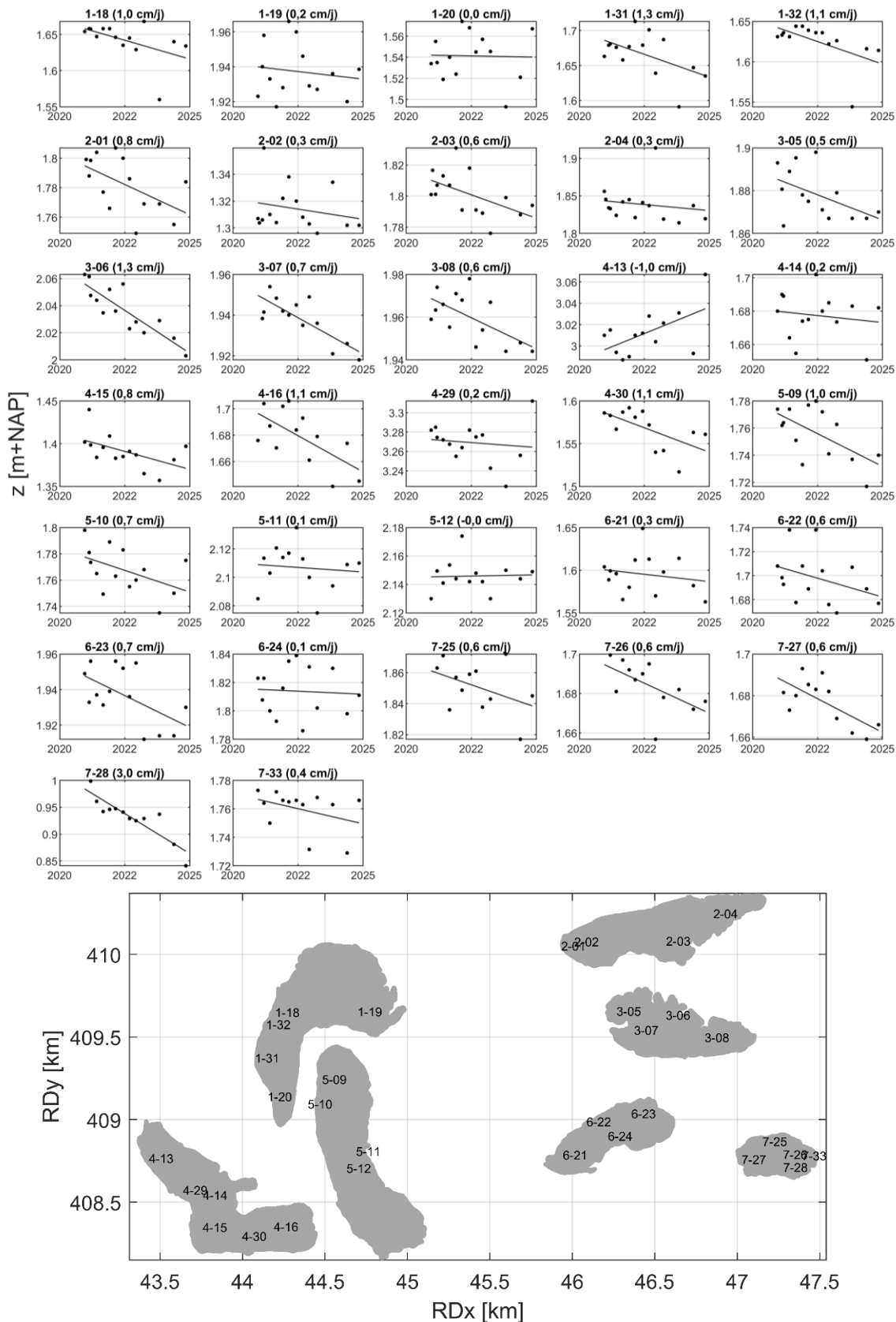
zettingen verklaard worden omdat de belasting van de ondergrond in deze periode niet plotseling is toegenomen. Mogelijk hebben de megaribbels aan de zuidrand van suppletie 7 (Figuur B1-44 en Figuur B1-43) de zakbaak in beweging gebracht.

Deze kanttekeningen beperken de waarde die kan worden gehecht aan de berekende zettingen. Gegeven deze kanttekeningen dienen de grootte van de mediane/gemiddelde zettingen (0,6 cm/jaar) en het zettingsverlies (orde 12.000 m³/jaar) slechts als indicatieve schatting te worden gebruikt. Wel staat vast dat er over deze periode (2020-2024) nog zettingen hebben plaatsgevonden. Immers, anders zouden niet nagenoeg alle zakbaken op netto zettingen wijzen (Figuur B1-45).

Hoewel zettingen relevant zijn gebleken, staat vast dat de waargenomen bodemveranderingen op de suppletie voor het grootste deel morfologisch van aard zijn. Zeker de relatief sterke erosie van de zuidelijke suppletie-elementen kan niet door zettingen verklaard worden. Bijvoorbeeld, de orde 20 cm verlaging waargenomen op suppletie 4 met de LiDAR/RTK in februari 2020 (Figuur B1-47) was ook waargenomen met de SED (Figuur B1-49). Dit instrument stond gefundeerd in de bovenlaag van de suppletie en zou deze bodemverlaging niet geregistreerd hebben als deze grotendeels het gevolg van zetting was (dan zette het instrument mee zonder de bodemverandering te registreren).



Figuur B1-45. Boven: ruimtelijke weergave van de zetting [cm/jaar] van de zakbaken op de suppleties tussen december 2020 en november 2024 met op de achtergrond de suppletiecontouren in grijs. De zwarte getallen representeren zetting (de hoogte van de zakbaken is afgenomen) en de rode getallen representeren 'negatieve' zetting (de hoogte van de zakbaken is toegenomen, potentieel meetartefact). Onder: een boxplot van de zettingstrends van de zakbaken met de mediaan als rode streep, het eerste en derde kwartiel als blauwe strepen, de boven- en ondergrens als grijze strepen en de uitschieters als grijze cirkels. De onderliggende data is weergegeven in Figuur B1-46.



Figuur B1-46. Boven: de onderliggende data van de zakbaken (hoogtemetingen t.o.v. NAP) voor elke meetlocatie weergegeven met de zwarte punten en een lineaire trendlijnbenadering (met de waarde van de lineaire trend aangegeven in de titel van elk deelfiguur). Onder: naamgeving van de meetlocaties (beginnend met het suppletienummer) zoals ook boven aangegeven bij de deelfiguren met op de achtergrond de suppletiecontouren in grijs.

B1.7 Verdiepend morfologisch procesbegrip

Deze gehele paragraaf draagt bij aan het verklaren en duiden van de processen die de ontwikkelingen van de Roggenplaat en de suppleties sturen. Hiermee geeft deze paragraaf antwoord op de centrale kennisvraag:

Centrale kennisvraag morfologie

Welke processen liggen ten grondslag aan de morfologische veranderingen van de Roggenplaat en specifiek de suppleties?

Samenvattende beantwoording:

De Roggenplaat bestaat uit verschillende morfologische eenheden (o.a. gehele plaat, suppleties, schelpenruggen, afwateringsgeulen en microreliëf) die veranderen onder invloed van wind, golven en getij met variaties in de tijd en over de ruimte. De suppleties erodeerden relatief sterk in het eerste jaar na aanleg door uitzonderlijke stormen en initieel relatief grote gradiënten in hoogteligging. Hierna zette de erosie geleidelijk door. Kortom, niet alleen extreme weersomstandigheden, maar ook vaker voorkomende windsnelheden en golven dragen in combinatie met het getij bij aan de lange termijn morfologische ontwikkelingen.

Het ontwerp (o.a. ligging en hoogte) van de suppleties beïnvloedt de mate van morfologische veranderingen. Zoals in het ontwerp was voorzien, is er een duidelijk onderscheid in de morfologische ontwikkeling tussen de zuidelijke en noordelijke suppleties. De zuidelijke suppleties, met uitzondering van suppletie 6 gelegen achter een schelpenrug, zijn blootgesteld aan relatief veel golfaanval en daarmee grote bodemschuifspanningen. Bovendien versterken de hogere vormgeving en daarmee de steile suppletieranden de transportgradiënten en daarmee de erosie. Versterkt door wind-gedreven stroming en luwte-vorming achter de suppleties, migreren met name de zuidelijke suppleties in noordoostelijke richting met depositie in de lijzijde. Het zuid-noord onderscheid tussen de suppleties uit zich ook in verschillen in korrelgrootteontwikkelingen. Waar de noordelijke suppleties na aanleg enigszins verfijnen en slib invangen, blijven de zuidelijke suppleties relatief grof. Kortom, ruimtelijke verschillen in de hydro-morfologische omstandigheden resulteren in verschillen in de suppletieontwikkelingen.

Lokale hoogtevariëaties op de suppleties vlakken in de eerste jaren na aanleg grotendeels uit. Net als voor de grootschalige ontwikkelingen van de suppleties, spelen niet alleen stormen maar ook vaker voorkomende omstandigheden hierin een rol. Aan de zuidrand van de zuidelijke suppleties ontstaan juist megaribbels (zandgolven) die ook al vóór aanleg aanwezig waren in dit relatief onbeschutte deel van de plaat. Het lijkt dat oesterriffen door golfdemping de suppletievoet in enige mate kunnen stabiliseren, al resulteert dit niet in minder erosie van de hoge suppletiedelen.

Niet-gesuppleerde gebieden op de Roggenplaat en ook het Middengeultje hebben beperkte veranderingen in morfologische ontwikkeling ondergaan, vorming van lokale afwateringsgeultjes daargelaten. Dit komt mede doordat de stroming op de Roggenplaat en in het Middengeultje beperkt is veranderd door de suppleties.

Deze centrale kennisvraag wordt in de volgende paragrafen beantwoord aan de hand van de verschillende deelvragen.

B1.7.1. Wanneer en waar erosie optreedt

Onderliggende kennisvraag morfologie 1

Wanneer en waar treedt vooral erosie op (bijvoorbeeld bij stormen)?

Samenvattende beantwoording:

De suppleties ontwikkelen zich morfologisch door een samenspel van golfwerking, wind-gedreven stroming en getij. De suppletieontwikkelingen variëren in tijd en ruimte. In het eerste jaar na aanleg erodeerden met name de zuidelijke suppleties 4, 5 en 7 sterk. Enerzijds komt dit door uitzonderlijke stormen in februari 2020. Anderzijds komt dit door de aanvankelijk grote hoogteverschillen binnen de relatief hoge zuidelijke suppleties. Deze hoogteverschillen leidden tot grote gradiënten in sedimenttransport, wat resulteerde in relatief grote bodemveranderingen. Ter illustratie, lokaal is ruim 10 cm afslag waargenomen op suppletie 4 tijdens de februaristormen van 2020, en meer ruimtelijk verspreide afslag (tot 5 cm) rondom de plaatranden tijdens stormen in februari 2022.

Er kan echter (nog) niet gesproken worden van een structurele afname in erosie van de suppleties als geheel. De RTK-profielen wijzen op relatief geleidelijke morfologische ontwikkelingen. Zo migreert de lijzijde van suppletie 7 – de meest dynamische suppletie – tot nu toe relatief monotoon met 10 m/jaar. Het zijn dus niet alleen extreme stormen maar ook vaker voorkomende omstandigheden die de suppleties doen eroderen.

Het microreliëf dat tijdens de aanleg op de suppleties was gevormd, is in de eerste jaren al grotendeels uitgevlakt. De hoogte van het microreliëf op suppletie 3 nam bijvoorbeeld in twee jaar al af van 20 cm naar 5 cm, met één-derde van deze uitvlakking al in februari-maart 2020 (mede als gevolg van de februaristormen). Het microreliëf heeft dus een morfologische levensduur van enkele jaren en kan dus maar beperkte ecologische meerwaarde geven (morfologische diversiteit).

Ruimtelijke variaties in stroming zijn te beperkt om verschillen in ontwikkelingen van de suppleties te kunnen verklaren. Golfsimulaties laten daarentegen zien dat de zuidrand van de plaat en de zuidelijke suppleties (4, 5 en 7) sterk door golven worden beïnvloed. Juist in deze gebieden is de hoogteligging het meest veranderd. De noordelijke suppleties liggen juist relatief beschermt, net als suppletie 6 die achter een schelpenrug ligt. Daarom is het conform de verwachtingen van de ontwerpstudie dat suppleties 4, 5 en 7 het sterkst eroderen. Luwtewerking (vorming van golf-luwe gebieden) achter de suppletie blijkt beperkt tot orde 100-200 m.

Morfologische ontwikkelingen in de tijd

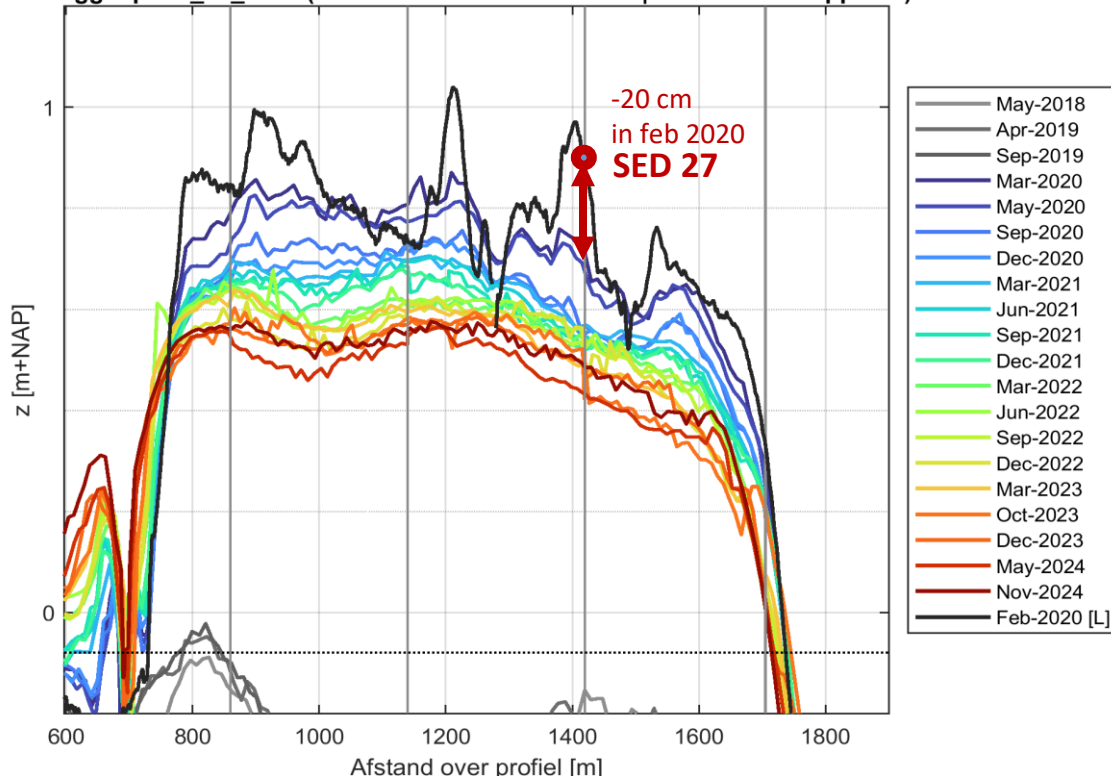
In het eerste jaar na aanleg waren de morfologische veranderingen van de suppletie relatief groot (zie ook paragraaf B1.6.2). Net als in andere intergetijdengebieden (Le Hir et al., 2000) vindt erosie op de Roggenplaat mede plaats door een samenspel van golfwerking, wind-gedreven stroming en getij. Stormen spelen hierin een belangrijke rol. Erosie door stormen treedt voornamelijk op bij de randen van de plaat en op de hoger liggende (hoofdzakelijk zuidelijke) suppletie-elementen. Golven bereiken ondiep water, breken en verliezen daardoor hun energie. Sediment van de plaat komt in suspensie in de waterkolom, en wordt vervolgens getransporteerd naar beschuttere delen (zie ook paragraaf B1.7.2). Het centrale deel van de plaat wordt hierdoor grotendeels beschermd tegen doordringende golfenergie. De precieze locatie van

breking is afhankelijk van de waterstanden en de wind-/golfrichting. Tijdens de sluiting van de Oosterscheldekering wordt voor de waterstand aan de binnenzijde een vast streefpeil aangehouden. Het gevolg is dat er gedurende de sluiting vrijwel constante waterstanden zijn, waardoor de erosie zich in een bepaalde zone concentreert. Om de intergetijdengebieden en schorren zo goed mogelijk te beschermen, wordt de zogenaamde 1-2-1 wisselstrategie gehanteerd indien een sluiting gedurende meerdere hoogwatertoppen noodzakelijk is (een zogenaamde meertopssluiting): tijdens het eerste hoogwater wordt het binnenpeil op NAP+1 m gehouden, en voor het volgende hoogwater NAP+2 m, en vervolgens NAP+1 m indien mogelijk en nodig. Ondanks deze wisselstrategie, zorgt dit streefpeil ervoor dat tijdens stormen de golfenergie focust op bepaalde delen van de plaat voor vele opvolgende uren voor beperkte waterdiepten (b.v. de plaatranden en/of de suppleties). Juist de combinatie van vele uren aan grote golven, wind-gedreven stroming en beperkte waterdiepten maakt intergetijdengebieden lokaal kwetsbaar voor grote morfologische veranderingen (Green & Coco, 2014; De Vet et al., 2020).

De mate van bodemveranderingen zijn niet alleen afhankelijk van de locatie, zoals hierboven benoemd, maar ook van de hoogteligging van de gesuppleerde gebieden en specifiek voor de eerste jaren na aanleg de mate van aangelegd microreliëf. Hoe hoger de suppleties ten opzichte van de omliggende plaat, hoe groter lokale gradiënten in sedimenttransport zullen zijn, wat leidt tot erosie. Ook de helling van de bodem bepaalt hoe breed de brekerzone is, wat weer de sterkte van de transportgradiënten en daarmee bodemveranderingen beïnvloedt (De Vet et al., 2020). Het microreliëf (waargenomen tot ongeveer 40 cm) op de suppleties is toegelaten tijdens het suppleren om de uitvoerbaarheid te vereenvoudigen. Aanvullend was de gedachte dat het microreliëf als neveneffect herstel van het bodemleven wellicht zou bevorderen. Zoals benoemd in paragraaf B1.6.2 is het microreliëf op de suppleties echter al in de eerste jaren na aanleg sterk afgenomen. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar in de raai in *Figuur B1-47* maar ook in de bodemhellingkaarten op basis van de LiDAR metingen in *Figuur B1-44*.

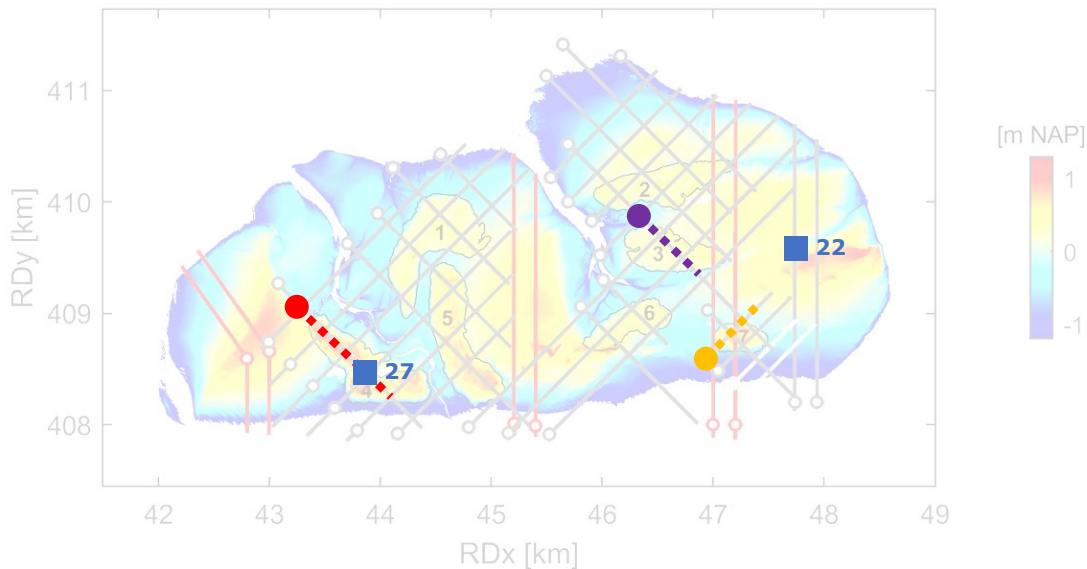
Zoals beschreven in paragraaf B1.4.1 waren met name de februarimaanden van de jaren 2020 en 2022 erg stormachtig. De erosie die optrad is zichtbaar in de LiDAR opnamen (*Figuur B1-34*), die met name afslag registreren van het zuidelijk deel van suppletie-elementen 4, 5 en 7, gelegen aan de zuidelijke rand van de Roggenplaat. Echter, omdat het tijdsinterval tussen de LiDAR metingen groot is, en de periode om de stormen heen ook wordt meegenomen in de verschilkaarten, geeft de combinatie met de RTK raaien door de hogere meetfrequentie een accurater beeld van de stormeffecten. *Figuur B1-47* toont de morfologische ontwikkeling op suppletie 4, op het zuidwesten van de Roggenplaat. Het microreliëf dat was aangelegd verdwijnt voor een groot deel tussen de LiDAR opname van 7 februari 2020 (zwarte lijn in de figuur) en de RTK meting in maart 2020 (donkerblauwe lijn).

Roggenplaat_zo_0430 (intersectie 1/2 vanaf zuiden | 125m naast suppletie)

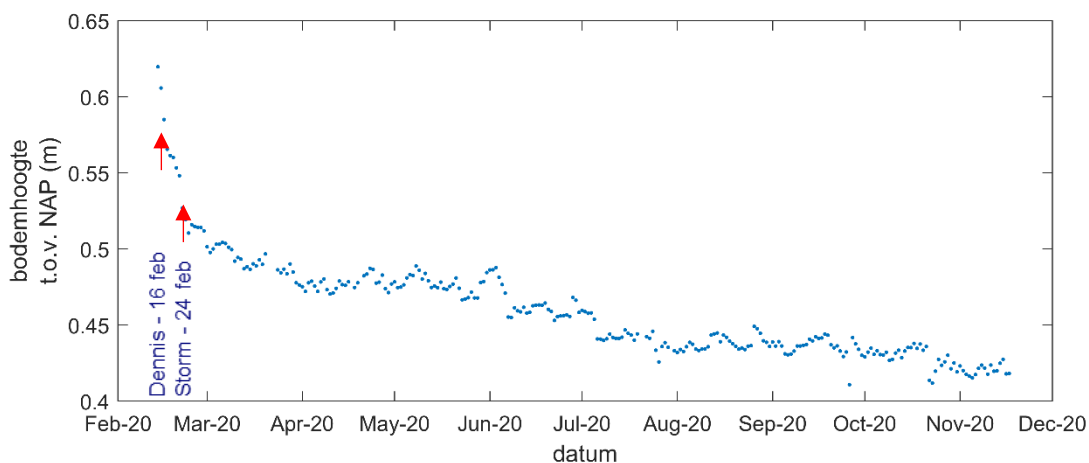


Figuur B1-47. Profiel op basis van de RTK metingen langs raai zo_0430 in het zuiden van de Roggenplaat. Aanvullend is ook de LiDAR data direct na suppleren (februari 2020) geïnterpoleerd langs dit profiel (in de legenda gemarkeerd met [L]). De locatie van deze raai is weergegeven middels een rode stippellijn in Figuur B1-48. De verticale lijnen komen overeen met de kruising met andere raaien. Profielen vóór de aanleg van de suppleties zijn weergegeven in grijs tinten.

In Figuur B1-47 is ook de locatie van een SED sensor weergegeven die bovenop het microreliëf was geïmplementeerd en daarmee inzicht geeft in de hoogteontwikkeling van dit microreliëf. In tegenstelling tot de andere SED sensoren op de Roggenplaat (Figuur B1-48) – waarin de trends in ontwikkeling de dagelijkse variaties in het signaal niet of maar beperkt overstegen – toont deze SED sensor op positie 27 op suppletie 4 wel een duidelijke hoogteafname door stormen (Figuur B1-49). Het aanwezige microreliëf neemt bijvoorbeeld sterk af in februari 2020 (direct na suppleren). Net na de plaatsing van SED 27 in 2020, is er in de tweede helft van februari ruim 10 cm aan bodemverlaging gemeten. Deze hoogteafname vond plaats tijdens een periode met twee westerstormen op 16 en 24 februari 2020, met golfhoogtes tot 1,5 m uit zuidwestelijke richting. De grootste bodemhoogte-afnames zijn gemeten op 16, 17 en 22 februari met 2 cm afslag per dag, en op 23 en 24 februari met bodemhoogte afnames van 0,8 cm. Het feit dat slechts SED 27 in 2020 substantiële stormafslag laat zien, is mede te verklaren door de locatie van deze sensor. Deze was namelijk geïmplementeerd vlak bij de geëxponeerde zuidrand van de Roggenplaat, en met een relatief hoge bodemligging (nagenoeg bovenop het microreliëf) waardoor deze sterk bloot gesteld werd aan golfinvloeden.



Figuur B1-48. Locatie van de SED sensoren (blauwe vierkanten) waarvan de data in Figuur B1-49 (SED 27 in 2020), Figuur B1-50 (SED 27 in 2022) en Figuur B1-51 (SED 22 in 2022) zijn weergegeven. De rode stippellijn toont de RTK raai die wordt weergegeven in Figuur B1-47, in paars de RTK raai die wordt weergegeven in Figuur B1-52 en in oranje de RTK raai zoals gepresenteerd in Figuur B1-53. Op de achtergrond zijn enigszins vervaagd (voor de leesbaarheid van de eerdergenoemde elementen) de hoogteligging van de Roggenplaat (februari 2020) en de overige RTK raaien ter referentie weergegeven.

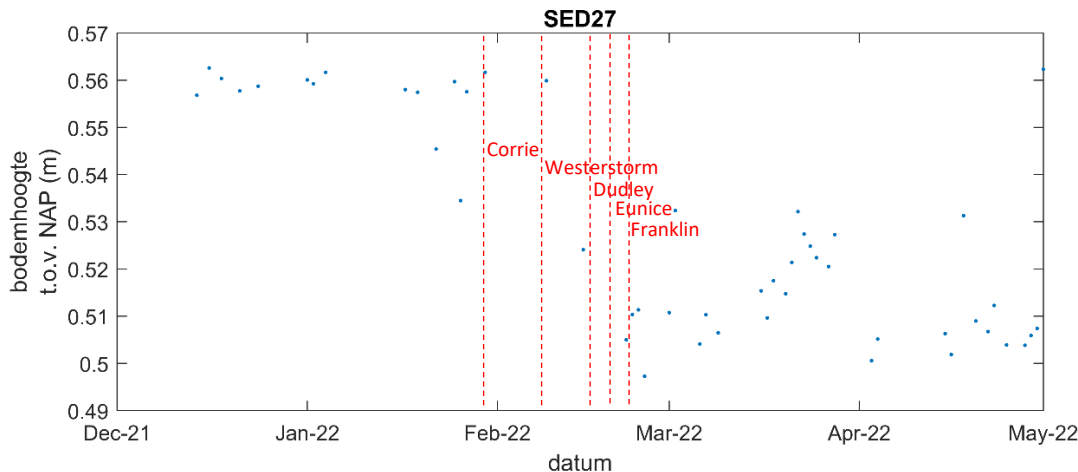


Figuur B1-49. Bodemhoogteveranderingen gemeten met akoestische SED 27 (suppletie 4; Figuur B1-48), tussen 14 februari en 17 november 2020. In februari 2020 zijn er vier stormen opgetreden; op 9 februari storm Ciara, op 11 februari een westerstorm, op 16 februari storm Dennis en op 24 februari nogmaals een westerstorm.

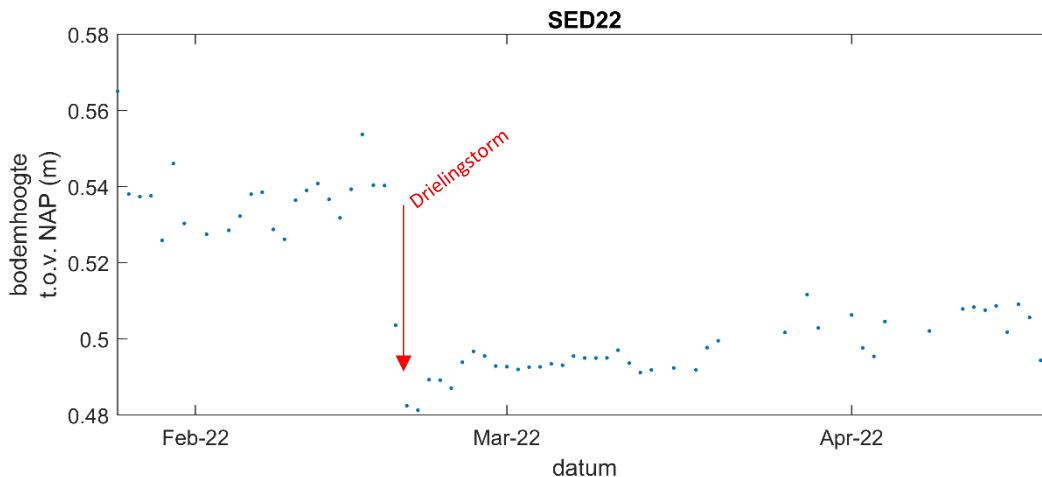
Tijdens de stormen in februari 2022 werd slechts door enkele sensoren afslag gemeten die boven de dagelijkse variaties uitkwam. De afslag beperkte zich tot zo'n 2,5-5 cm, en is gemeten door de sensoren langs de plaatranden. Net als in de meetperiode van 2020 heeft SED locatie 27 aan de zuidrand van de plaat afslag gemeten rondom de opgetreden stormperiodes, met in totaal 5 cm tussen 9 februari en 23 februari (Figuur B1-50). Helaas is er niet elke dag een meting beschikbaar. Ook aan de oostelijke zijde van de Roggenplaat, op locatie 22, is een duidelijke afname van 5 cm te zien, maar dan met name later in de maand, van 19 tot 21 februari 2022 ten tijde van de drielingstorm (paragraaf B1.4). Daarbij is er ook door SED 29 (tussen suppletie 4 en 5) en SED 32 (ten noorden van suppletie 1) een scherpe bodemhoogteverlaging van 2,5 cm gemeten rond 19 februari 2022 (zie Figuur B1-10 voor locaties).

Omdat de Waverider wegens onderhoud de tweede helft van februari 2022 niet heeft gemeten, kan niet middels golfkarakteristieken worden geïdentificeerd waarom de afslagpatronen dusdanig verschillend zijn tussen de SED locaties in deze februarimaand. Het is mogelijk dat de hoge waterstanden tijdens de drielingstorm (waterstanden van 2,5 m tijdens twee hoogwaters) hebben gezorgd voor meer focus van de golfenergie op

de hogere delen van de zandplaat, dan tijdens de storm op 6 februari waar de waterstanden lager waren (maxima van 1,3 m en 1,8 m tijdens de twee hoogwaters).



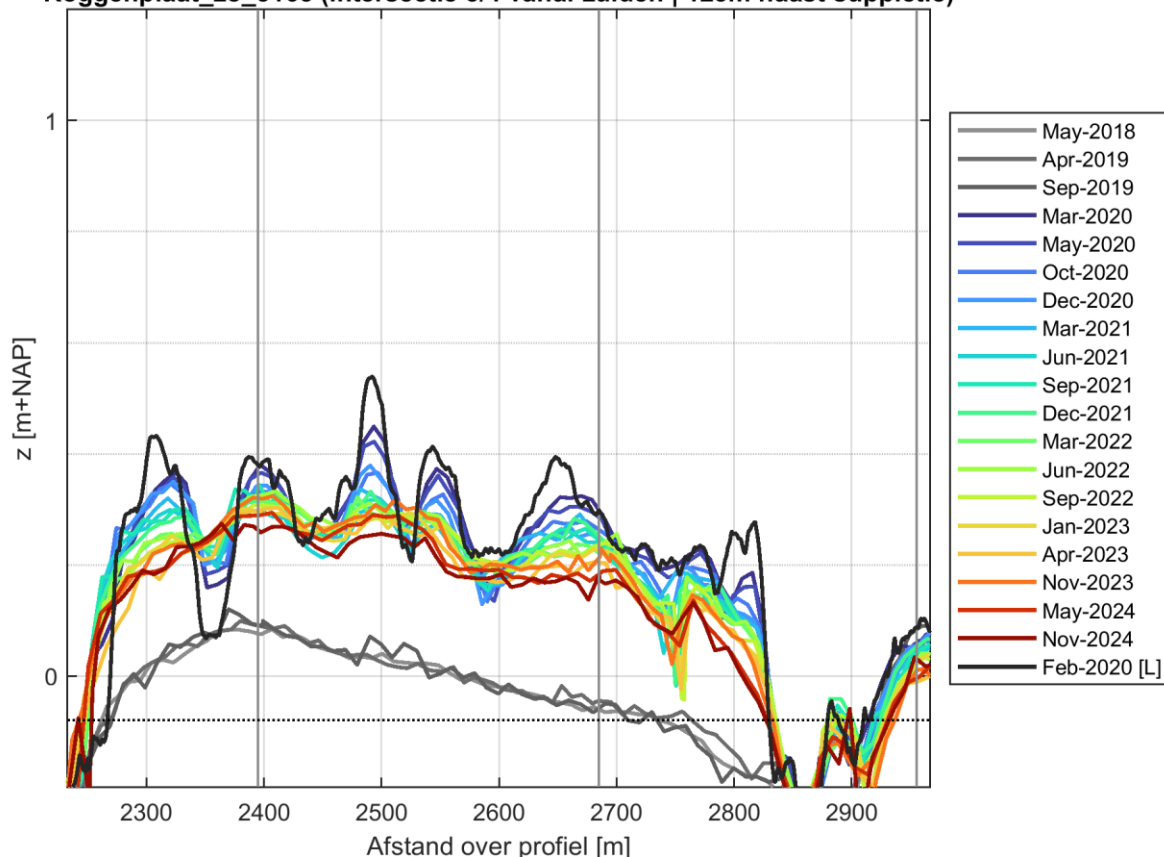
Figuur B1-50. Bodemhoogteveranderingen gemeten met akoestische SED 27 op suppletie 4 (Figuur B1-48) tussen 14 december 2021 en 1 mei 2022. Rondom de bodemhoogte afname in februari 2022 zijn verschillende stormen opgetreden: op 31 januari storm Corrie, op 6 februari een westerstorm en daarna de drielingstorm (16 februari storm Dudley, 18 februari Eunice en 20 februari Franklin).



Figuur B1-51. Bodemhoogteveranderingen gemeten met akoestische SED 22 in het oosten van de Roggenplaat (Figuur B1-48) tussen 25 januari en 18 april 2022.

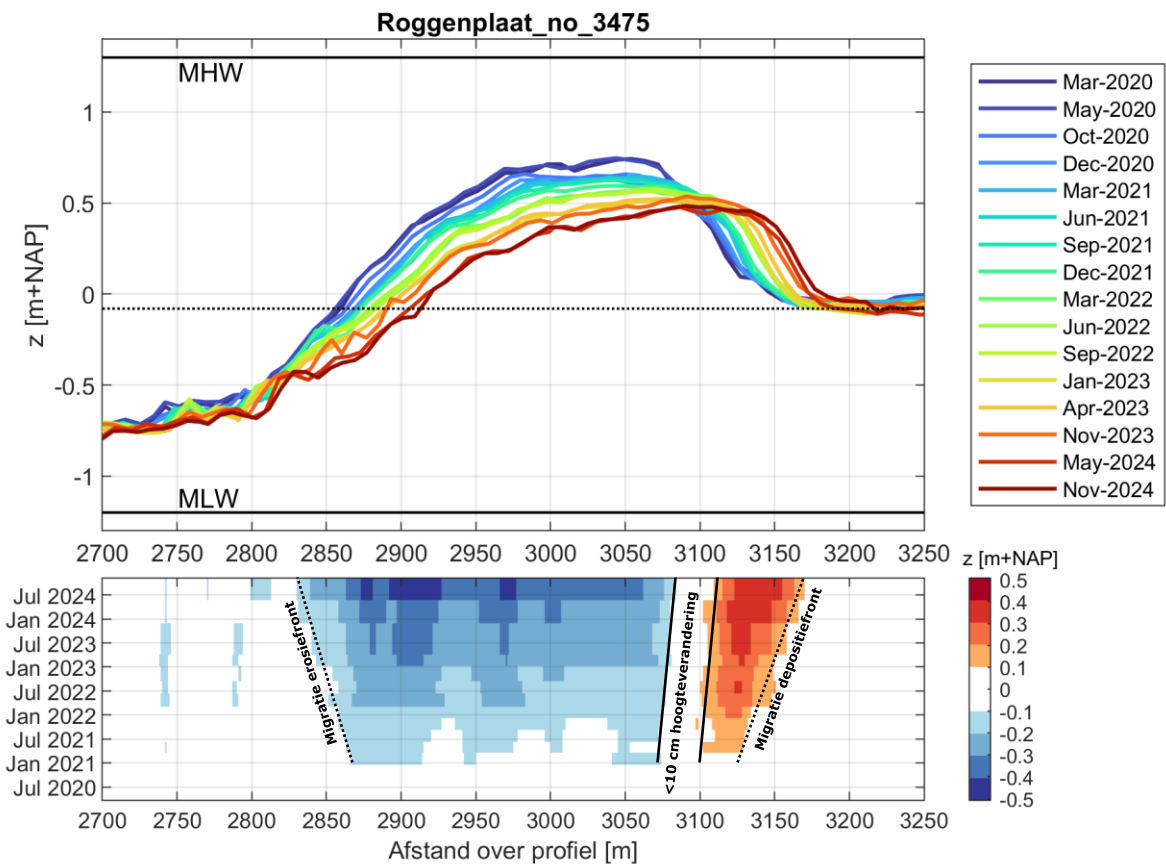
Hoewel gebleken is dat stormen een rol spelen in de ontwikkeling van het microreliëf (uitvlakken), tonen de resultaten (Figuur B1-49) dat ook in perioden zonder substantiële stormen de ontwikkelingen doorzetten, zij het langzamer (1 cm/maand wat betreft SED 27 in 2020). Ook op de noordelijke suppleties is het uitvlakken van het microreliëf zichtbaar ondanks dat deze aan minder golfaanval onderhevig zijn. Op suppletie 3 nam de hoogte van de bodemvormen af van ongeveer 20 cm tot 5 cm in twee jaar tijd (Figuur B1-52). Ook hier was de uitvlakking in de eerste periode het sterkst: ongeveer een derde van de uitvlakking vond plaats van februari tot maart 2020. Kortom, de tijdschaal van het bestaan van deze morfologische vormen is slechts enkele jaren en deze morfologische vormen zijn bovendien erg dynamisch. Dit vormt beperkingen voor de ecologische waarde die het microreliëf kan bieden. Al is er ook na 5 jaar zowel op de zuidelijke suppleties (bijvoorbeeld Figuur B1-47) als op de noordelijke suppleties (bijvoorbeeld Figuur B1-52) nog enige mate van diversiteit in hoogteligging aanwezig (tot 10 cm over orde 100 m).

Roggenplaat_zo_3165 (intersectie 3/4 vanaf zuiden | 125m naast suppletie)



Figuur B1-52. Profiel op basis van de RTK metingen voor raai zo_3165 in het oosten van de Roggenplaat. Aanvullend is ook de LiDAR data direct na suppleren (februari 2020) geïnterpoleerd langs dit profiel (in de legenda gemarkeerd met [L]). De locatie van deze raai is weergegeven middels een paarse stippellijn in Figuur B1-48. De verticale lijnen in de figuren komen overeen met de kruising met andere raaien. Profielen vóór de aanleg van de suppleties zijn weergegeven in grijs.

Niet alleen het microreliëf maar ook de suppleties als geheel ondergaan ontwikkelingen die niet alleen tijdens extreme stormen plaatsvinden. Om dit te illustreren, is in *Figuur B1-53* de ontwikkeling van RTK raai no_3475 getoond, zowel in de vorm van de gemeten profielen (bovenste paneel) als in een ruimte-tijdweergave van deze data (onderste paneel). Deze raai beslaat suppletie-element 7 (zie *Figuur B1-48* voor locatie) dat kan worden beschouwd als het meest dynamische suppletie-element (*Figuur B1-39*; *Figuur B1-40*; *Figuur B1-41*). Hoewel de profielen laten zien dat op deze locatie de erosie relatief groot was tussen bepaalde opnamen (bijvoorbeeld mei-oktober 2020 op de top van de suppletie), is desondanks ook zichtbaar dat de vormverandering en migratie van dit suppletie-element relatief geleidelijk verloopt. Dit blijkt ook uit de ruimte-tijdweergave van deze data (onderste paneel in *Figuur B1-53*). Bijvoorbeeld, het depositiefront – hier gedefinieerd als de meest afgelegen uitbreiding van de suppletie met tenminste 10 centimeter depositie (*Figuur B1-53*) – lijkt met een relatief constante snelheid te migreren (ongeveer 10 meter per jaar). Het zijn dus niet alleen extreme stormen maar ook de meer frequente windcondities in combinatie met de stroming die de morfologische ontwikkelingen van de suppleties drijven. Bovendien geven deze data geen aanwijzingen dat de ontwikkelingen (in ieder geval wat betreft de migratie) van dit meest dynamische suppletie-element substantieel zijn vertraagd over deze eerste 5 jaar na aanleg.



Figuur B1-53. Profiel op basis van de RTK metingen voor raai no_3475 over suppletie-element 7 (boven). Voor dit profiel is tevens de ontwikkeling van de netto bodemveranderingen gegeven (ten opzichte van de eerste meting na suppleren) in het ruimte-tijdveld (onder). Hierin is het deel van de suppletie met minder dan 10 cm bodemveranderingen aangegeven met de zwarte doorgetrokken lijnen en is de migratie van het erosie- en depositiefront aangegeven met de zwarte stippellijnen. De locatie van deze raai is weergegeven in Figuur B1-48.

Ruimtelijke variaties in golfforcering en relatie met bodemveranderingen

Ruimtelijke variaties in de morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat(suppletie) zijn gedeeltelijk het resultaat van ruimtelijke variaties in hydrodynamische forcering. De stroomsnelheden op de Roggenplaat zijn beperkt tot orde 0,4 m/s en de suppletie heeft deze stroomsnelheden alleen lokaal veranderd (met maximaal ~0,2 m/s), zie paragraaf B1.7.5. Hoewel veranderingen in stroming bepaalde morfologische veranderingen kunnen verklaren, zoals de erosie tussen suppletie-elementen 1 en 5 (paragraaf B1.7.5), zijn ruimtelijke verschillen in de stroming te beperkt om de verschillende ontwikkelingen van de suppletie-elementen te kunnen verklaren. Sterker nog, de sterkst eroderende (zuidelijke) suppletie-elementen (4, 5 en 7) zijn waarschijnlijk door de hoge ligging van deze elementen aan minder stroming onderhevig dan de andere suppletie-elementen.

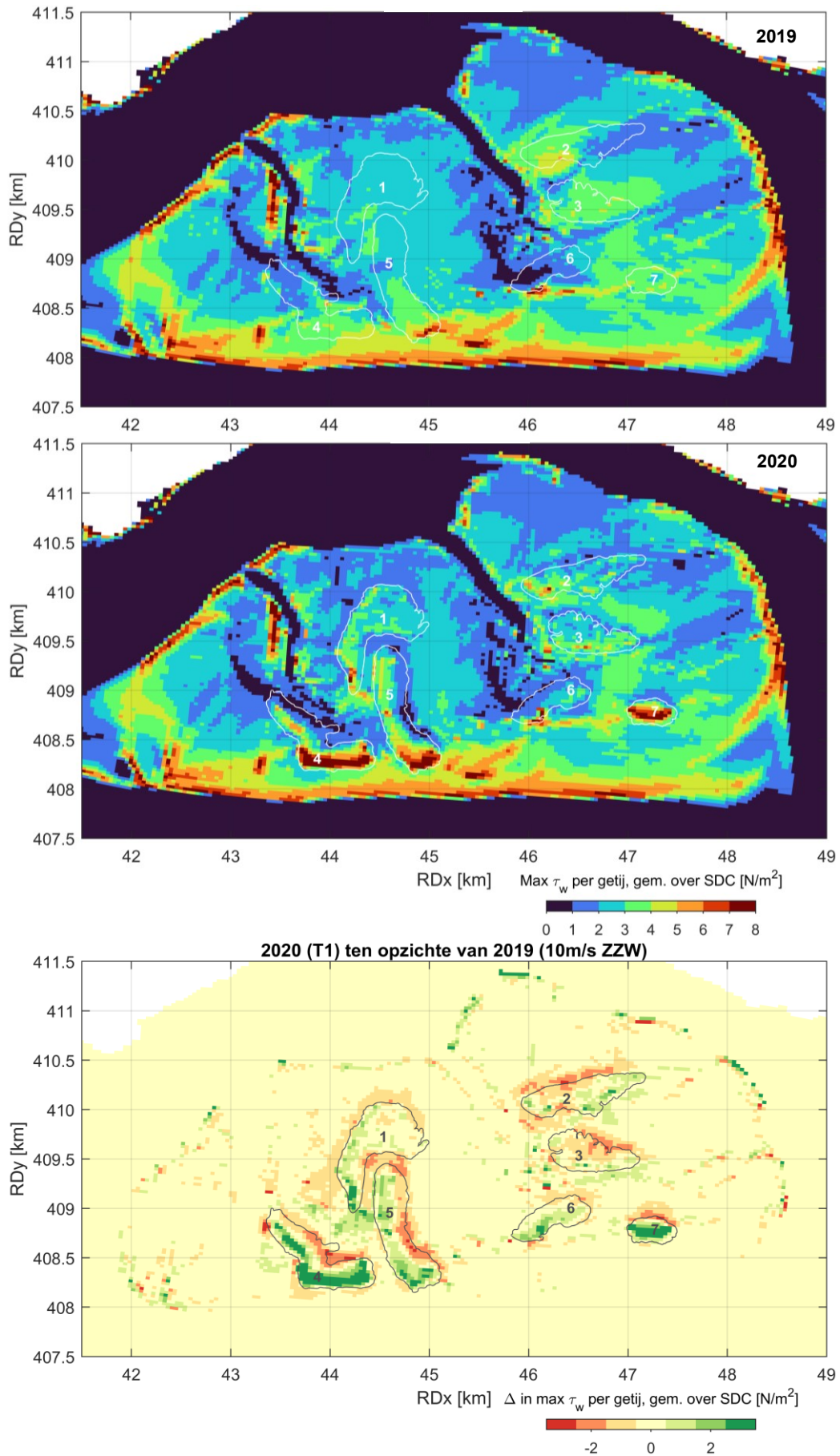
In tegenstelling tot de gematigde stromingscondities is de Roggenplaat, mede door de relatief lange strijklengte vanuit de dominante windrichting (het zuidzuidwesten; ZZW), onderhevig aan substantiële golfaanval. Om dit te kwantificeren en om ruimtelijke variaties in golfforcering te identificeren, zijn in *Figuur B1-54* de gemodelleerde bodemschuifspanningen door golven weergegeven voor de bodemligging vóór (2019) en na (2020) suppleren en het verschil daartussen. In deze simulatie zijn de golven geforceerd met een windsnelheid van 10 m/s uit het ZZW om de patronen te weergeven tijdens vrij krachtige windcondities (10 m/s of meer komt hier ruim 12% van de tijd voor; B1.4.1).

Wat opvalt, is dat de bodemschuifspanningen door golven relatief groot zijn aan de zuidrand van de Roggenplaat (*Figuur B1-54*). Ook de zuidelijke suppleties zijn aan relatief veel bodemschuifspanningen onderhevig. Enerzijds komt dit doordat deze gelegen zijn in zones waar de bodemschuifspanningen vóór suppleren al relatief hoog waren. Anderzijds zorgen de relatief steile hellingen van de suppletie-elementen (*Figuur B1-44*) ervoor dat de golfenergie over relatief korte afstanden gedissipeerd worden. In andere

woorden, op de zuidelijke suppletie-elementen focussen de relatief hoge golfkrachten op relatief kleine gebieden (door de steile bodemhellingen) wat relatief grote bodemschuifspanningen impliceert. Het zijn dan ook de zuidelijke suppletie-elementen die aan de grootste bodemveranderingen onderhevig zijn (wat betreft suppletie-element 5 met name het zuidelijke deel; *Figuur B1-40*). Bovendien kunnen deze relatief grote bodemschuifspanningen de oorzaak zijn van het voorkomen van megaribbels (zandgolven) met een golflengte van 25-40 m op deze delen van de suppletie-elementen (*Figuur B1-43* en *Figuur B1-44*).

Omdat de golven gedeeltelijk gedissipeerd worden door de zuidelijke delen van de Roggenplaat (ook zonder de suppletie), zijn de noordelijke suppletie-elementen aan minder golfforcering onderhevig (*Figuur B1-54*). Bovendien zijn deze door de kleinere aanlegdikte (*Figuur B1-37*) een relatief beperkte verstoring voor de golven. Daarom ligt het in lijn der verwachting (conform de ontwerpstudie; Van der Werf et al., 2016b) dat deze noordelijkere suppletie-elementen aan minder bodemveranderingen onderhevig zijn (zoals zichtbaar in *Figuur B1-40*). Suppletie-element 6 is in deze een bijzonder geval. Hoewel deze relatief zuidelijk op de Roggenplaat ligt (vrij vergelijkbaar aan suppletie-element 7), ligt deze beschut achter een schelpenrug net ten zuiden van dit suppletie-element (reeds aanwezig vóór suppleren; *Figuur B1-31*) waardoor de golfforcering op dit suppletie-element relatief laag uitvalt (*Figuur B1-54*). Dit verklaart mede waarom suppletie-element 6 ondanks de relatief zuidelijke ligging toch beperkt erodeert (*Figuur B1-40*).

Relevant is dat ook de suppletie-elementen zelf bijdragen aan het creëren van relatief golf-luwe gebieden op de Roggenplaat. In de verschilkaart is zichtbaar dat de bodemschuifspanningen in een zone tot 100-200 m achter de suppletie lager uitvalt ten opzichte van de situatie zonder suppletie (*Figuur B1-54*). Deze afname in schuifspanningen bevordert depositie van het geërodeerde suppletie-sediment wat zich vertaalt in een migratie van de suppletie. Deze afname in bodemschuifspanningen zou bovendien de erosie van de niet-gesuppleerde delen kunnen matigen, ware het niet dat de 100-200 m luwtevorming beperkt is ten opzichte van de afmetingen van de Roggenplaat. Dat deze luwtevorming geen grotere gebieden beslaat kan te maken hebben met golfgroei achter de suppletie-elementen, zoals ook waargenomen achter de Oesterdamsuppletie (Boersema et al., 2018). Bovendien kan de golfenergie zich door diffractie (en mogelijk ook refractie) achter de suppletie-element uitspreiden waardoor het luwte-effect afneemt.



Figuur B1-54. Gemodelleerde bodemschuifspanningen door golven – als zijnde de maximale waarden per getij die vervolgens zijn gemiddeld over de twee doorgerekende representatieve spring-doodtij cycli (SDC; 15 januari – 14 februari 2015) – voor de T0 (2019, boven) en T1 (2020, midden) bodem. De onderste figuur laat de veranderingen in de bodemschuifspanning zien tussen 2019 en 2020. De golven zijn berekend voor een windsnelheid van 10 m/s uit het ZZW (dominante richting).

B1.7.2. Sedimentverplaatsingen over de plaat en rondom suppleties

Onderliggende kennisvraag morfologie 2

Blijft het geërodeerde suppletiesediment in de nabijheid van de suppleties of komt het (ook) elders terecht?

Samenvattende beantwoording:

Rondom de suppleties verplaatst het sediment zich met name in noordoostelijke richting, overeenkomstig met de dominante windrichting. In totaal was het volumeverlies van de suppleties 183.000 m³ (17% van de totale suppletiehoeveelheid van 1.076.000 m³) tussen de metingen van februari 2020 (na suppleren) en juni 2024 (laatste meting). Ongeveer 42% van dit volume (77.000 m³) verplaatste, volgens de huidige schatting, minder dan 50 m van de suppleties vandaan. Na correctie voor een inschatting van het zettingsverlies, is over deze jaren ongeveer 54.000 m³ van het suppletiezand elders op de plaat of in de geulen terecht gekomen. Dit beperkt enigszins de achteruitgang (erosie) van de niet-gesuppleerde delen van de plaat. Ter indicatie, dit komt overeen met ongeveer een halve centimeter (dus ongeveer één millimeter per jaar) over deze periode bij gelijke verspreiding over de plaat en in afwezigheid van verlies naar de geulen. Deze sedimentbeschikbaarheid is beperkt ten opzichte van de autonome sedimentverplaatsingen over de Roggenplaat en de meetnauwkeurigheid.

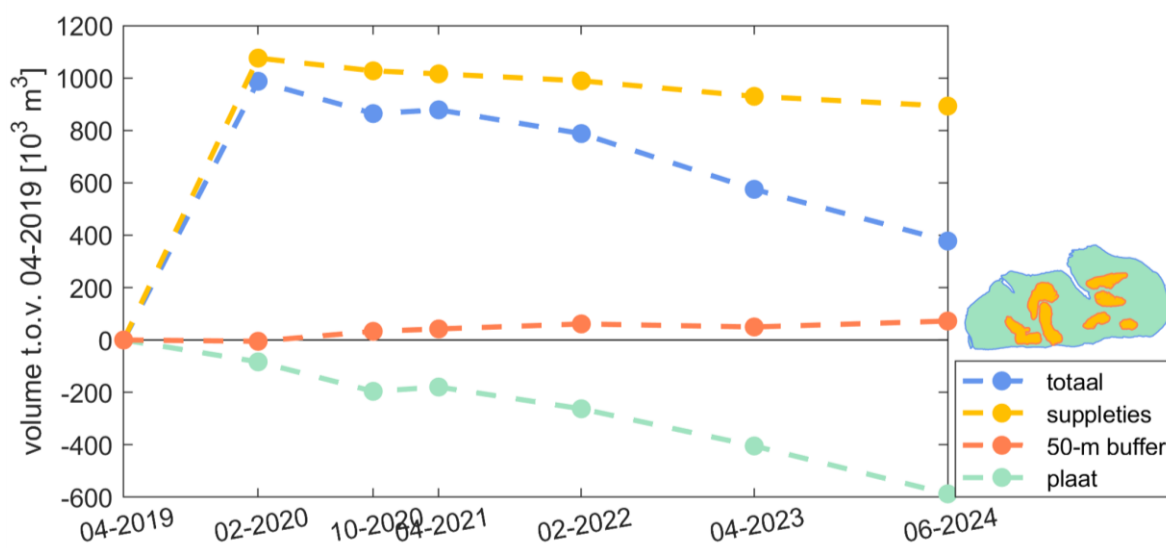
Suppleties creëren beschutte zones met minder golfenergie achter de suppletie wat sedimentatie kan bevorderen, zoals eerder waargenomen bij de Galgeplaatsuppletie van 2008. Golfmodellering voor de Roggenplaat toont lagere bodemschuifspanningen tot 200 m achter de suppletie. Echter, de netto sedimentatie in de 50-meter bufferzone is (tot nu toe) niet groter dan de erosie van de suppletie (ook na correctie voor het zettingsverlies), maar zonder luwte-effect was de sedimentatie in deze bufferzone wellicht lager geweest. De volumeontwikkeling varieert per suppletie, waarbij de noordelijke elementen minder veranderlijk zijn dan de zuidelijke. Alleen bij suppletie 6 is de depositie in de bufferzone groter dan de erosie van de suppletie zelf. Dat hangt echter samen met het binnenwandelen van een schelpenrug.

Door de aanleg van de suppleties neemt het totale volume van de Roggenplaat toe. Deze toename komt neer op 988.000 m³ als de LiDAR van februari 2020 vergeleken wordt met die van april 2019 (Figuur B1-55 en Tabel B1-10). Deze plaat-brede volumetoename is minder dan het suppletievolume (1.076.000 m³; Tabel B1-10) omdat in de niet-gesuppleerde delen sprake is van netto doorzettende erosie. De volumeafname die voor de aanleg van de suppleties al gaande was (Figuur 5-1; door o.a. de zandhonger), zet na de suppleties door: het volume buiten de suppleties en een 50-m brede rand daaromheen nam tussen februari 2020 en juni 2024 met 504.000 m³ af. De trend in volumeafname over deze periode was -110.000 m³/jaar. Vóór aanleg, tussen mei 2010 en maart 2018, was de volumeafname 711.000 m³ (Figuur 5-1). De trend in volumeafname over deze periode was -91.000 m³/jaar. De globale erosietrend op de Roggenplaat (gemiddeld ongeveer 0,7 cm/jaar) is dus niet significant veranderd na aanleg van de suppleties.

Na aanleg neemt het volume binnen de suppletiecontouren geleidelijk af: een afname van 183.000 m³ (van 1.076.000 m³ naar 893.000 m³; Tabel B1-10) tussen februari 2020 en juni 2024. Een deel van dit sediment komt in de nabijheid van de suppletie terecht. Een buffer van 50 m afstand rondom de suppleties wordt als maatstaf gebruikt voor de nabijheid van de suppleties (het meest dynamische suppletie-element 7 breidde met orde 10 meter per jaar uit; Figuur B1-53). De volumetoename in deze 50 m buffer rondom de suppleties is in dezelfde periode +77.000 m³. Daarnaast kan mogelijk orde 12.000 m³/jaar (ofwel ongeveer 52.000 m³ over deze periode) worden toegeschreven aan zettingen (zie kanttekeningen in paragraaf B1.6.3). De rest van het volume (ongeveer 54.000 m³ over deze periode) dat van de suppleties verdwijnt, belandt – meetfouten daargelaten – buiten de buffer, op de plaat of in de geulen. Dit beperkt enigszins de

achteruitgang (erosie) van de niet-gesuppleerde delen van de plaat (met ongeveer 0,5 cm over deze periode als dit volume gelijk verspreid zou zijn over de plaat en zonder verlies naar de geulen). Opgemerkt wordt dat deze analyse onderhevig is aan onzekerheden en dat enige terughoudendheid op zijn plaats is bij het vergelijken van deze getalwaarden. Bijvoorbeeld, de depositie in de 50 m bufferzone kan deels afkomstig zijn van de niet-gesuppleerde delen. In dat geval kan er minder dan 77.000 m³ suppletiezand in de 50 m bufferzone terecht zijn gekomen waardoor er meer dan de eerder genoemde 54.000 m³ suppletiezand op de plaat of in de geulen kan zijn beland.

Bij de Galgeplaat-suppletie kwam er in het gebied ten noord(oost)en van de suppletie meer zand terecht dan er van de suppletie was verdwenen (Jentink, 2016). Dit voedt de hypothese dat suppleties een luwte creëren (afname golfenergie) wat sedimentatie kan stimuleren. Golfmodellering (Figuur B1-54) wijst uit dat bodemschuifspanningen in een zone tot 100-200 m achter de suppletie lager uitvallen ten opzichte van de situatie zonder suppletie. Voor de Roggenplaat was tot op heden de depositie in de 50 m bufferzone (+77.000 m³) nog niet groter (ook niet vergelijkbaar) dan het volumeverlies van de suppletie (-183.000 m³). Dit betekent niet dat er geen sprake is van een luwte-gedreven sedimentatie, zonder luwte-effect was de sedimentatie in de bufferzone mogelijk lager uitgevallen. De luwte-gedreven sedimentatie is in ieder geval vooralsnog wel minder prominent aanwezig dan waargenomen bij de Galgeplaat-suppletie (Jentink, 2016).



Figuur B1-55. Volumeontwikkeling ten opzichte van april 2019 (laatste opname vóór suppleren) op basis van de suppletie-specifiek gecorrigeerde LiDAR data. De volumes zijn bepaald binnen de totale laagwatercontour van 2019, binnen de suppleties, binnen de 50-m buffer rondom de suppleties en in de gebieden buiten de 50-m buffer.

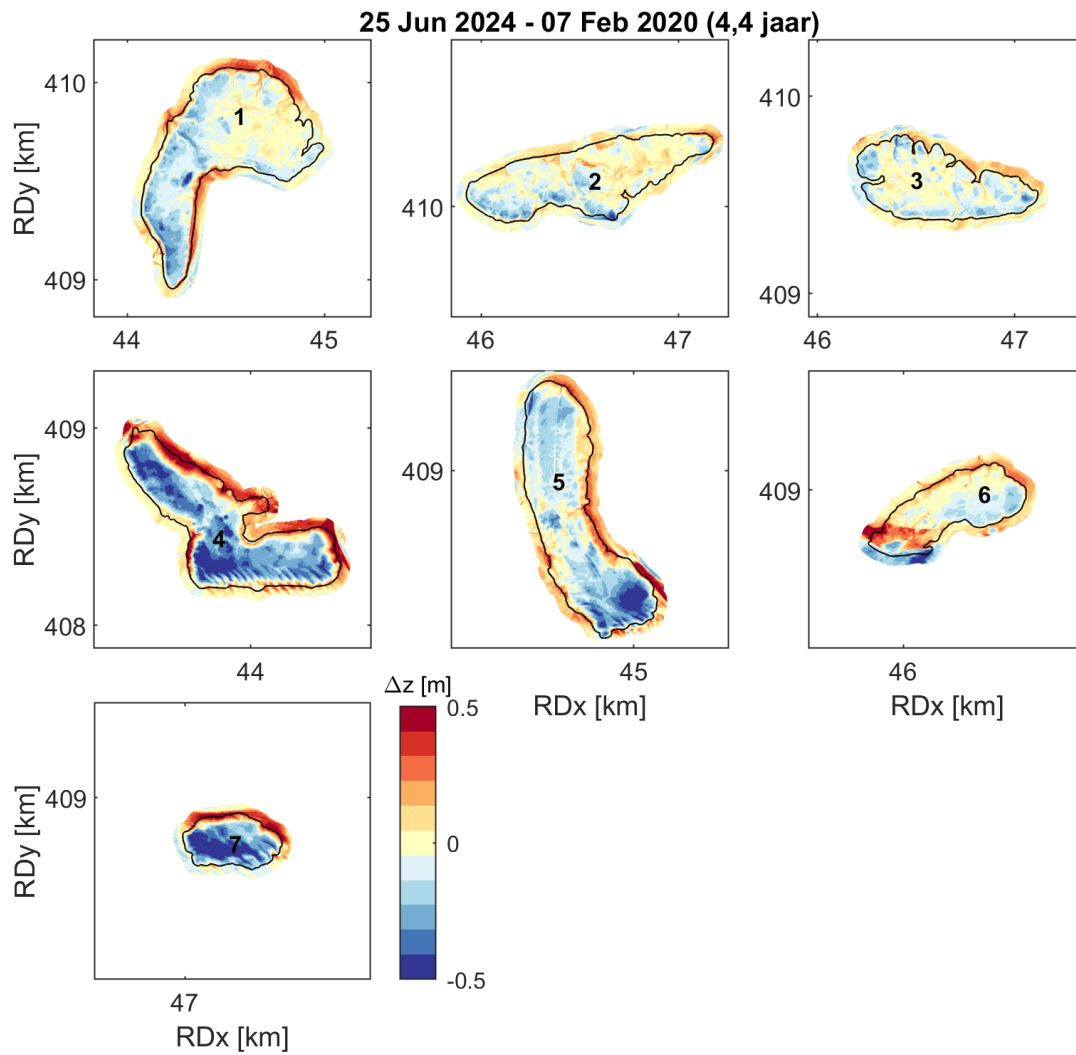
Tabel B1-10. Overzicht van de berekende volumes [10^3 m^3] ten opzichte van april 2019 (laatste opname vóór suppleren) binnen de totale laagwatercontour van 2019, binnen de suppleties, binnen de 50-m buffer rondom de suppleties en in de gebieden buiten de 50-m buffer (=plaat). Op basis van de suppletie-specifiek gecorrigeerde LiDAR data (paragraaf B1.2.3).

	totaal	suppleties / 50-m buffer							1 t/m 7	plaat
		1	2	3	4	5	6	7		
04-2019	0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0
02-2020	988	203/2	129/0	68/2	303/-2	232/-5	75/-1	65/0	1076/-5	-83
10-2020	864	187/7	127/0	67/4	287/11	222/7	77/2	61/2	1028/33	-196
04-2021	878	193/12	127/1	63/4	283/15	217/8	74/0	59/3	1016/42	-180
02-2022	788	191/15	123/1	63/5	274/22	209/12	75/2	54/4	989/61	-263
04-2023	575	181/12	118/-1	55/3	260/21	192/8	73/0	50/5	930/50	-405
06-2024	378	173/15	116/1	53/6	248/28	186/13	76/3	41/6	893/72	-587

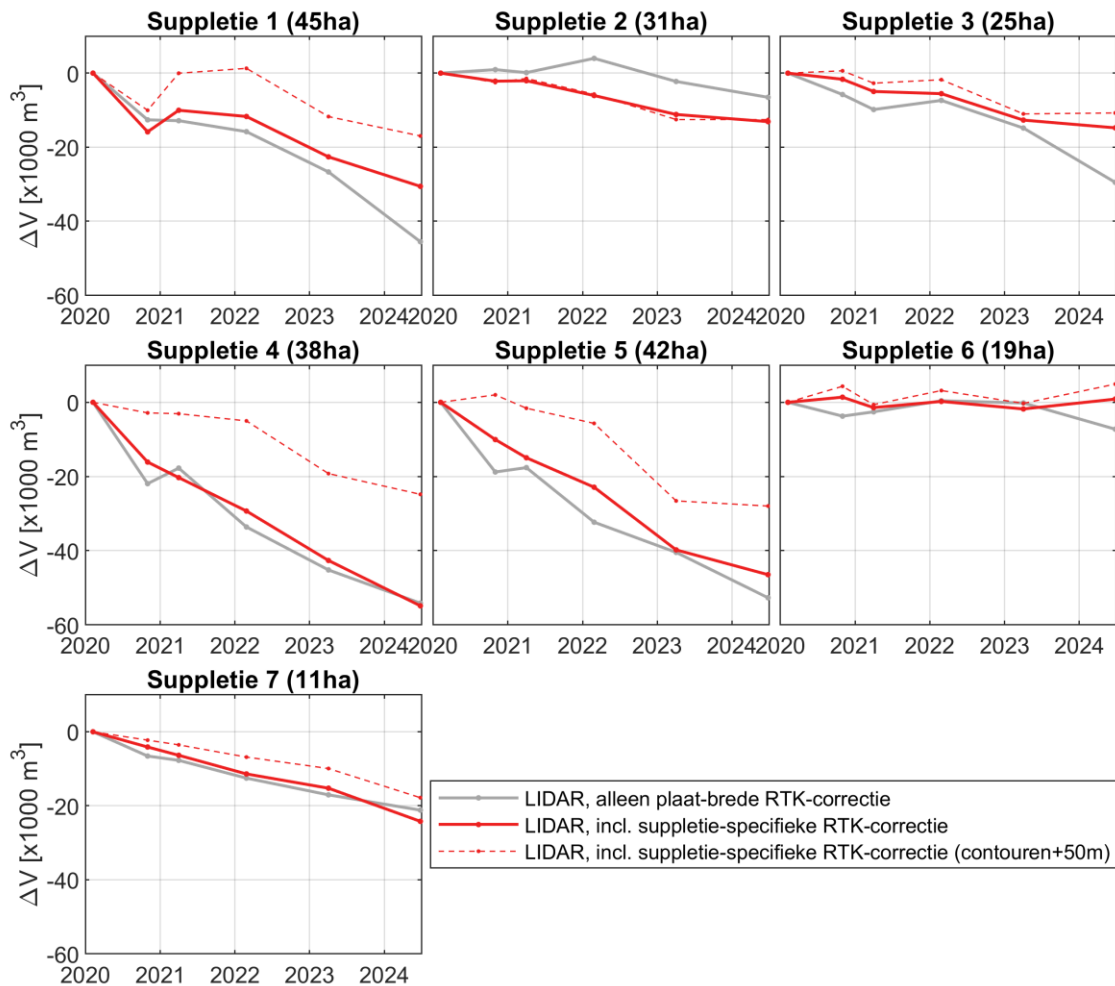
De volumeontwikkeling verschilt per suppletie. Zoals in paragraaf B1.6 benoemd, zijn de noordelijke suppletie-elementen (1-3) een stuk minder veranderlijk dan de zuidelijke elementen (4, 5 en 7). *Figuur*

B1-56 laat de verschilkaart tussen februari 2020 (net na aanleg van de suppleties) en juni 2024 (laatste opname) zien voor de suppletie-elementen en de buffer van 50 m daaromheen. *Figuur B1-57* toont de volumeveranderingen binnen de suppletiecontouren en voor de contouren waarbij ook de directe omgeving (50 m buffer) is meegenomen. Alle suppleties, met uitzondering van suppletie 6, vertoonden een netto volumeverlies (netto erosie) tussen februari 2020 en juni 2024. Suppletie 6 vertoonde netto sedimentatie van 1 hectare, wat mede samenhangt met de binnenwandelende schelpenrug (zichtbaar als de sedimentatiestrook ten noorden van de erosiestrook in het zuidwesten van suppletie 6 in *Figuur B1-56*). Daarnaast toont *Figuur B1-57* dat het sediment voor sommige suppleties grotendeels in de nabijheid van de suppleties blijft (binnen de 50 m buffer zones, zie ook de profielen in *Figuur B1-41*), terwijl dat voor andere suppleties in mindere mate het geval lijkt. De volumeafname binnen de suppletiecontour van suppletie 2 wordt bijvoorbeeld maar in zeer beperkte mate gecompenseerd in de zone 50 m eromheen. Suppletie 4, daarentegen, kent een behoorlijke volumeafname binnen de suppletiecontour, maar een veel minder sterke volumeafname als ook de 50 m zone eromheen erbij wordt betrokken. Dit suggereert depositie van het geërodeerde sediment in de nabijheid van deze suppletie.

De netto volumeafname van de suppleties is gemiddeld 42% minder groot wanneer de contour met 50 m wordt uitgebreid en dus ook de directe omgeving wordt beschouwd. Sommige suppleties (1 en 6) laten zelfs (tijdelijk) een volumetoename zien. Voor suppletie 1 was deze toename tijdelijk, waarna er weer een volumeafname optrad. Hoewel deze netto volumetoename mogelijk door een meetfout kan komen (als de hoogteligging bijvoorbeeld één cm lager was, was er geen sprake van een volumetoename), ondergaat suppletie 1 in ieder geval een zeer beperkt volumeverlies. Tussen april 2019 en juni 2024 was de sedimentatie in de buffer van 50 m buiten de suppletiecontouren in totaal 77.000 m³. De sedimentatie in de bufferzone vindt voornamelijk plaats aan de noordoostkant van de suppleties (*Figuur B1-56*). Dit is tevens de lijkzijde van de suppleties, aangezien de overheersende windrichting (die de richting van de golven en windgedreven stroming en dus het sedimenttransport stuurt) uit het zuidwesten is (zie ook paragraaf B1.4). De sedimentatie in deze zone is het sterkst voor de meest erosieve suppleties 4, 5 en 7. Deze sedimentatie kan het gevolg zijn van depositie dankzij de luwtevorming t.a.v. golven die de suppletie creëert (*Figuur B1-54*), maar kan ook komen door migratie van sediment van de suppletie (of een combinatie). Bij suppletie 6 is de depositie in de bufferzone (5.000 m³) groter dan de sedimentatie van de suppletie (1.000 m³). Hierin spelen de autonome ontwikkelingen rondom dit suppletie-element (zoals gerelateerd aan de binnenwandelende schelpenrug vanuit het zuidwesten) een rol.



Figuur B1-56. Bodemveranderingen op basis van de suppletie-specifiek gecorrigeerde LiDAR data tussen februari 2020 (eerste opname na suppleren) en juni 2024 (meest recente opname) van de suppleties inclusief de 50 m buffer.



Figuur B1-57. Ontwikkeling van de suppletievolumen binnen de oorspronkelijke contouren t.o.v. de eerste opname. Voor de LiDAR tijdseries is zowel de data getoond op basis van de plaat-brede RTK-correctie als ook na een aanvullende suppletie-specifieke RTK-correctie (paragraaf B1.2.3). Aanvullend is ook de tijdserie weergegeven na het uitbreiden van de suppletiecontouren met 50 m. Dit ter afschatting van hoeveel sediment in de nabijheid van de suppleties blijft.

Onderliggende kennisvraag morfologie 3 (aanvullend)

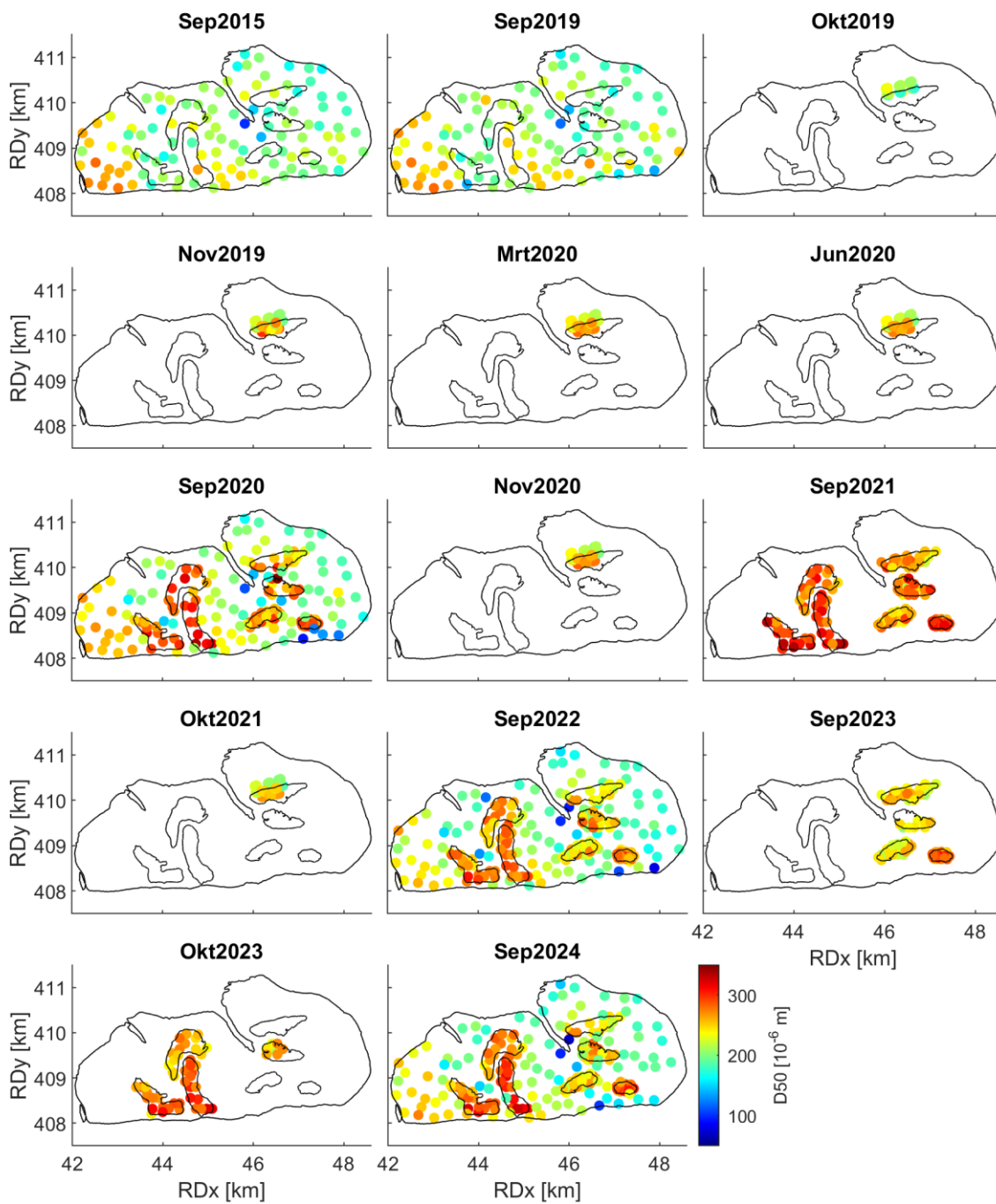
Hoe is de sedimentsamenstelling op de Roggenplaat en specifiek de suppleties veranderd?

Samenvattende beantwoording:

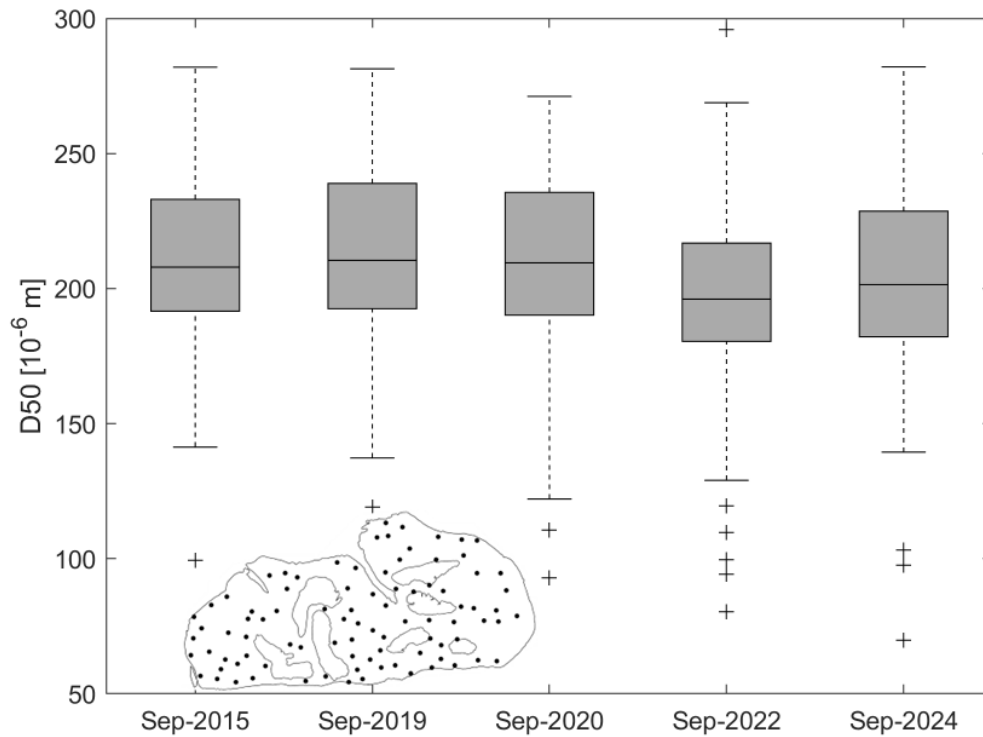
Het suppletiesediment is substantieel grover dan het sediment dat oorspronkelijk op de Roggenplaat aanwezig was. Daarom is de mediane korrelgrootte van het sediment in de niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat dan ook fijner (175 - 225 μm) dan op de suppletie (250 - 350 μm). Daarnaast bestaat de suppletie niet uit een uniforme sedimentsamenstelling maar verschillen de suppleties daarin direct na aanleg substantieel (suppletie 5 is bijvoorbeeld ruim 50 μm grover dan suppletie 2). Hoewel het sediment op de suppleties (met uitzondering van suppletie 7) aanhoudend fijner is geworden, is er geen sprake van een monotone ontwikkeling; er zijn variaties tussen de verschillende jaren. Dergelijke variaties zijn in bepaalde mate ook zichtbaar in de niet-gesuppleerde gebieden en zijn mogelijk het gevolg van natuurlijke processen zoals stormen. De verfijning van de mediane korrelgrootte is samengegaan met een (niet monotone) toename in het slibgehalte op de suppletie, waar slib in de eerste twee jaar na aanleg nog nagenoeg afwezig was.

Omdat de zuidelijke suppleties 4, 5 en 7 minder verfijning hebben ondergaan, is het waarschijnlijk dat de verschillen in korrelgrootteontwikkeling (deels) samenhangen met verschillen in morfologische kenmerken. Bijvoorbeeld, een hogere aanleghoogte, meer erosie, de aanwezigheid van megaribbels en een grotere golfforcering ten opzichte van de andere suppleties. Net zoals dat de mediane korrelgrootte relatief grof is in bepaalde dynamische, niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat (zoals de zuidwestflank), is het mogelijk niet realistisch om te verwachten dat de dynamische zuidelijke suppleties eenzelfde verfijning ondergaan als de minder dynamische en beschutter gelegen noordelijke suppleties.

Figuur B1-58 geeft de ruimtelijke spreiding van de gemeten mediane korrelgroottes per meetcampagne weer voor 2015, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 en 2024. Wat opvalt, is dat direct na aanleg, maar ook nog in de meest recente meting, de korrelgrootte van de suppleties onderscheidend is van de niet-gesuppleerde delen van de plaat. De mediane korrelgrootte van het sediment is namelijk substantieel grover op de suppleties (250 - 350 μm) dan erbuiten (175 - 225 μm). Verder valt op dat de korrelgrootte op de Roggenplaat buiten de suppleties enige toename onderging in de periode vóór suppleren (van 2015 tot 2019), en enige afname onderging in de jaren na suppleren (zie *Figuur B1-59*), al is de vraag of dit significante verschillen zijn. Het is namelijk niet uitgesloten dat deze variaties (gedeeltelijk) het gevolg zijn van natuurlijke variabiliteit (fluctuaties met een tijdschaal korter dan één jaar) en/of het gevolg zijn van meetonnauwkeurigheden. Bovendien zijn deze verschillen relatief klein, bijvoorbeeld in vergelijking tot de ruimtelijke variatie (tot ongeveer 50 μm ; *Figuur B1-59*). Het gemiddelde van de mediane korrelgrootte (D50), voor de meetpunten buiten de suppleties die in 2015, 2019, 2020, 2022 en 2024 altijd gemeten zijn, was respectievelijk 210, 214, 209, 197 en 202 μm . De afname in korrelgrootte in 2022 vond met name plaats aan de oost- en westranden van de plaat en heeft dus mogelijk niets met de suppletie te maken. De oost- en westranden van de plaat zijn ook de zones die (los van de suppleties) het sterkst eroderen (*Figuur B1-34*). In 2024 neemt de mediane korrelgrootte op de plaat opnieuw toe, wat suggereert dat er geen sprake is van een trend, maar dat natuurlijke variaties deze verschillen verklaren.



Figuur B1-58. Overzicht van de gemeten mediane korrelgroottes per meetcampagne in 2015, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 en 2024 op de Roggenplaat. De suppletiecontouren en de laagwaterlijn zijn weergegeven. Zie Figuur B1-37 voor de nummering en dikte van de verschillende suppletie-elementen. Suppletie 2 (de noordoostelijke suppletie) is relatief vaak bemonsterd in verband met monitoring van de priming toepassing (valt buiten de scope van deze bijlage). Deze suppletie was aangelegd tussen de bemonstering van oktober en november 2019. In de verdere analyses van deze bijlage ligt de focus grotendeels op de septembermetingen omdat die alle suppleties en/of de volledige plaat beslaan. De meetpunten van september en oktober 2023 zijn hierna samengevoegd onder de noemer 'september 2023'.



Figuur B1-59. De mediane korrelgrootte (D50) van de punten buiten de suppleties die in september van 2015, 2019, 2020, 2022 en 2024 altijd gemeten zijn (zie de inzet voor de ligging van deze meetpunten). De onderkant van elke box komt overeen met het onderste kwartiel; het toont de waarde van de eerste 25% van de data. De bovenkant van de box komt overeen met het bovenste kwartiel; het laat welke korrelgrootte in 25% van de gevallen wordt overschreden. De horizontale lijn binnen elke box toont de mediaan. De afzonderlijke punten (+) tonen eventuele uitschieters (gelegen op meer dan 1,5 maal het verschil tussen het eerste en derde kwartiel afstand van deze kwartielen).

Figuur B1-60 geeft de mediane korrelgrootte per jaar per suppletie weer voor alle punten uit *Figuur B1-58*. Echter zijn niet in elke bemonsteringscampagne altijd alle locaties bemonsterd. Daarom geeft *Figuur B1-61* de mediane korrelgrootte voor september van 2015 t/m 2024 per suppletie weer voor alleen de punten die in september van al deze jaren voorkwamen. Andere maanden zijn buiten beschouwing gelaten omdat dan alleen suppletie 2 was gemeten. Dit maakt een robuustere vergelijking over de jaren mogelijk omdat variaties in mediane korrelgrootte dan niet komen door variaties in welke locaties worden meegenomen. Echter, *Figuur B1-61* omvat een zéér beperkte ruimtelijke dekking omdat er maar 16 locaties elk jaar (ook vóór suppleren) in september zijn bemonsterd (zie inzet in het figuur). Om voor de suppleties een analyse met meer monsters per suppletie mogelijk te maken, geeft tot slot *Figuur B1-62* de mediane korrelgrootte voor september van 2020, 2021, 2022, 2023 en 2024 (alle jaren na suppleren) per suppletie weer voor de punten die in al deze vijf jaren gemeten zijn. Deze beschouwing van minder opnamen in de tijd (alleen de periode na suppleren) zorgt er voor dat meer meetlocaties meegenomen worden (zie inzet in het figuur).

Uit zowel deze figuren, als *Figuur B1-58*, volgt dat het sediment op de suppleties over het algemeen grover is (250 - 350 μm) dan erbuiten (175 - 225 μm). Tussen 2020 en 2024 heeft voor vrijwel alle suppleties, met uitzondering van suppletie 7, een verfijning plaatsgevonden. Er is echter wel verschil in de ontwikkeling van de mediane korrelgrootte tussen de suppleties.

Hoewel de mediane korrelgrootte op alle suppleties met uitzondering van suppletie 7 over de jaren kleiner is geworden, is er geen sprake van een eenduidige trend. Tussen 2020 en 2022 namen de korrelgroottes van suppleties 1, 2, 3, 5 en 6 elk jaar af. De korrelgroottes van de zuidelijke suppleties 4 en 7 namen tussen 2020 en 2022 ook af, maar tussen 2020 en 2021 was daar eerst nog een toename. Na 2022 is de korrelgrootte echter op bijna alle suppleties weer iets toegenomen al blijft de mediane korrelgrootte typisch kleiner dan in de eerste opname na suppleren (2020). Kortom, de suppleties vertonen een verfijning ten opzichten van de situatie direct na aanleg maar deze verfijning zet (nog) niet door naar de korrelgrootte vóór suppleren (gestreepte lijn in *Figuur B1-62*).

Wat ook opvalt in deze figuren is dat de korrelgrootte direct na aanleg (2020) ruimtelijk behoorlijk varieert op de suppleties. De korrelgrootte varieert in deze 2020 opname niet alleen binnen een suppletie (tot

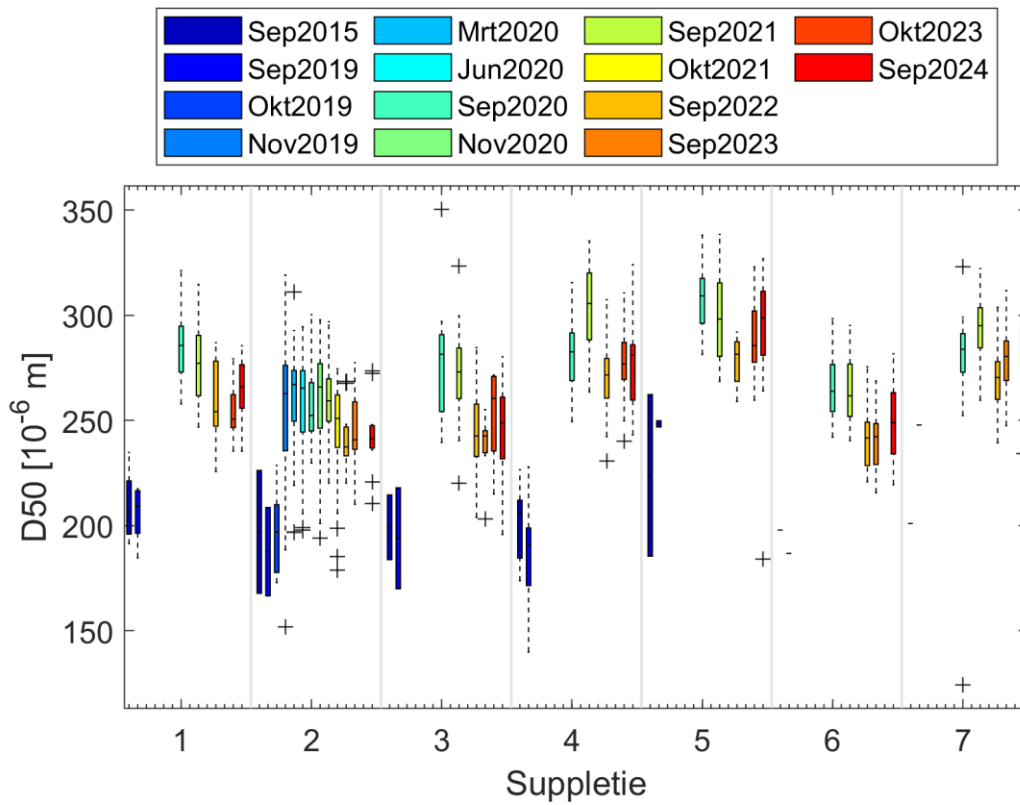
ongeveer 50 µm tussen het eerste en derde kwartiel van de boxplots) maar ook tussen de verschillende suppleties (de mediaan van de D50 van suppletie 5 ligt ruim 50 µm hoger dan die van suppletie 2 in 2020). Het suppletiezand bestaat dus niet uit één constante korrelgrootteverdeling. Dit kan het gevolg kan zijn van variaties in korrelgrootte in het wingebied en de aanlegmethodiek.

Vergelijken we de gemiddelde mediane korrelgrootte van alle jaren per suppletie, dan valt op dat de zuidelijke suppleties 4, 5 en 7 ten eerste grover zijn dan suppleties 1, 2, 3 en 6 en dat deze zuidelijke suppleties ten tweede minder verfijning hebben ondergaan (korrelgrootte was in 2024 nog relatief hoog). Zo is de gemiddelde mediane korrelgrootte van alle jaren na aanleg van suppleties 4, 5 en 7 (resp. 279 µm, 294 µm en 283 µm) hoger dan de gemiddelde mediane korrelgrootte van de andere suppletie-elementen (267 µm, 246 µm, 253 µm, 252 µm voor suppleties 1, 2, 3 en 6), al is het verschil tussen suppleties 1 en 4 relatief beperkt (12 µm). Suppleties 4, 5 en 7 zijn morfologisch onderscheidend omdat deze hoger zijn aangelegd, aan meer erosie onderhevig zijn, migrerende megaribbels bevatten (*Figuur B1-43*) en een grotere golfforcering ondervinden (*Figuur B1-54*).

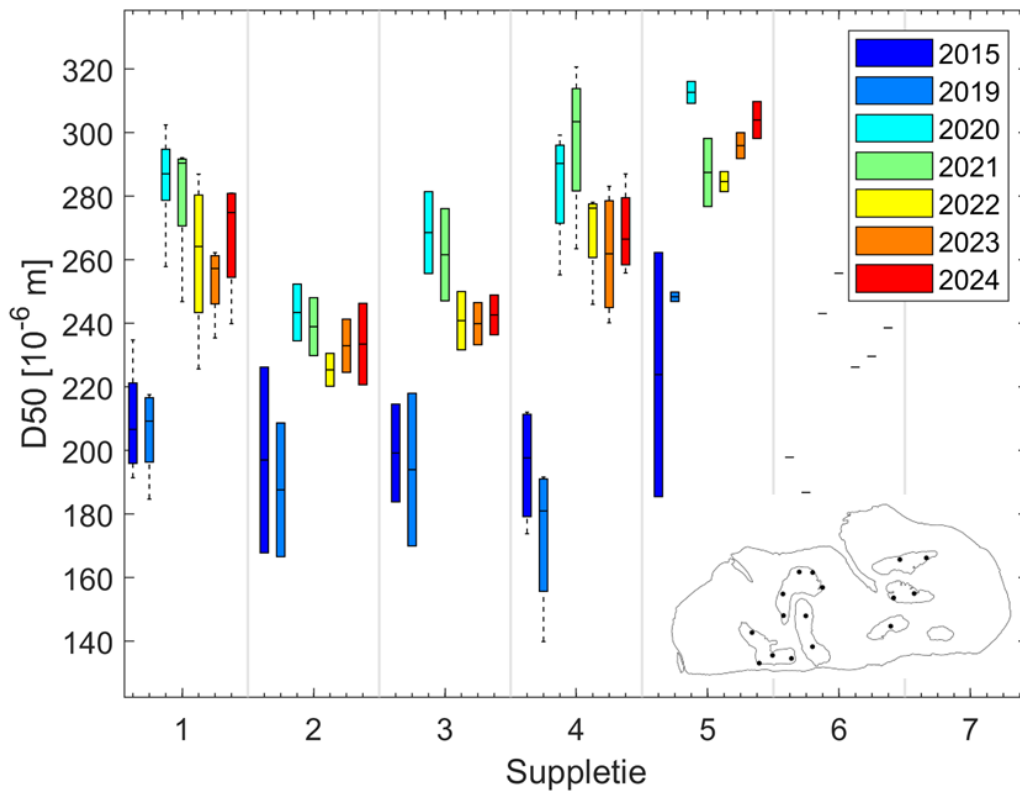
Het al dan niet voorkomen van een storm vlak voor de sedimentbemonstering kan van invloed zijn op het resultaat van de meting. Stormen kunnen de korrelgrootteverdeling beïnvloeden door het verplaatsen van grovere korrels en het opwoelen van het fijner sediment en slib. Bovendien kan de onderliggende (niet verfijnde) suppletie-laag aan het oppervlak komen te liggen als de toplaag (gedeeltelijk) erodeert in het geval van de sterk eroderende suppleties (zie bijvoorbeeld *Figuur B1-41*). De variatie in de korrelgrootte rondom de verfijnende trend (*Figuur B1-62*) kan daarom (mede) het gevolg zijn van temporele variaties in golfforcering. Het 1-op-1 relateren van variaties in sedimentontwikkelingen aan specifieke stormen is echter niet mogelijk met deze jaarlijkse metingen.

Figuur B1-63 laat voor de verschillende suppletie-elementen ook de ontwikkeling van de gemeten sedimentfracties zien. Door het suppleren (tussen oktober en november 2019) neemt op vrijwel alle suppletielocaties het percentage van de fracties met relatief kleine korrelgroottes (silt, vfines, fines; ofwel < 0,25 mm) af en het percentage van de fracties met relatief grotere korrelgroottes (medium, coarse; ofwel > 0,25 mm) toe. In de daaropvolgende periode (na aanleg) neemt het percentage medium (0,25 – 0,50 mm) geleidelijk weer af (de fractie grover zand van meer dan 0,50 mm blijft relatief onveranderd) en nemen de percentages van de fijnere korrelgrootteklassen (< 0,25 mm) geleidelijk weer toe. Voor de zuidelijke suppleties 4 en 7 duurt het orde een jaar langer voordat het percentage grotere fracties weer afneemt en het percentage kleinere fracties weer toeneemt. In de suppletie was direct na aanleg (nagenoeg) geen slib aanwezig. Sinds 2022 is er weer een klein aandeel slib in het sediment waargenomen (variërend tussen de 1 en 4% per suppletie-element, met een gemiddelde van 2%). Van 2022 tot 2024 steeg het aandeel slib met 75%, 13% en 79% in suppleties 1, 4 en 5. Het aandeel slib verminderde daarentegen met 35%, 30%, 25% en 40% voor suppleties 2, 3, 6 en 7. Na suppleren herstelt het slibgehalte zich dus enigszins maar zijn er ook momenten waarop deze lokaal weer afneemt (variaties in de tijd).

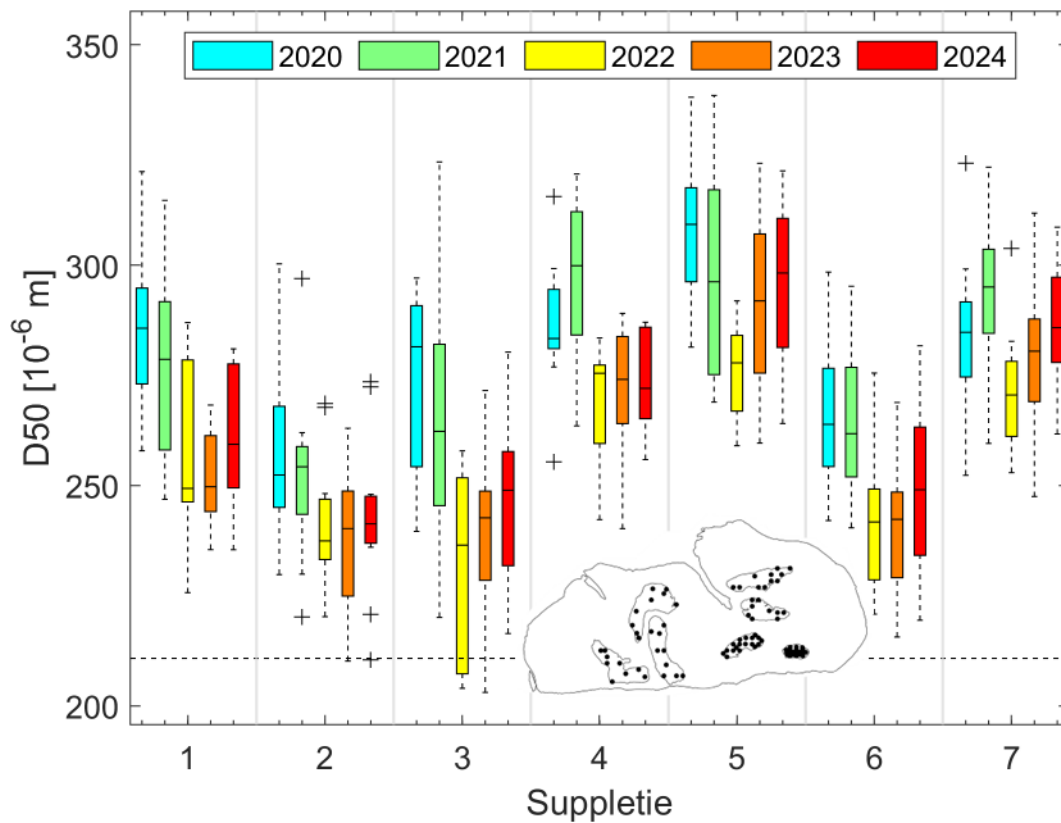
Kortom, de suppleties introduceren grover sediment dan oorspronkelijk op de Roggenplaat aanwezig was. Vervolgens vindt er, enkele lokale uitzonderingen daargelaten, een verfijning plaats van de suppleties. Hoewel deze verfijning in bepaalde mate blijvend is, is er geen sprake van een eenduidige trend aangezien de korrelgrootte sterk fluctueert tussen de meetmomenten. Bovendien is er een verschil in de ontwikkeling tussen de suppleties. Duidelijk is dat veranderingen in korrelgrootte op de suppleties niet te maken hebben met het blootleggen van oorspronkelijk plaatmateriaal onder de suppleties als gevolg van erosie van de suppleties, daartoe zijn de suppleties tot op heden nog niet voldoende geërodeerd (paragraaf B1.6.2). Omdat het de zuidelijke suppleties 4, 5 en 7 zijn die minder verfijning hebben ondergaan, is het waarschijnlijk dat verschillen in korrelgrootteontwikkelingen relateren aan de onderscheidenheid van deze suppleties (o.a. hogere aanleghoogte, meer erosie, aanwezigheid van megaribbels en grotere golfforcering) ten opzichte van de andere suppleties. Dit vermoeden wordt versterkt door het feit dat er vóór aanleg van de suppletie (2015/2019) een relatief grote korrelgrootte is waargenomen op de zuidwestflank van de plaat die morfologisch ook onderscheidend is: relatief dynamisch (*Figuur B1-40*) en relatief veel golfaanval (*Figuur B1-54*). Het is dus mogelijk niet realistisch om te verwachten dat de zuidelijke suppleties eenzelfde verfijning ondergaan als de minder dynamische, beschutter gelegen, noordelijke suppleties maar uit relatief grof sediment zullen blijven bestaan.



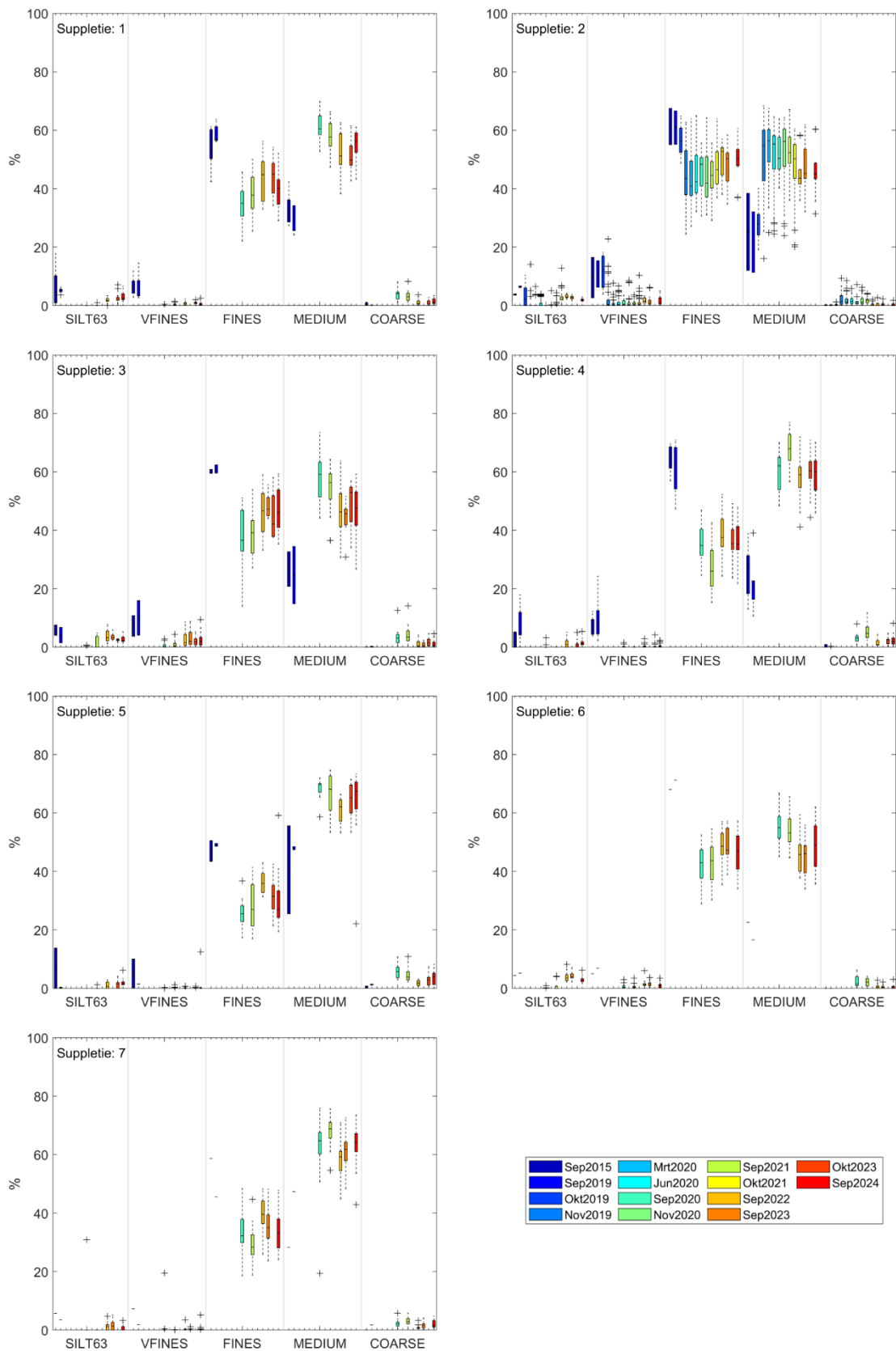
Figuur B1-60. De mediane korrelgrootte (D50) per meetmoment per suppletie. Opgemerkt wordt dat verschillen over de tijd in dit figuur mede het gevolg zijn van het feit dat niet elke meetlocatie op elk meetmoment is bemonsterd. In Figuur B1-61 en Figuur B1-62 is om deze reden de ontwikkeling van een selectie van de meetlocaties getoond. Zie Figuur B1-37 voor de nummering en dikte van de verschillende suppletie-elementen.



Figuur B1-61. De mediane korrelgrootte (D50) voor september van 2015 t/m 2024 per suppletie voor de meetpunten die in die opnamen altijd gemeten zijn (zie de inzet voor de ligging van deze meetpunten). Suppletie 7 is in 2015 en 2019 niet bemonsterd en daarom niet meegenomen. Zie Figuur B1-37 voor de nummering en dikte van de verschillende suppletie-elementen.



Figuur B1-62. De mediane korrelgrootte (D50) voor september van 2020, 2021, 2022 en 2024 (in tegenstelling tot Figuur B1-61 dus alleen na suppleren) per suppletie voor de meetpunten die in die opnamen altijd gemeten zijn (zie de inzet voor de ligging van deze meetpunten). Zie Figuur B1-37 voor de nummering en dikte van de verschillende suppletie-elementen. De gemiddelde mediane korrelgrootte op de gehele plaat vóór suppleren is aangegeven met de gestreepte lijn.



Figuur B1-63. De verdeling van de sedimentfracties voor de meetcampagnes in 2015 t/m 2024 voor de zeven suppletie-elementen. COARSE (= grof zand: fractie tussen 0,5 – 1,0 mm), MEDIUM (= middel fijn zand: 0,25 – 0,5 mm), FINES (= fijn zand: 0,125 – 0,25 mm), VFINES (= zeer fijn zand: 0,063 – 0,125 mm), SILT63 (= slib: <0,063 mm). Zie Figuur B1-37 voor de nummering en dikte van de verschillende suppletie-elementen.

B1.7.4. Invloed op niet-gesuppleerde gebieden

Onderliggende kennisvraag morfologie 4

Zijn er niet-gesuppleerde gebieden (geulen, intergetijdengebied) die beïnvloed worden door de aanwezigheid van de suppleties, vindt er bijvoorbeeld geulvorming plaats?

Samenvattende beantwoording:

De aanwezigheid van de suppleties lijkt, zoals met het ontwerp werd beoogd, weinig invloed te hebben op de morfologische veranderingen van de niet-gesuppleerde gebieden met uitzondering van de directe nabijheid van de suppleties (zie ook kennisvraag 2). De aftakkingen van het Westgeultje tussen de suppleties veranderen nauwelijks, de uiterste aftakking tussen suppletie 4 en 5 daargelaten die ruim een halve meter ondieper is geworden. Gebieden tussen de oostelijke suppleties zijn relatief stabiel. Doordat de suppleties 1 en 5 dicht bij elkaar liggen, is in de zone ertussen een geultje ontstaan. Deze migreert met de suppletieranden iets (~10 m/jaar) naar het zuidoosten. In het eerste jaar na aanleg zijn er ook naast enkele suppleties diverse geultjes gevormd. Geultjes zijn gevormd aan de zuidoostkant van suppletie 5 (migreert noordwaarts en verdiept) en aan de zuidkant van suppletie 2 (lijkt alweer te verdwijnen).

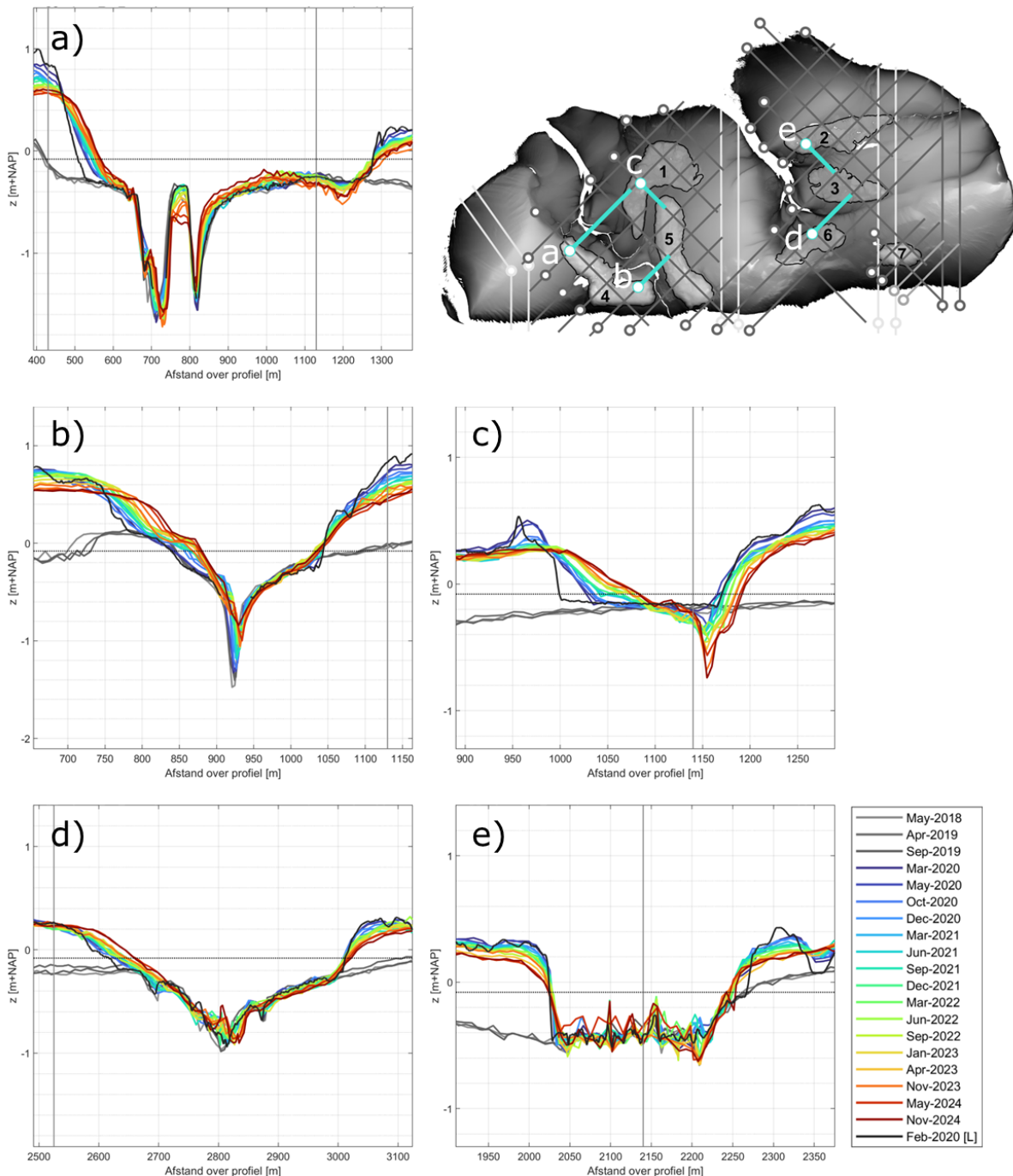
De morfologische ontwikkeling die het Middengeultje al voor suppleren onderging, is vooralsnog onveranderd door de suppleties. De noordoostelijke migratie van de zuidwestelijke geulwand zet ook na aanleg van de suppleties door. Wel is de gemiddelde trend van de verplaatsing iets toegenomen (van 0,8 m/jaar vóór tot 1,2 m/jaar na aanleg van de suppleties). De noordoostelijke geulwand vertoont daarentegen geen sterke migratie. Kortom, het doorstroomoppervlak van de geul is afgenomen. De totale trend in afname van het doorstroomoppervlak die al voor suppleren bestond, is niet significant veranderd. Het doorstroomvolume neemt ook af, maar ook hier is geen sprake van een significante trendbreuk in afnamesnelheid.

Het Westgeultje is voor en na suppleren eenmalig ingemeten. Daarom zijn geen inzichten verschaft over veranderingen in ontwikkeling door suppleren. Wel is duidelijk dat het Westgeultje over deze periode (2015-2024) kleiner is geworden. Eerdere datasets tonen dat deze ontwikkeling al voor suppleren gaande was.

Morfologische ontwikkeling tussen suppletie-elementen

De suppletie heeft invloed op de stroming over de Roggenplaat, met bijvoorbeeld een lokale verhoging van de stroomsnelheden tussen de suppletie-elementen (paragraaf B1.7.5). Echter, de aanwezigheid van de suppletie lijkt maar weinig invloed te hebben op de morfologische ontwikkeling van de gebieden gelegen tussen de suppletie-elementen, het zijn alleen lokale morfologische karakteristieken die veranderen. Deze veranderingen zijn in detail gevat met de RTK-metingen, ook in de beperkt droogvallende geultjes en poeltjes (in tegenstelling tot de LiDAR data die daar lokaal gaten vertonen; *Figuur B1-31*). Zo zijn er beperkte veranderingen in de aftakkingen van het Westgeultje tussen suppletie 1 en 4 (*Figuur B1-64a*). Alleen de uiterste aftakking, gelegen tussen suppletie 4 en 5 (*Figuur B1-64b*), neemt geleidelijk in diepte af; tussen mei 2018 en november 2024 is deze aftakking met ruim 0,6 m in diepte afgenomen.

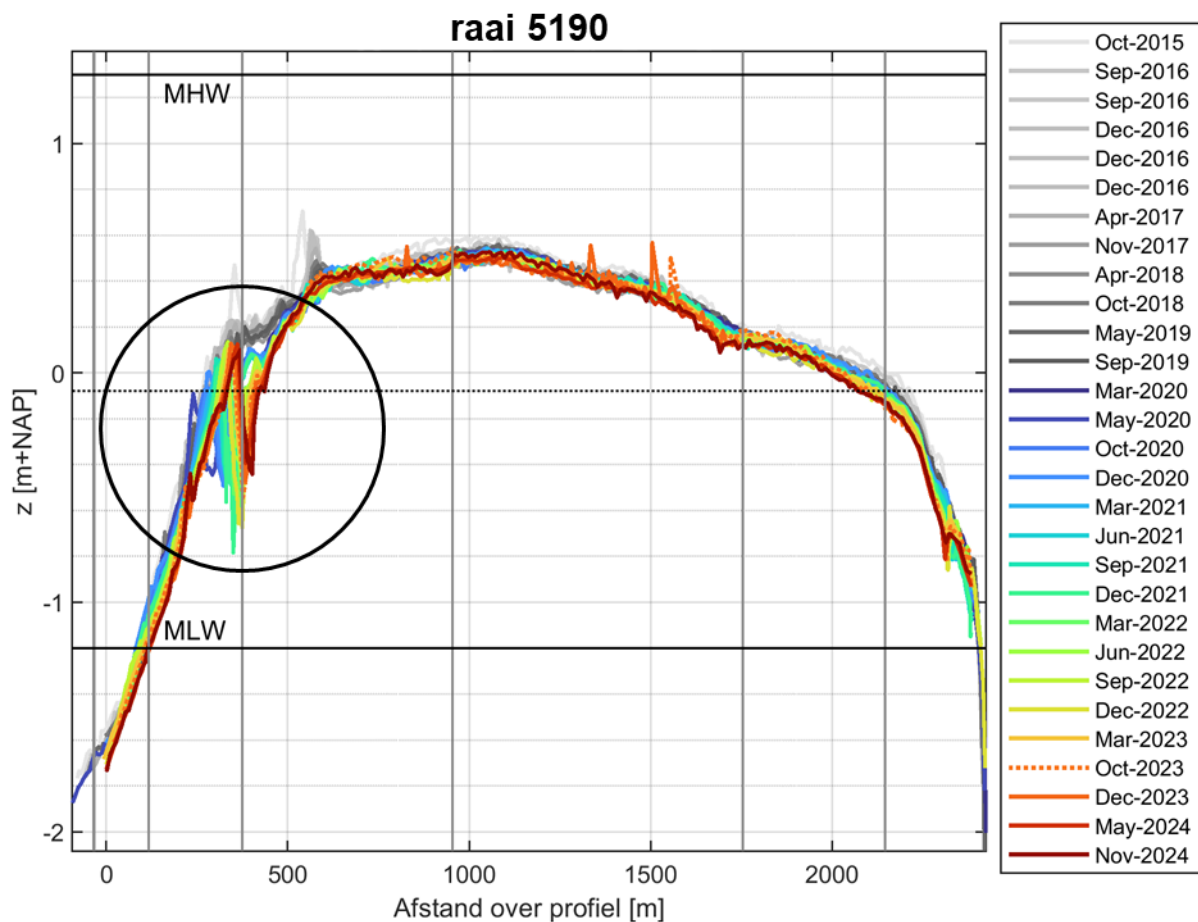
Door de ligging van suppleties 1 en 5 dicht bij elkaar, is in de zone ertussen een laagte, of geul, ontstaan. Dit gebied migreert iets (~10 m/jaar) naar het zuidoosten (*Figuur B1-64c*). De gebieden tussen suppletie 2 en 3 en 3 en 6, aan de oostkant van de plaat, vertonen relatief beperkte veranderingen (*Figuur B1-64d-e*).



Figuur B1-64. RTK-profielen tussen mei 2018 en november 2024 op vijf locaties (A-E) tussen de suppleties op de Roggenplaat. Aanvullend is ook de LiDAR data direct na suppleren (februari 2020) geïnterpoleerd langs dit profiel (in de legenda gemarkeerd met [L]). Afstand is positief naar het noordoosten voor raaisegmenten a, b en d, en positief naar het zuidoosten voor segmenten c en e.

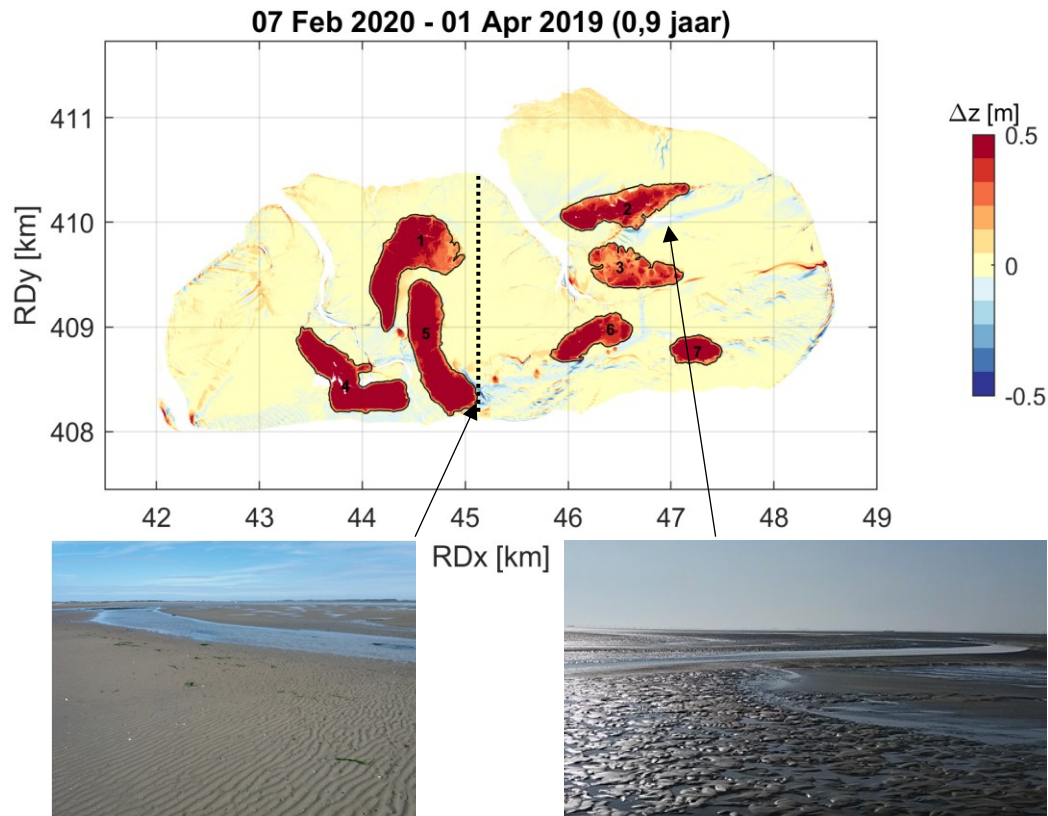
Geulvorming op de plaat

In Figuur B1-65 is de ontwikkeling langs RTK-dGPS raai 5190 weergegeven. Raai 5190 ligt ongeveer 100 m ten oosten van suppletie-element 5 (Figuur B1-66) en werd al vóór 2015 gemeten. De metingen vanaf 2020 (Figuur B1-65) geven in hoofdlijnen een continuïteit van de lange termijn ontwikkelingen aan met de meeste erosie in het zuiden (links in het profiel). In deze raai is sinds maart 2020, de eerste meting na aanleg van de suppletie-elementen, een lokale verlaging van ongeveer 40 cm zichtbaar (omcirkeld in Figuur B1-65). Dit komt overeen met de geulvorming aan de zuidoostzijde van suppletie 5, gemarkeerd in Figuur B1-66. In de daaropvolgende jaren neemt deze verlaging toe tot ongeveer 80 cm in december 2021. Tegelijkertijd migreert de geul tussen maart 2020 en november 2024 90 m naar het noordoosten. Deze migratie is (enigszins beperkt) zichtbaar in de verschilkaarten (Figuur B1-34) als sedimentatie aan de zuidzijde en erosie aan de noordzijde. In de laatste jaren is de geul weer verondiept tot ongeveer 40 cm in november 2024.



Figuur B1-65. Bodemligging langs RTK raai 5190, waarvan de ligging in Figuur B1-66 is aangegeven. De afstand neemt toe in noordelijke richting. De gemiddeld laagwater- (MLW) en hoogwaterstanden (MHW) zijn aangegeven, net als de gemiddelde waterstand (stippellijn). De T0 situatie is in grijs tinten gepresenteerd. De vorming en migratie van een afwateringsgeul dwars over raai 5190 is omcirkeld.

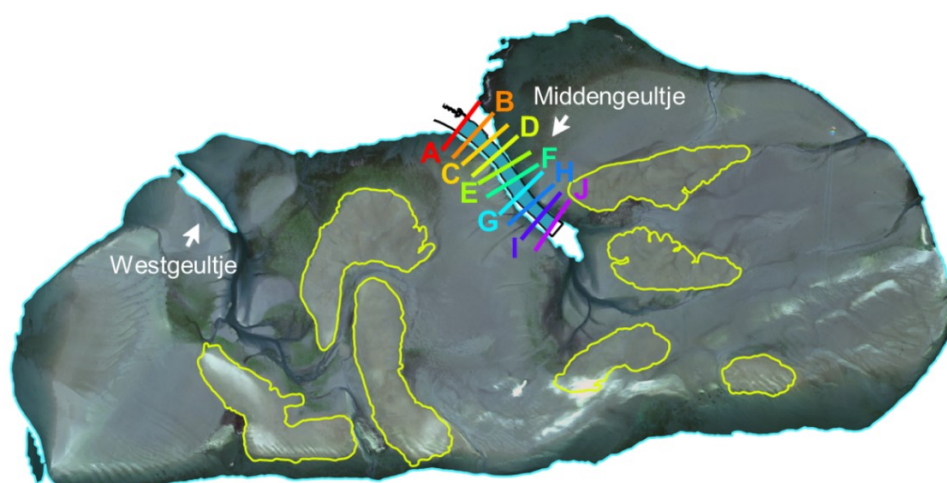
Uit de verschilkaart tussen april 2019 (vóór aanleg van de suppleties) en februari 2020 (na aanleg) is niet alleen af te leiden dat er aan de zuidoostzijde van suppletie-element 5 geulvorming plaatsvindt, ook aan de zuidzijde van suppletie-element 2 is al binnen enkele maanden na suppleren geulvorming opgetreden (Figuur B1-66). Dit is ook vastgesteld tijdens veldbezoeken met ook na het droogvallen van de plaat nog stroming door deze ontstane geultjes. Deze specifieke erosietrend ten zuiden van suppletie 2 is echter niet (duidelijk) zichtbaar in de verschilkaarten van de daaropvolgende jaren (Figuur B1-34) en lijkt dus niet door te zetten. Tussen suppletie 1 en 5 lijkt zich daarentegen wel een geul te vormen. Door de aanleg van deze twee suppleties vlak bij elkaar, is in de zone ertussen een laagte ontstaan. Tussen februari en oktober 2020 heeft hier erosie plaatsgevonden (Figuur B1-34). De jaren daarna stond er vaak water in deze laagte, waardoor er geen LiDAR data beschikbaar was (wijst op stagnerend water). De RTK metingen (Figuur B1-64c) laten zien dat deze geulvorming blijvend is en dat de uitslijting (verdieping) lokaal doorzet tot meer dan 50 cm in november 2024.



Figuur B1-66. Geulvorming in de maanden na aanleg van de suppleties zichtbaar in de foto's (7 juli 2020) en op de LiDAR verschilkaart. De zwarte stippellijn geeft de ligging aan van RTK raai 5190, waarvan de data in Figuur B1-65 is weergegeven.

Ontwikkeling Middengeultje (oostelijke afwateringsgeul)

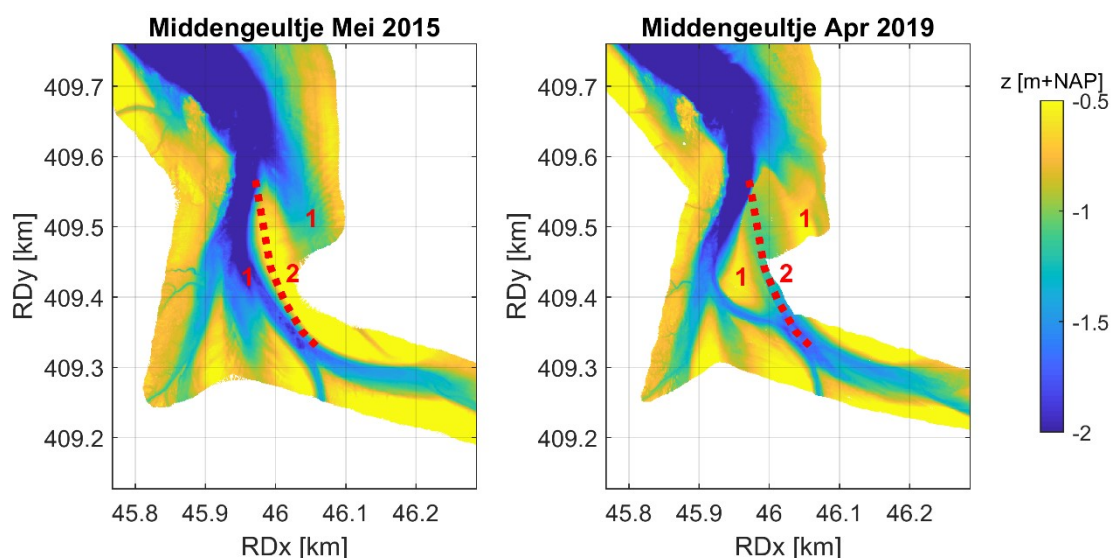
In de Roggenplaat zijn twee grote afwateringsgeulen aanwezig (Middengeultje en Westgeultje, zie *Figuur B1-67*). Deze geulen zijn relevant omdat deze onderdeel uitmaken van het natuurlijke plaatcomplex (*Figuur B1-15*) en een indicator zijn voor of de suppletie de autonome ontwikkelingen van de plaat heeft beïnvloed. Beide geulen zijn ontstaan als gevolg van een grootschalige ontwikkeling van vele decennia waarin verschillende plaatdelen zijn samengegroeid, de omvang van deze geulen is afgenomen en deze geulen in noordoostelijke richting migreerden (Paragraaf B1.3). Deze geulen vormen een belangrijk onderdeel van de morfologie van de Roggenplaat en beïnvloeden de stroming op de plaat. Vraag is of de ontwikkeling van deze afwateringsgeulen door de suppleties is beïnvloed. Om dat te kunnen beoordelen, is de ontwikkeling van het Middengeultje in detail beschouwd en is specifiek onderzocht of er een trendbreuk heeft plaatsgevonden na realisatie van de suppleties.



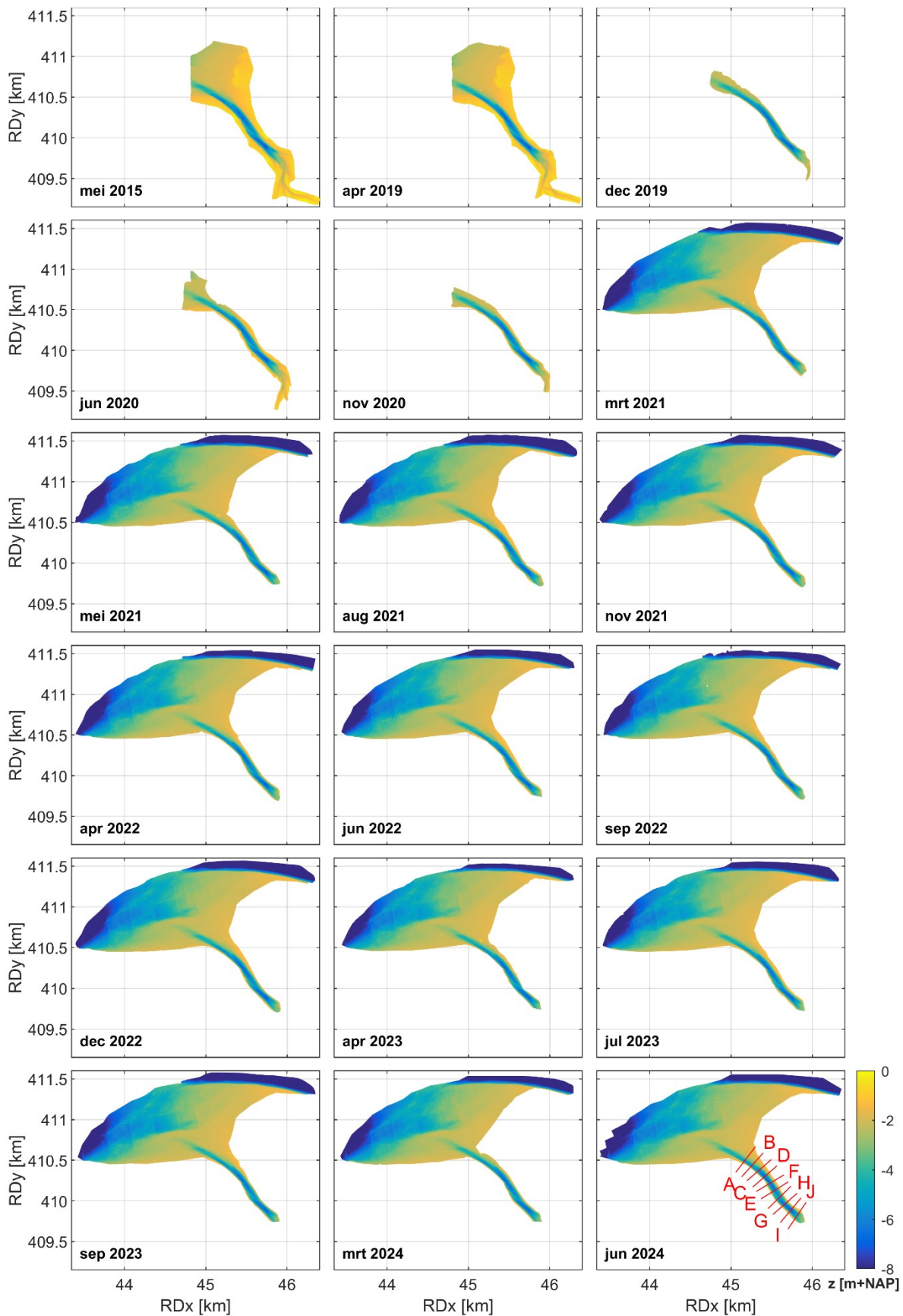
Figuur B1-67. Satellietfoto van juli/augustus 2022 (bron: satellietdataportaal.nl), uitgesneden op de MLW 2019 van de Roggenplaat. De contouren van de suppleties zijn weergegeven, evenals de tien raaien A t/m J door het Middengeultje. De geulzone onder de -2 m NAP tussen raai A en J voor juni 2024 is blauw gearceerd (geanalyseerd in Figuur B1-70, Figuur B1-72 en Figuur B1-73).

Een vergelijking tussen de Multibeam data (zie paragraaf B1.2.2 voor een toelichting van de metingen) van mei 2015 en april 2019 – de jaren met de grootste ruimtelijke dekking van deze data vóór suppleren – toont dat de oorsprong van het Middengeultje (het zuidoosten van het Middengeultje) een morfologisch dynamisch gebied is (Figuur B1-68). Dit is ook zichtbaar in de randen van de LiDAR data (zie bijvoorbeeld de verschilkaarten van maart 2018 en april 2019; *Figuur B1-34*). Twee aftakkingen van het Middengeultje zijn lokaal meer dan een halve meter aangezand en de grootste lokale aftakking lag in 2019 ongeveer 50 m naar het oosten ten opzichte van 2015 (gemarkeerd in *Figuur B1-68*). Het is onduidelijk of de geul een cyclische ontwikkeling doormaakt of dat dit een blijvende verandering in de lokale morfologie van het Middengeultje is, aangezien de datadekking te beperkt was om dit vast te stellen.

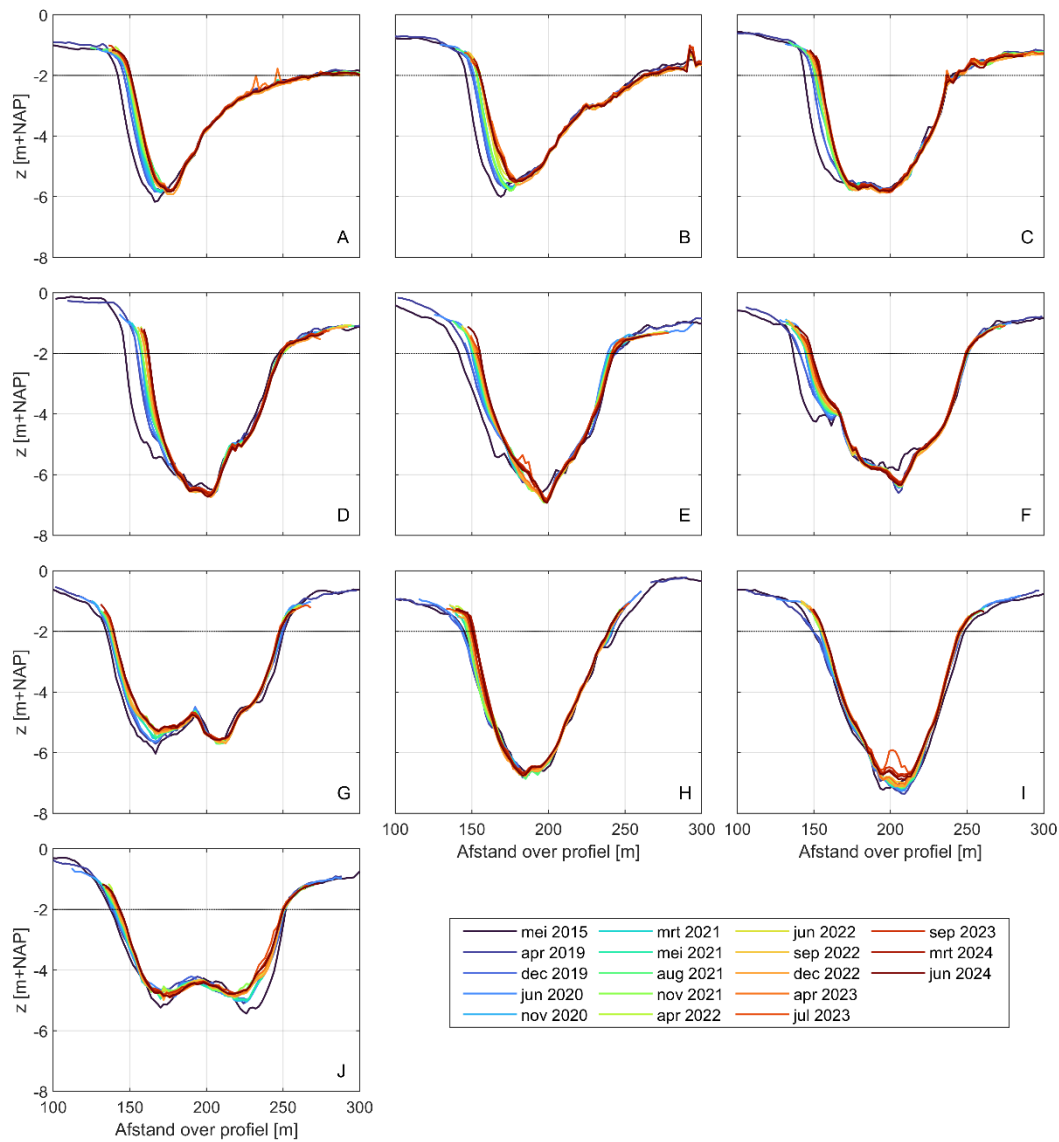
De Multibeam metingen laten verder zien dat de langjarige noordoostelijke migratie van de zuidwestelijke geulwand die in de eerdere analyses al zichtbaar was (Walles et al., 2021a) doorzet (*Figuur B1-69*, *Figuur B1-70*, *Figuur B1-71*). Daarnaast laat *Figuur B1-71* zien dat er tussen augustus en november 2021, juni en september 2022, september en december 2022 en juli en september 2023 verlagingen en tussen november 2021 en april 2022 en december 2022 en april 2023 verhogingen ten noordwesten van de geul hebben plaatsgevonden. Deze veranderingen in bodemligging hangen zeer waarschijnlijk samen met de mosselpercelen die hier liggen (cirkelvormige patronen wijzen op mosselvisserijactiviteiten op de percelen) en dus niet met morfologische activiteit. Tussen september 2022 en december 2022 lijkt er erosie te hebben plaatsgevonden in het Middengeultje en in de daaropvolgende periode (tussen december 2022 en april 2023) lijkt er sedimentatie te hebben plaatsgevonden. Echter, een dergelijke alternerende ontwikkeling van de bodemligging kan ook wijzen op een meetfout (een te laag ingemeten bodemligging in december 2022).



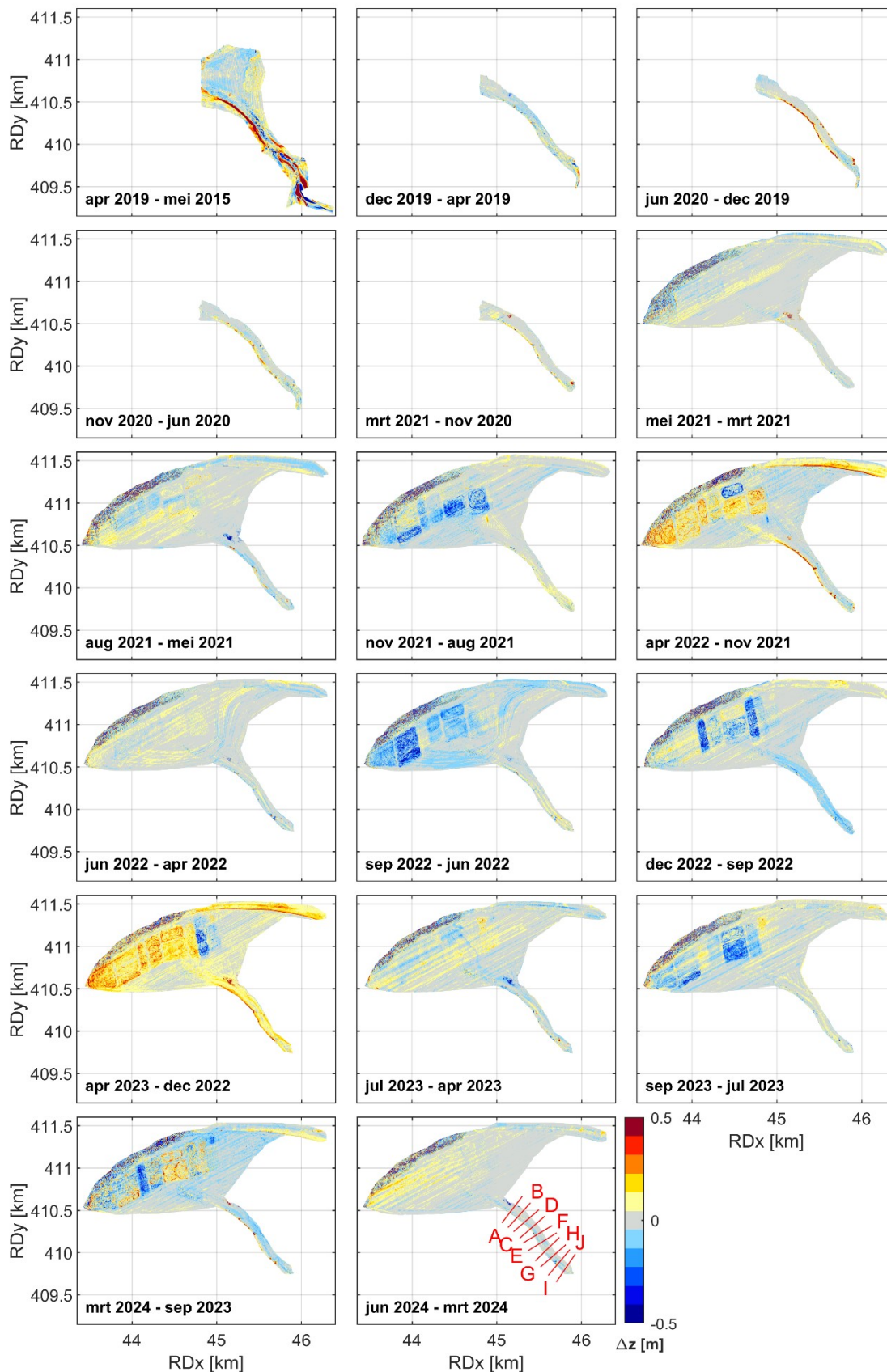
Figuur B1-68. Detailopname van de Multibeam data, gefocust op de morfologische patronen in het zuidoosten van het Middengeultje in mei 2015 (links) en april 2019 (rechts). Aangezande geultjes zijn met 1 gemarkeerd, de nieuwe locatie van het geultje is met de stippellijn en 2 gemarkeerd.



Figuur B1-69. Multibeam opnamen van het Middelengeultje van de Roggenplaat van 2015 tot en met 2024. De profielen langs de rode lijnen zijn weergegeven in Figuur B1-70. De figuur laat de dekking van de Multibeam data zien.



Figuur B1-70. Profielen geïnterpoleerd langs de raaien A-J (zie Figuur B1-69). De afstand langs de profielen is positief in noordoostelijke richting. De horizontale stippellijn komt overeen met -2 m NAP, de hoogste ligging van de (rechter)geulwand bij raai A voor maart 2024 (maatgevend).

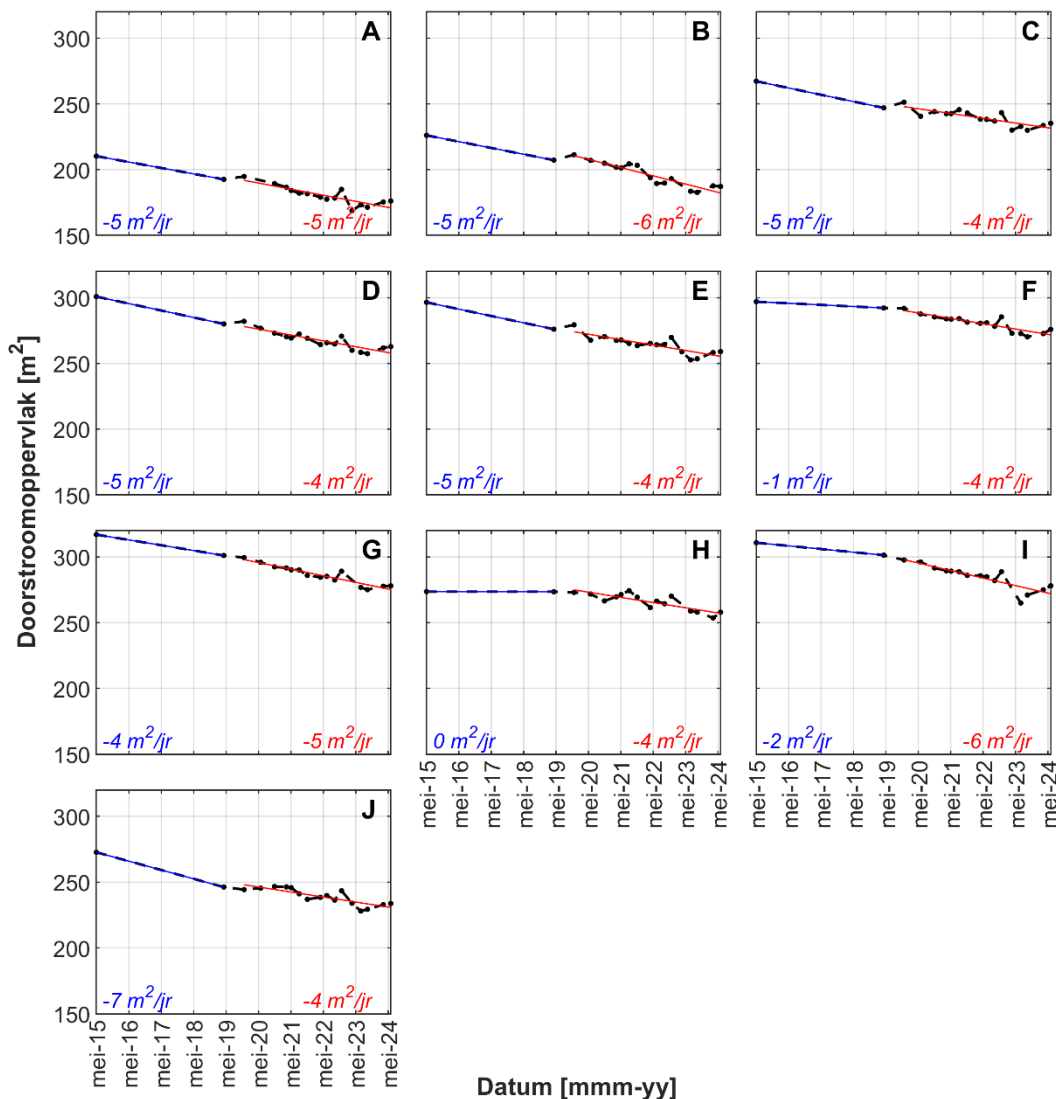


Figuur B1-71. Verschilkaarten van de opvolgende Multibeam opnamen van 2015 tot en met 2024 van het Middengeultje. De profielen langs de rode lijnen zijn weergegeven in Figuur B1-70.

Om de migratiesnelheid van de geulwand te kwantificeren, is de verplaatsing van de x-positie van de kruising met de NAP-2 m lijn (zie Figuur B1-70; voor hogere hoogteliggingen hadden niet alle profielen data), voor raai A tot en met J, voor zowel de zuidwestelijke als de noordoostelijke geulwand berekend. De

verplaatsing van de zuidwestelijke geulwand verschilt voor de verschillende raaien (Figuur B1-70), maar de algemene trend is een verplaatsing naar het noordoosten. De trends in geulwandverplaatsing vóór (mei 2015 tot en met april 2019, let op dit zijn slechts twee datapunten) en na (december 2019 tot en met juni 2024) aanleg van de suppleties zijn met elkaar vergeleken. De gemiddelde trend voor de zuidwestelijke geulwand was 0,8 m/jaar vóór en 1,2 m/jaar (gemiddelde $r^2 = 0,9$) na aanleg van de suppleties. De gemiddelde verplaatsing naar het noordoosten is dus toegenomen. De noordoostelijke geulwand vertoonde substantieel minder migratie. Gemiddeld was de trend van de noordoostelijke geulwand vóór de suppleties -0,04 m/jaar en na de suppleties -0,3 m/jaar (negatief dus naar het zuidwesten; gemiddelde $r^2 = 0,7$).

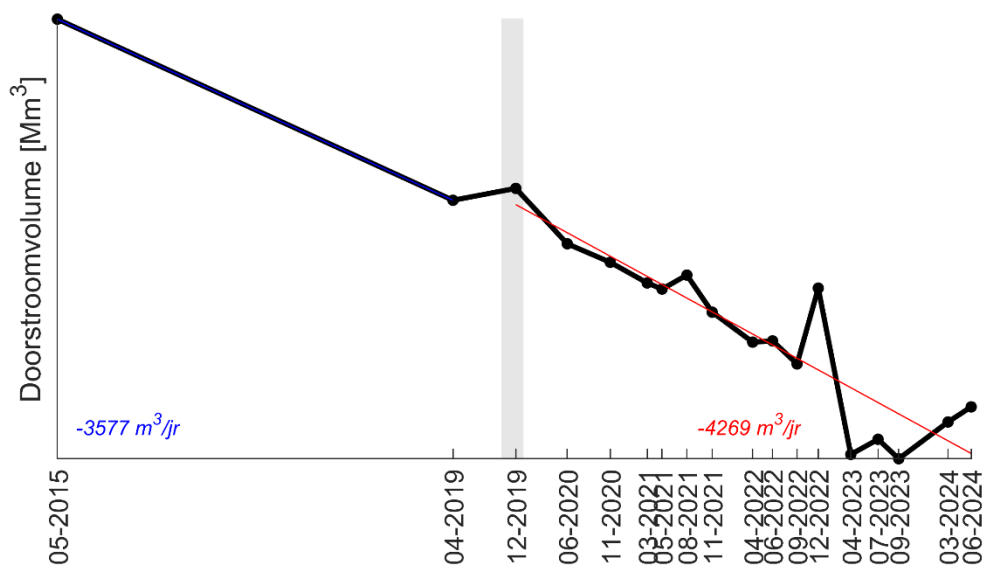
Netto wordt de geul dus kleiner. Figuur B1-72 laat zien hoe het doorstroomoppervlakte in de geul langs raai A t/m J is veranderd in de tijd. Het doorstroomoppervlakte is groter verder platinwaarts in de geul tussen profiel A en G. Langs alle raaien is het doorstroomoppervlakte afgenomen. De trend in doorstroomoppervlakteverandering langs de raaien is bepaald vóór (05-2015 t/m 04-2019, let op dit zijn slechts twee datapunten) en na (12-2019 t/m 06-2024) aanleg van de suppleties. De gemiddelde trend was vóór aanleg -3,9 m²/jaar en na aanleg -4,6 m²/jaar. De snelheid waarmee het doorstroomoppervlak afnam lijkt dus enigszins te zijn toegenomen, al zijn er ook diverse profielen waar het tegenovergestelde het geval was en is de trend vóór suppleren slechts op twee datapunten gebaseerd. Alle profielen tonen een relatief sterke variatie in doorstroomoppervlak rond de meting van december 2022 (Figuur B1-72). Dit relateert aan de waargenomen tijdelijke variatie in bodemligging van de geul (Figuur B1-71) die zoals eerder benoemd mogelijk is veroorzaakt door een meetfout.



Figuur B1-72. Het doorstroomoppervlakte van het Middengeultje langs raai A t/m J onder de -2 m NAP tussen 2015 en 2024. Figuur B1-69 geeft de ligging van de raaien weer. De trends vóór en na aanleg van de suppleties zijn weergegeven in blauw en rood.

Figuur B1-73 laat zien dat de verandering in doorstroomvolume tussen raai A en J qua trend overeenkomt met de algemene verandering in doorstroomoppervlakte; Het doorstroomvolume is tussen 2015 en 2024 afgenomen. Vóór aanleg van de suppleties (mei 2015 t/m april 2019) was de trend $-3.600 \text{ m}^3/\text{jaar}$, na aanleg (december 2019 t/m juni 2024) was de trend $-4.300 \text{ m}^3/\text{jaar}$. De meting van december 2022 lijkt – conform de eerder beschreven observaties – een meetfout.

Als er sprake zou zijn van een trendbreuk, suggereren deze metingen dat deze beperkt is tot een versterking in volumeafname van het Middengeultje van $700 \text{ m}^3/\text{jaar}$. De vraag is of deze verandering in volumeafname groot genoeg is om te kunnen spreken van een significante trendbreuk (niet gedomineerd door meetfouten). Benadrukt wordt dat het Middengeultje vóór suppleren slechts tweemaal is ingemeten over een periode van 4 jaar. Een verschil van $700 \text{ m}^3/\text{jaar}$ over 4 jaar betekent een verschil in erosie van in totaal 2.800 m^3 . Gemiddeld over het oppervlakte van het Middengeultje (ongeveer 20 ha) betekent dit dus een verschil in erosie van 1,4 cm over deze 4 jaar. Dit gemiddelde erosieverschil is dermate klein dat het niet is uit te sluiten dat deze het gevolg is van een meetfout in de Multibeam metingen van mei 2015 en/of april 2019. Kortom, uit deze metingen blijkt geen significante verandering in volumeafname van het Middengeultje.



Figuur B1-73. Het doorstroomvolume onder de -2 m NAP tussen raaien A en J voor 2015 t/m 2024. Het grijze vlak beslaat de aanlegperiode van de zeven suppletie-elementen. De trends vóór en na aanleg van de suppleties zijn weergegeven in blauw en rood.

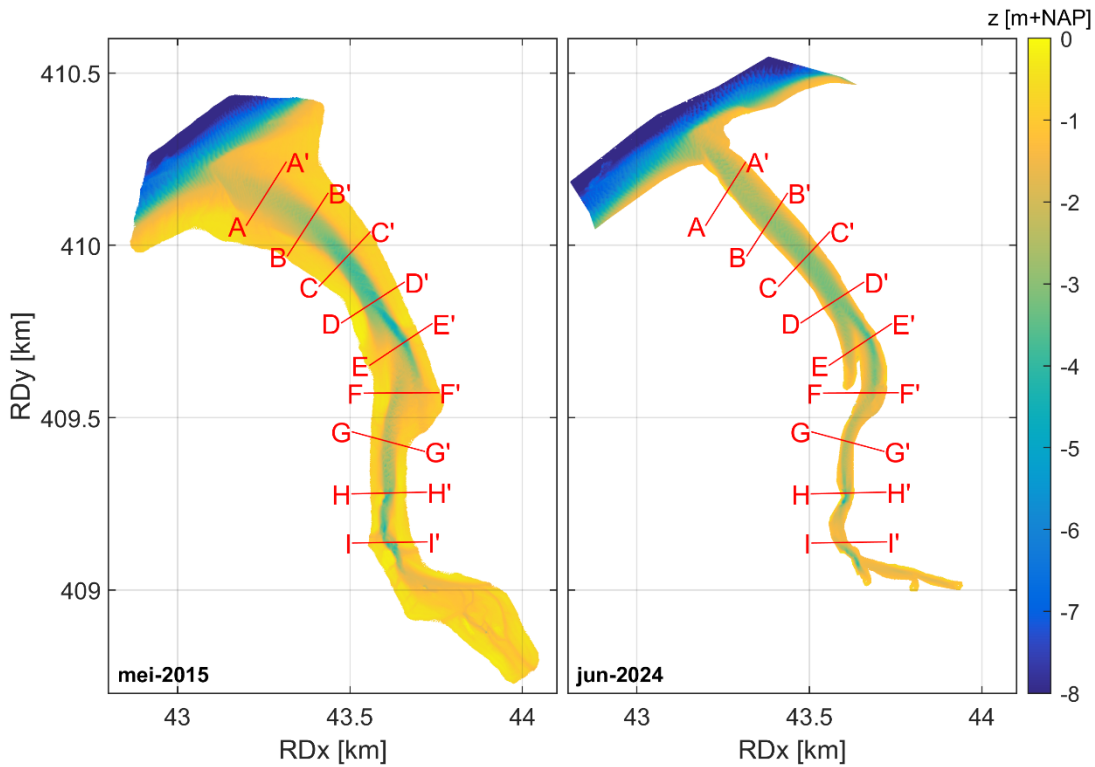
Ontwikkeling Westgeultje (westelijke afwateringsgeul)

Het Westgeultje is alleen in mei 2015 en in juni 2024 ingemeten. Dit maakt een gedetailleerde analyse van de veranderingen in de tijd, zoals uitgevoerd voor het Middengeultje, niet mogelijk. Hier volgt daarom een beknopte vergelijking tussen de multibeammetingen van vóór (mei 2015) en na aanleg van de suppletie (juni 2024).

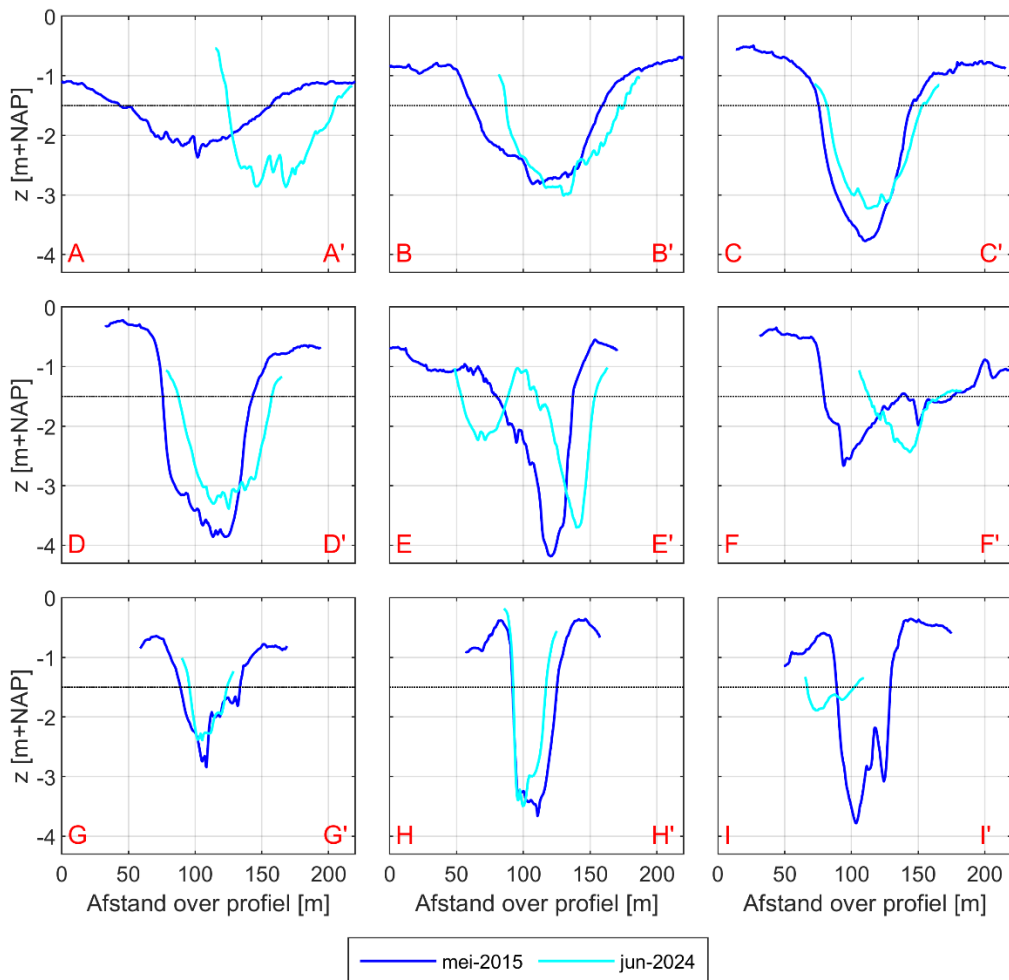
Tussen 2014 en 2024 is de geul vrijwel overal langs de profielen in diepte afgenomen (Figuur B1-74, Figuur B1-75, Figuur B1-76). De sterkste afname vond ver plaatinwaarts plaats, bij profiel I. Mede hierdoor is ook het doorstroomoppervlak, met uitzondering van profiel A, over alle profielen afgenomen. Dit betreft zowel een versmalling als een verondieping van de geul.

Verder valt op dat de geul, met name in de bocht tussen profiel D en G, relatief dynamisch is, wat ook te zien is aan de sedimentatie-erosiepatronen (zie Figuur B1-76). In mei 2015 was hier nog duidelijk één geul (profiel E), maar in juni 2024 is er lokaal sprake van een tweegeulenstelsel.

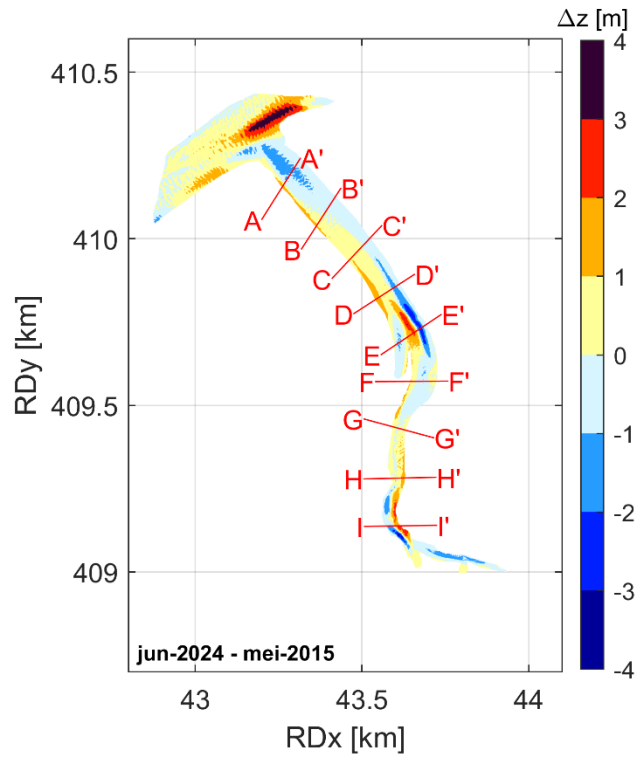
Aangezien er slechts één meting voor en één meting na het suppleren heeft plaatsgevonden, is het niet mogelijk om veranderingen in trends waar te nemen. Wel kan op basis van de historische Vaklodingen data (Figuur B1-16) worden geconcludeerd dat het Westgeultje al voor suppleren (2019) in omvang afnam.



Figuur B1-74. Multibeam opnamen Westgeultje Roggenplaat voor mei 2015 en juni 2024. De profielen langs de rode lijnen zijn weergegeven in Figuur B1-75. De figuur laat de dekking van de Multibeam data zien.



Figuur B1-75. Profielen geïnterpoleerd langs de raaien A-I (zie Figuur B1-74). De afstand langs de profielen is positief in noordoostelijke richting. De gestreepte lijn komt overeen met -1,5 m NAP.



Figuur B1-76. Verschilkaarten van de Multibeam opnamen van 2015 en 2024 van het Westgeultje. De profielen langs de rode lijnen zijn weergegeven in Figuur B1-75.

B1.7.5. Veranderingen in stroming

Onderliggende kennisvraag morfologie 5 (aanvullend)

Hoe is de stroming en afwatering op de Roggenplaat en in de oostelijke geul (het Middengeultje) veranderd door de aanleg van de suppleties?

Samenvattende beantwoording:

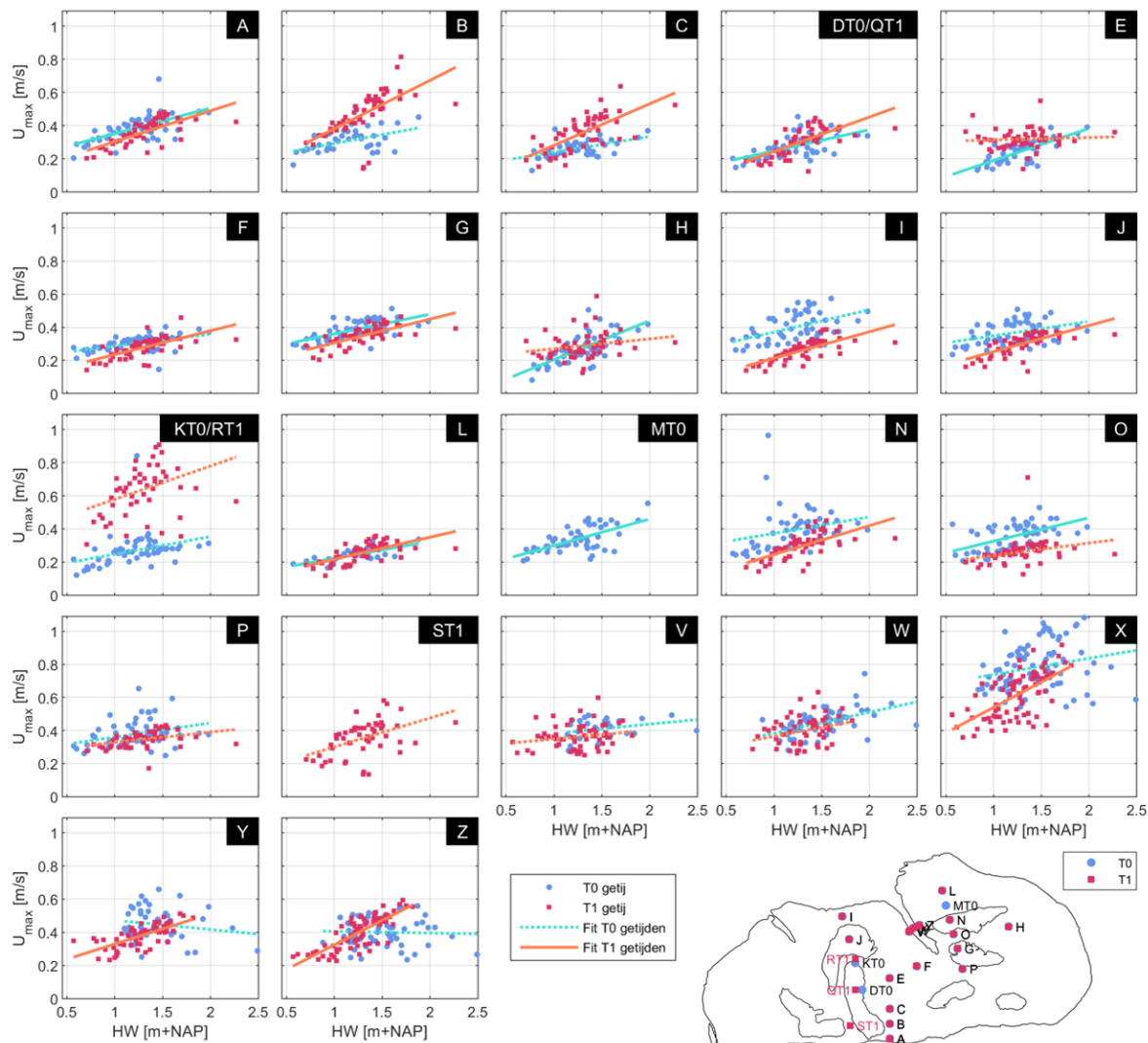
Uit metingen en modellering van de stroming komt naar voren dat er geen grootschalige verandering in dieptegemiddelde stroomsnelheid is opgetreden door aanleg van de suppleties. Op sommige locaties, verspreid over de plaat, zijn er beperkte verschillen ($\leq 0,05$ m/s) in stroomsnelheid, terwijl er op andere locaties wel substantiële ($> 0,1$ m/s) veranderingen zijn waargenomen. Zo is op bepaalde suppleties (met name suppletie 4) de stroming lokaal afgenomen. Toenamen in snelheid vonden vooral plaats tussen of net naast de suppleties. De gemeten toename in stroomsnelheid tussen suppleties 1 en 5, en ten oosten van suppletie 5 volgt ook uit de modellering. Deze toename tussen suppleties 1 en 5 is de sterkst gemeten toename ($+0,4$ m/s) en hangt waarschijnlijk samen met het vernauwen (en daarmee versnellen) van de stroming tussen deze suppleties. Uit de metingen en modellering volgt dat de stroming in het Middengeultje is afgenomen. Dit valt hoofdzakelijk te verklaren doordat er met de aanwezigheid van de suppleties minder water de plaat op- en afstroomt (kleinere getijdeprisma). Verder kan de afname in doorstroomoppervlak van het Middengeultje, een ontwikkeling die al vóór suppleren optrad, ook een rol spelen in deze snelheidsafname.

Op 21 locaties verspreid over de Roggenplaat (16) en het Middengeultje (5) zijn voor T0 en T1 stroommetingen gedaan met ADCPs (zie paragraaf B1.2.2 voor de methodologie). In *Figuur B1-77* zijn voor alle meetlocaties de maximale dieptegemiddelde snelheden van elk getij uitgezet tegen de opgetreden hoogwaterstand. Naast de datapunten voor elk getij (afzonderlijk gepresenteerd voor T0 en T1), zijn zowel voor T0 als voor T1 lineaire trendlijnbenaderingen geplot door de meetpunten. Indien de determinatiecoëfficiënt (r^2) kleiner dan 0,3 was, is de trendlijn als een stippellijn geplot (gemiddeld was r^2 0,30 over alle meetpunten en 0,46 over de meetpunten met een r^2 groter dan 0,3). Het bestaan van deze relatie tussen hoogwaterstand en piekstroming maakt het mogelijk de analyses te focussen op verandering in stroming door de suppleties zonder dat verschillen in getijslag of windopzet tussen T0 en T1 de resultaten domineren.

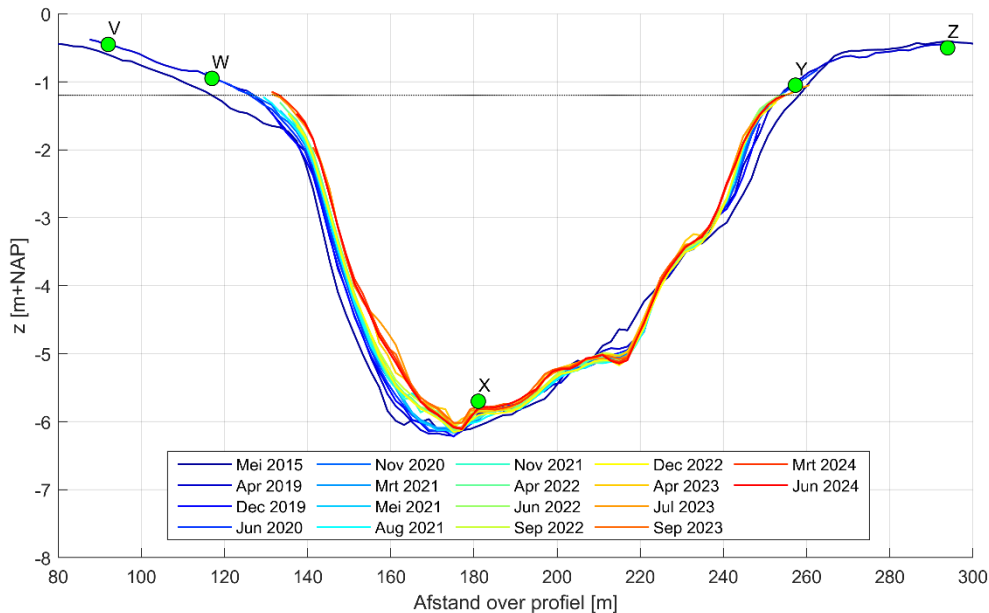
Hoewel er voor sommige meetpunten beperkte ($\leq 0,05$ m/s) verschillen zijn tussen de gemiddelde T0 en T1 data (Z, L, F, H, A, D/Q, P, G, V, W; in volgorde van toenemend verschil), zijn er op andere punten juist wel grote veranderingen in stroomsnelheden opgetreden (*Tabel B1-11*). Zo is de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid voor meetpunten I, N, O en X afgenomen tussen T0 en T1 met gemiddeld 0,12 m/s. De snelheden zijn juist toegenomen met gemiddeld 0,21 m/s op locaties B, C en K/R. De sterkste toename is waargenomen op locatie K/R, tussen suppleties 1 en 5, met een gemiddelde toename van 0,37 m/s. Dit hangt waarschijnlijk samen met het ontstaan van een nauwe passage tussen de suppleties waarin de stroming versnelt. In het ontwerp (Van der Werf et al., 2016b) was een dergelijke versnelling van de stroming door de vernauwing tussen de suppleties al voorspeld met de modellering. Deze metingen bevestigen deze lokale snelheidstoename dus.

Meetpunten V, W, X, Y en Z liggen op een profiel dwars op het Middengeultje. Het profiel ligt nabij profielen F & G uit de Multibeam analyse (*Figuur B1-67*). In *Figuur B1-78* is de hoogteligging langs de dwarsdoorsnede van de geul bepaald tussen meetpunt V en Z op basis van de Multibeam data. Zoals zichtbaar ligt meetpunt X in het midden en nabij het diepste deel van de geul. *Figuur B1-77* laat zien dat de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de T1 metingen is afgenomen ten opzichte van de T0 metingen. Deze afname in snelheid in het Middengeultje zou in bepaalde mate kunnen samenhangen met de langjarige verkleining van het

doorstroomoppervlakte van het Middengeultje (Figuur B1-78; zie voor verdere analyses van deze morfologische veranderingen paragraaf B1.7.4). Echter, tijdens de ontwerpfase (Van der Werf et al., 2016b) is met de modellering aangetoond dat met alleen de toevoeging van de suppletie-elementen op de plaat (dus onveranderde geometrie Middengeultje) het debiet en de snelheid in het Middengeultje al afneemt (zie ook Figuur B1-79). Dit valt te verklaren doordat er door de aanwezigheid van de suppleties minder water de plaat op en af stroomt (kleinere getijdeprisma).



Figuur B1-77. De maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid voor elk gemeten getij, weergegeven ten opzichte van de maximale waterstand van elk getij voor alle ADCPs op de Roggenplaat en in het Middengeultje. De T0 en T1 metingen zijn afzonderlijk gemarkeerd (zie legenda). Een lineaire trendlijnbenadering is getoond voor zowel de T0 als de T1 datapunten. De trendlijn is als stippellijn weergegeven indien de determinatiecoëfficiënt (r^2) kleiner is dan 0,3.



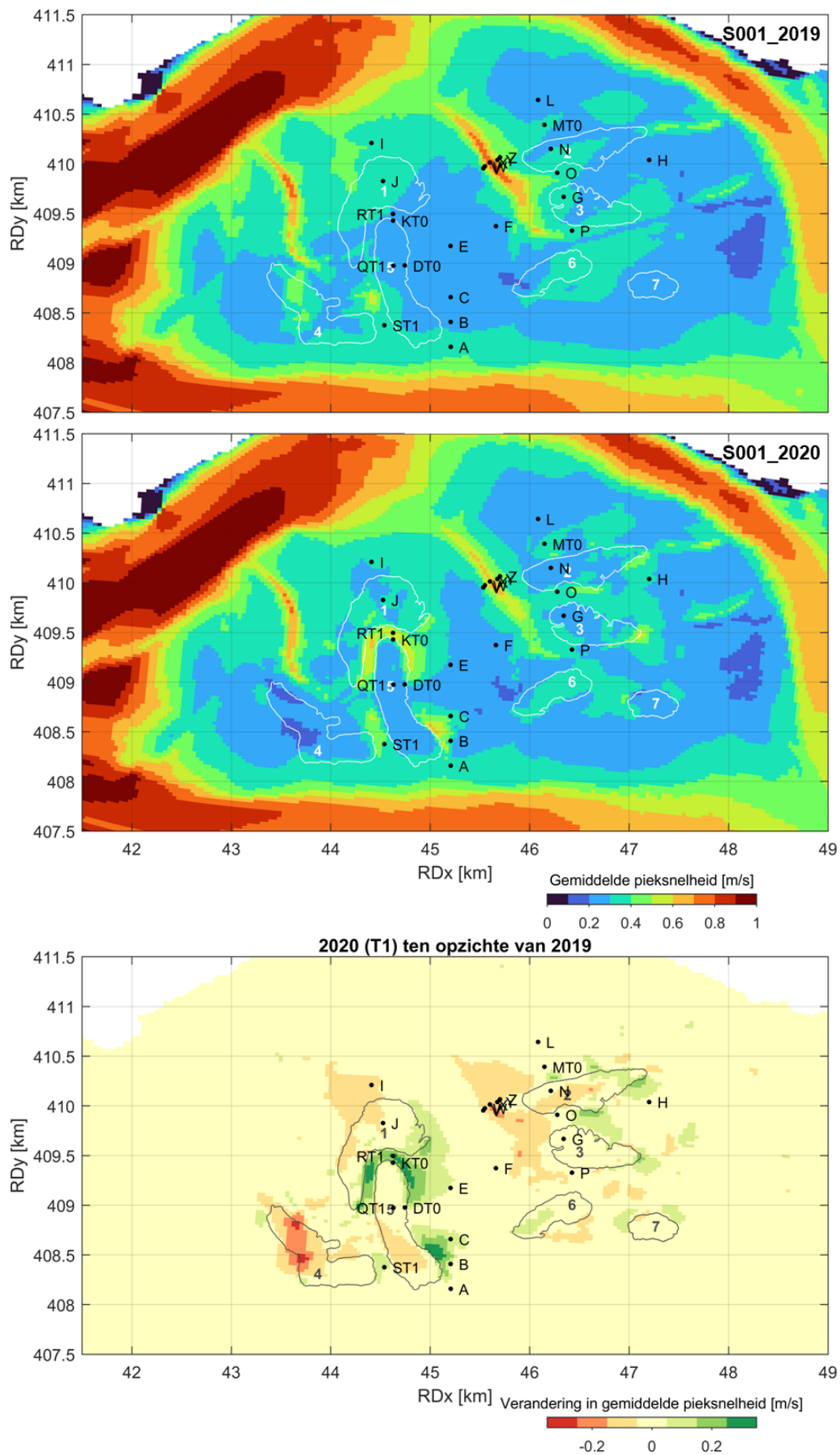
Figuur B1-78. Een dwarsdoorsnede van de bodemligging langs de ADCP meetpunten in het Middengeultje (zie Figuur B1-77) op basis van de Multibeam data. De afstand langs de profielen is positief in noordoostelijke richting. De gemiddeld laagwater lijn is met de zwarte stippellijn weergegeven.

Tabel B1-11. De dieptegemiddelde piekstromsnelheid per getij, gemiddeld over alle gemeten getijden, voor de ADCPs op de Roggenplaat en in het Middengeultje (zie Figuur B1-77 voor locaties). De T0 en T1 waarden zijn afzonderlijk weergegeven en de meest rechter kolom laat het verschil zien tussen de T0 en T1 waarden. De rijen zijn gesorteerd van kleine naar grote veranderingen in snelheid met in groen snelheidsstoe-namen en in rood snelheidsafnamen.

	Gemiddelde Umax [m/s]		
	T0	T1	T1 - T0
Z	0,40	0,40	0,00
L	0,24	0,26	0,01
F	0,30	0,28	-0,02
H	0,27	0,29	0,02
A	0,39	0,36	-0,03
DT0/QT1	0,27	0,31	0,03
P	0,38	0,35	-0,03
G	0,38	0,35	-0,04
V	0,41	0,36	-0,05
W	0,45	0,40	-0,05
E	0,25	0,32	0,07
J	0,37	0,30	-0,07
Y	0,45	0,38	-0,07
C	0,26	0,36	0,09
O	0,36	0,26	-0,09
N	0,39	0,30	-0,10
I	0,40	0,26	-0,14
B	0,31	0,47	0,16
X	0,78	0,61	-0,16
KT0/RT1	0,27	0,64	0,37
MT0	0,34		
ST1		0,35	

Omdat de ruimtelijke dekking van de stroomsnelheidsmetingen beperkt is, is aanvullend een Delft3D model ingezet om de inzichten uit de metingen ruimtelijk te kunnen opschalen. Hiertoe is een simulatie uitgevoerd met de 2019 bodemligging (vóór suppleren) en de 2020 bodemligging (na suppleren). Een toelichting van de modelopzet is in paragraaf B1.2.5 gegeven. Omdat, afgezien van de bodemligging, de simulaties niet verschillen (zelfde hydrodynamische forcering) zijn veranderingen in stroming direct het gevolg van veranderingen in de morfologie. Deze aanpak impliceert ook dat de resultaten niet een-op-een vergeleken kunnen worden met de gemeten waarden.

Figuur B1-79 toont de gemiddelde pieksnelheden over de representatieve maand (15 januari – 14 februari 2015) voor de 2019 bodemligging, 2020 bodemligging en het verschil tussen de snelheden voor beide bodemliggingen. Deze modelresultaten bevestigen het beeld dat ook al uit de metingen naar voren kwam: er is tussen T0 en T1 een afname in stroming in het Middengeultje, een toename in de zone tussen suppleties 1 en 5 en een toename ten oosten van suppletie 5. De modellering laat zien dat de reikwijdte van de gemeten toename in snelheid ten oosten van suppletie 5 relatief beperkt is (<500 m). Aanvullend tonen deze simulaties dat de grootste snelheidsafname (tot ongeveer 0,3 m/s) op suppletie 4 heeft plaatsgevonden. Op deze suppletie zijn geen metingen uitgevoerd. Mogelijk heeft deze snelheidsafname op suppletie 4 (ten zuiden van het Westgeultje) te maken met het feit dat de stroming op de plaat van/naar het Westgeultje door de aanwezigheid van suppletie 4 lokaal geblokkeerd wordt (zeker wanneer deze suppletie nog niet volledig onderwater staat). Tot slot toont de modellering dat de waargenomen afname in stroomsnelheid in het Middengeultje relatief uniform over deze geul heeft plaatsgevonden (het betreft geen lokaal effect). Dit impliceert dat het debiet door het Middengeultje is afgenomen (zoals reeds aangetoond met de modellering in de ontwerpfase; Van der Werf et al., 2016b).



Figuur B1-79. Modelresultaten van de stromingssimulatie met het Delft3D model voor de T0 (2019, boven) en T1 (2020, midden) bodem met de hydrodynamica van een representatieve maand (twee spring-doodtij cycli; 15 januari – 14 februari 2015) zonder golven. De onderste figuur laat de verandering in gemiddelde peeksnelheid zien tussen 2019 en 2020.

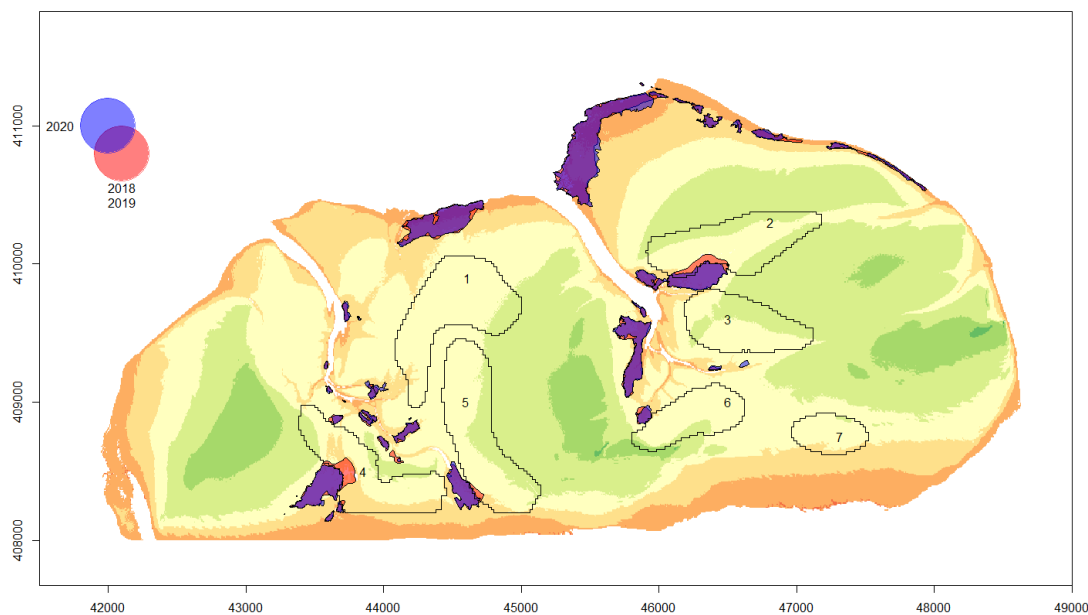
Onderliggende kennisvraag morfologie 6

Hebben oesterriffen een rol in het vasthouden van (gesuppleerd) sediment op de Roggenplaat?

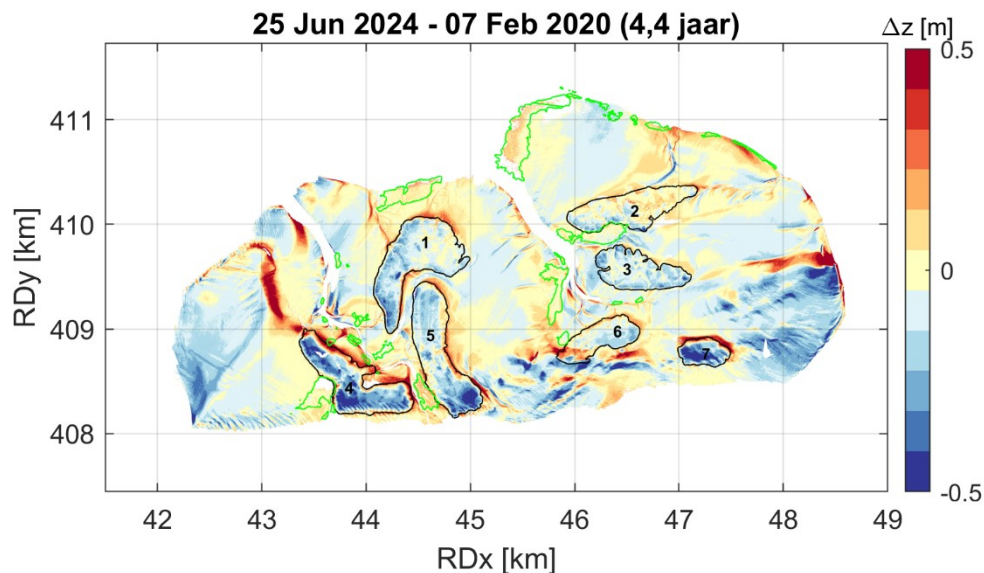
Samenvattende beantwoording:

Een aantal van de oorspronkelijk aanwezige wilde oesterriffen ligt in de nabijheid van enkele suppletie-elementen. Er zijn aanwijzingen dat deze wilde oesterriffen de suppletievoet in enige mate hebben gestabiliseerd (lokaal sedimentatie waargenomen). In hoeverre deze stabilisatie daadwerkelijk het gevolg was van de aanwezigheid van deze riffen, is met de morfologische data niet vast te stellen. Er zijn immers ook suppletieranden die relatief stabiel zijn gebleven in afwezigheid van dergelijke riffen. Wel staat vast dat de hooggelegen suppletiedelen (tot een meter boven de hoogte van de riffen) zeer substantieel erodeerden ondanks de nabijheid van een wild oesterrif. Dit omdat golven bij relatief grote waterdiepten (ten opzichte van de golfhoogte) nagenoeg zonder energieverlies de riffen passeren (conform Walles et al., 2015). Als de oesterriffen dus al een rol spelen in het vasthouden van het sediment, is deze rol dus beperkt tot de laaggelegen delen zoals de suppletievoet waar de riffen door golfdemping een rol kunnen spelen.

Oesterriffen stabiliseren lokaal de bodem en kunnen sedimentatie in de achtergelegen gebieden stimuleren door afname van golfenergie en stroming (Walles et al., 2015). Op de Roggenplaat zijn er op meerdere locaties wilde oesterriffen aanwezig, gelegen met een bodemligging rond de -0,1 tot -0,5 m NAP (Figuur B1-80). Een deel van deze riffen liggen direct naast een suppletie. Door de ligging van de oesterriffen net onder NAP, terwijl de suppleties ruim boven NAP zijn aangelegd, is er een beperkt effect op de morfologische ontwikkeling van de hoger gelegen suppleties te verwachten omdat een groot deel van de golven de riffen zullen passeren zonder substantieel energieverlies. In deze paragraaf wordt beschouwd of er toch aanwijzingen zijn dat deze riffen de ontwikkelingen van de suppleties beïnvloeden.



Figuur B1-80. Locaties van de oesterriffen op de Roggenplaat vóór aanleg van de suppleties in 2018-2019 en na aanleg in 2020-2021. Grootste verschillen komen door gedeeltelijke bedekking van de oesterriffen door het suppletiezand (binnen contouren). Op de achtergrond is de hoogteligging van de Roggenplaat vóór suppleren weergegeven (in NAP) met de suppletiecontouren in zwart.

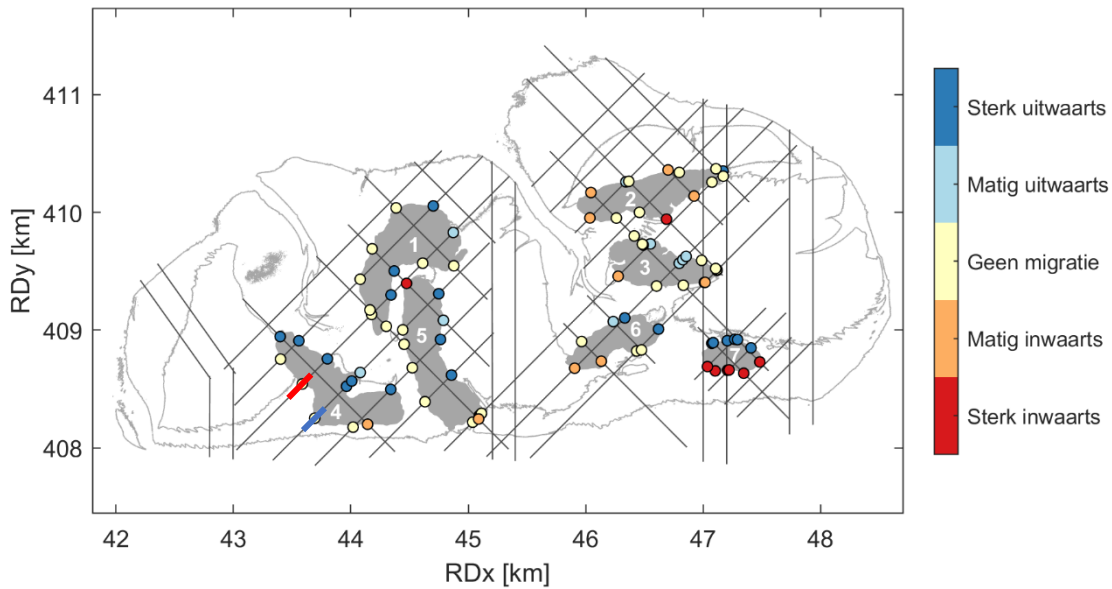


Figuur B1-81. Locaties oesterriffen na aanleg (2020-2021) in groen, aangegeven op de verschilkaart van de LiDAR metingen tussen 25 Juni 2024 en 7 Februari 2020.

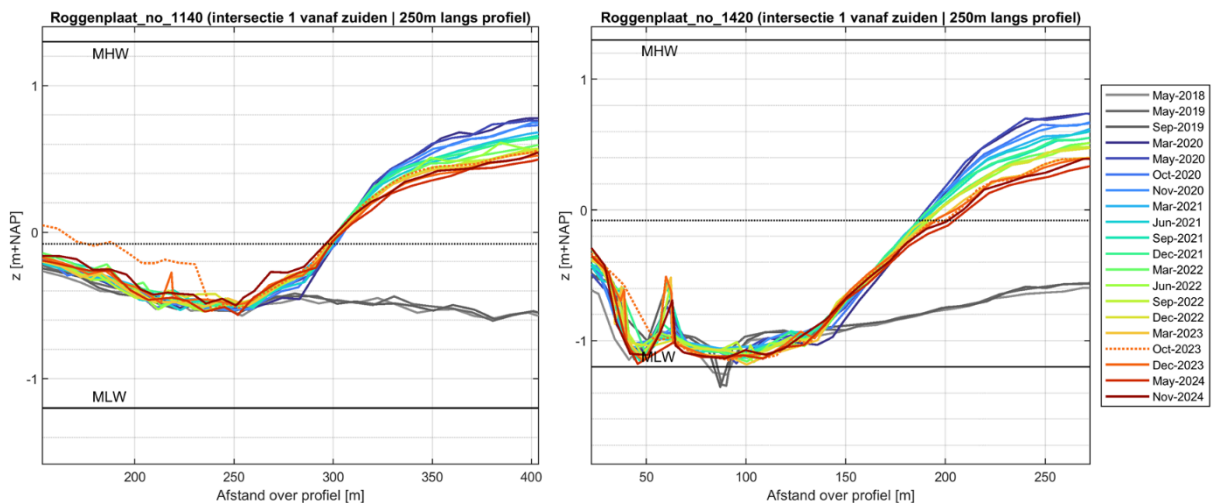
De oesterriffen zijn zelf relatief stabiel gebleven na het aanleggen van de suppletie-elementen. *Figuur B1-81* toont bijvoorbeeld beperkte veranderingen in hoogteligging binnen de rif-contouren, enige verhogingen daargelaten, bijvoorbeeld binnen het meest noordelijk gelegen rif. De morfologische ontwikkeling van de gesuppleerde delen rondom de riffen wijken op het oog maar beperkt af van de andere gesuppleerde delen. Uitzondering daarop is de voet (de laaggelegen rand) van suppletie 4 rondom het zuidwestelijk gelegen rif. Ten (noord)oosten van dit rif is tot dusver rond de suppletievoet lokaal sprake geweest van enige sedimentatie. Een kwalitatieve bepaling van de horizontale migratie van de suppletieranden op basis van de RTK raaimetingen (*Figuur B1-82*) laat echter geen eenduidig afwijkend patroon zien voor de locaties aangrenzend aan oesterriffen. Hoewel er rondom het rif ten zuidwesten van suppletie 4 geen migratie van de suppletie op is getreden – waar dit bij de zuidrand van suppletie 7 bijvoorbeeld wel het geval was – zijn er ook andere zuidelijke delen van de suppleties aan te wijzen waar geen migratie van de suppletierand is opgetreden maar waar geen rif aanwezig was, bijvoorbeeld rond suppletie 5.

Figuur B1-83 geeft voor twee RTK raaien rond dit zuidwestelijk gelegen rif (gelegen aan de linkerkant van beide profielsegmenten, zie ook *Figuur B1-81*) de morfologische ontwikkeling van de suppletierand. In het laaggelegen deel tussen het rif en de suppletievoet was langs raai 1140 sprake van enige sedimentatie waar langs raai 1420 juist enige erosie optrad. Als echter gefocust wordt op de suppletievoet (rond 275 m langs raai 1140 en rond 150 m langs raai 1420), tonen beide raaien sedimentatie nabij de suppletievoet. Alleen voor de hoger gelegen delen (boven gemiddeld water) treedt echter wel zeer substantiële erosie op (vele tientallen centimeters). Het zou kunnen dat het oesterrif met een kruinhoogte van 10 tot 30 cm onder NAP de sedimentatie rond de suppletievoet heeft bevorderd omdat de suppletievoet onder deze kruinhoogte ligt (effectieve golfdemping) en dat de erosie van de hogere delen van de suppletie (tot orde een meter boven de kruinhoogte van het rif) door deze relatief lage kruinhoogte niet door dit rif te voorkomen was. Zoals beschreven in Walles et al. (2015) kunnen golven (nagenoeg) zonder energieverlies een rif passeren wanneer de waterdiepte groot is (ten opzichte van de golfhoogte). Dat lijkt het geval voor golven die de hogere delen van de suppleties bereiken omdat er dan immers een relatief hoge waterstand op de plaat staat.

Samenvattend zijn er aanwijzingen dat de wilde oesterriffen op de Roggenplaat mogelijk lokaal de suppletievoet enigszins hebben gestabiliseerd. Echter, omdat het gissen is naar hoe de suppletievoet zich ontwikkeld zou hebben in afwezigheid van deze riffen is het met deze data niet vast te stellen of deze riffen de suppletie daadwerkelijk lokaal hebben gestabiliseerd. Bovendien zijn er ook suppletieranden die relatief stabiel zijn gebleven in afwezigheid van een dergelijk rif. Wel staat vast dat de hooggelegen suppletiedelen zeer substantieel erodeerden ondanks de nabijheid van een wild oesterrif.



Figuur B1-82. Horizontale migratie van de suppletieranden tussen 2020 en 2024. Dit volgt uit een kwalitatieve, visuele beschouwing van de profielen waarin de mate van migratie relatief is beschouwd voor de verschillende profielen (onderling vergeleken). Met de RTK raaien aangegeven in grijs en met in blauw specifiek het deel van RTK raai 1420 en in rood specifiek het deel van raai 1140 (Figuur B1-83).



Figuur B1-83. Deel van RTK raai 1140 (links) en deel van RTK raai 1420 (rechts) die beide in de schaduwzone van een oesterrif liggen (rechts). Zie Figuur B1-82 voor de ligging van deze raai-segmenten.

Bijlage 2 De ontwikkeling van bodemdieren op de Roggenplaat en de suppleties

Bijlage 2	De ontwikkeling van bodemdieren op de Roggenplaat en de suppleties	161
B2.1	Inleiding	162
B2.2	Methodologie	162
B2.2.1.	Beschrijving van de uitgevoerde analyses voor beantwoording van de kennisvragen	162
B2.2.2.	Basisgegevens over bodemdieren	162
B2.2.3.	Omgevingsfactoren	164
B2.2.4.	Gegevensverwerking en statistische analyse	164
B2.3	De ontwikkeling van de voedselbeschikbaarheid voor vogels (d.w.z. bodemdieren) op de Roggenplaat ná aanleg van de suppleties	166
B2.3.1.	Relatie tussen het voorkomen van een bodemdierengemeenschap en omgevingsfactoren	168
B2.3.2.	Temporele variatie in de bodemdierengemeenschappen op de Roggenplaat	171
B2.4	Ecologische ontwikkelingen op de suppleties	174
B2.4.1.	De ontwikkeling van bodemdieren op de suppleties in relatie tot de omgevingsfactoren	177

B2.1 Inleiding

In deze bijlage worden de resultaten gepresenteerd van het onderzoek naar de toestand en ontwikkeling van de bodemdiergemeenschappen op de Roggenplaat en de suppleties op basis van de metingen die zijn uitgevoerd in de periode 2015 tot en met 2024. Het onderzoek richt zich op de beantwoording van twee de volgende evaluatievragen.

Evaluatievragen:

1. Hoe ontwikkelt de voedselbeschikbaarheid voor vogels (i.e. bodemdieren) zich op de Roggenplaat na uitvoering van de suppleties?
2. Hoe ontwikkelt de bodemdiergemeenschap zich op de afzonderlijke suppletie-elementen?

Deze evaluatievragen zijn gebaseerd op de vragen uit het oorspronkelijke monitoringplan (Ysebaert et al., 2016) en geherformuleerd als gevolg van voortschrijdend inzicht. Ter beantwoording van deze evaluatievragen zijn onderstaande kennisvragen geformuleerd:

Onderliggende kennisvragen:

1. Wat is de relatie tussen het voorkomen van bodemdieren op de Roggenplaat en de factoren droogvalduur, hydrodynamica en/of sedimentsamenstelling?
2. Is de ontwikkeling van de bodemdierengemeenschappen op de suppleties gerelateerd aan veranderingen in droogvalduur, hydrodynamica, sedimentsamenstelling, etc.?
3. Kan de rekolonisatie snelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie met een levende bodemdiergemeenschap? ¹

B2.2 Methodologie

B2.2.1. Beschrijving van de uitgevoerde analyses voor beantwoording van de kennisvragen

Er zijn twee analyses uitgevoerd ter beantwoording van de kennisvragen:

1. Een analyse van de relatie tussen de bodemdierengemeenschappen op de Roggenplaat (buiten de suppleties) en de omgevingsfactoren (droogvalduur, hydrodynamica en/of sedimentsamenstelling) door de jaren heen.
2. Een analyse van de ontwikkeling van de bodemdieren op de suppleties als gevolg van veranderde omgevingsfactoren. Daarvoor is een BACI-benadering toegepast en de situatie voor (**B**efore) en na (**A**fter) aanleg van de suppleties vergeleken met de nabijgelegen locaties (**C**ontrol) om de **I**mpact op de suppletielocaties vast te stellen.

B2.2.2. Basisgegevens over bodemdieren

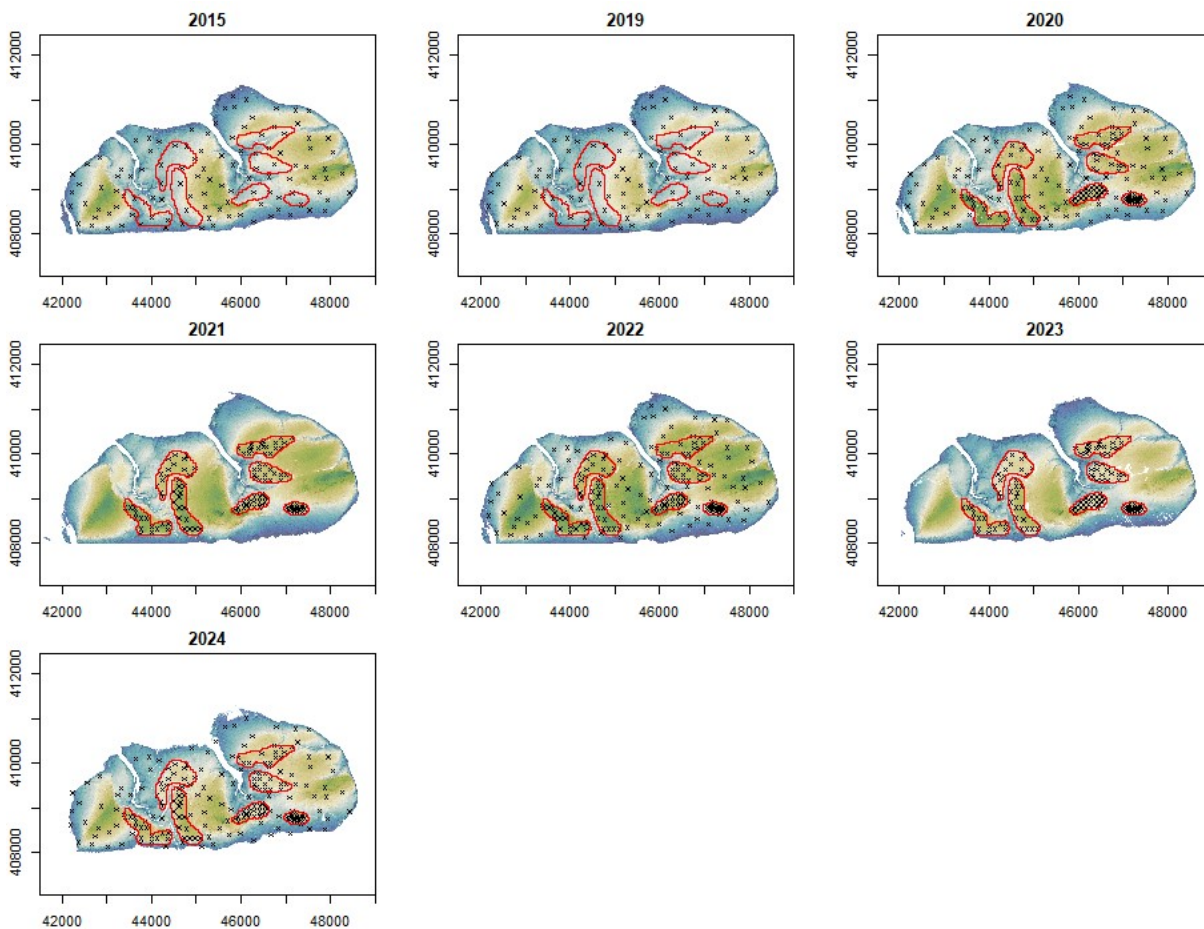
Om tot een typering van de voedselbeschikbaarheid voor steltlopers te komen, is gebruikgemaakt van de kwantitatieve benthosmonitoring die ook binnen MWTL wordt gebruikt. Uit deze benthos data worden ecologische parameters bepaald, zoals soortensamenstelling, soortenrijkdom, diversiteit, dichtheid en biomassa. Deze gegevens maken het mogelijk om de voedselbeschikbaarheid voor steltlopers te kwantificeren, afgestemd op het dieet van specifieke soorten..

De bodemdiermonsters zijn verzameld met steekbuizen (2x10 cm doorsnede, tot 30 cm diep) en gezeefd over een 1 mm-zeef voor latere determinatie van de bodemdiersoorten, -dichtheid en -biomassa in het laboratorium. Vanwege voortschrijdend inzicht in de taxonomie en met het oog op de interne consistentie tussen de monsterjaren wordt de soortenlijst gecontroleerd door middel van de 'Taxon match-routine' die beschikbaar is op de website van het World Register of Marine Species (<https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=match>). De monsternamen en labdeterminaties gaan tot aan de bepaling van de individuele dichtheid en biomassa per soort, conform de protocollen uit het programma

¹ De resultaten van het onderzoek over het effect van 'primen' op de rekolonisatie door bodemdieren zijn weergegeven in Bijlage 5.

Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands (MWTL), die uitvoerig zijn beschreven in het monitoringplan (Ysebaert et al., 2016, §5.4).

In totaal zijn er 1062 monsters verzameld – in 2015 (113), 2019 (112), 2020 (185), 2021 (120), 2022 (204), 2023 (120) en 2024 (208). In 2021 en 2023 was de bemonstering beperkt tot de suppleties (Figuur B2-1).



Figuur B2-1. Locaties die tussen 2015 en 2024 zijn bemonsterd voor de kwantitatieve benthosmonitoring op de Roggenplaat. De rode polygonen geven de contouren van de zeven suppleties. In 2015 en 2019 waren de suppleties nog afwezig. Rechtsonder een weergave van de suppleties nummering.

Naast de kwantitatieve benthosmonitoring wordt jaarlijks een semi-kwantitatieve opname van macrozoöbenthos uitgevoerd door Rijkswaterstaat Zeeland (RWS-ZD) aan de hand van een gebiedsdekkende veldscreening ([RWS voorschrift 913.00.B100](#)). Naast de directe waarneming van een aantal omgevingsdescriptoren zoals het aspect en de samenstelling van het sediment en de begroeiing, wordt met behulp van een spade gekeken welke soorten (die visueel te herkennen zijn) voorkomen.

Er is ook gebruik gemaakt van een werpvierkant voor de bepaling van het aantal wadpierenhopjes en van de kokkels in de bovenste 6 cm van het sediment. Daarnaast wordt ook onderscheid gemaakt tussen wadpieren in verschillende grootteklassen en een schatting gemaakt van de omvang van het bodemleven.

De semi-kwantitatieve opname van macrozoöbenthos bestaat vooral uit aan-/afwezigheid van een selectie van soorten die gemakkelijk en snel in het veld herkend kunnen worden. Deze semi-kwantitatieve opname levert informatie over de bodemdierengemeenschappen met een hogere ruimtelijke dekking dan de kwantitatieve benthosmonitoring.

Waar de kwantitatieve monitoring van bodemdieren verspreid is over de hele plaat (Figuur B2-1), is de semi-kwantitatieve monitoring geconcentreerd op de suppleties (Escaravage, 2024). De semi-kwantitatieve monitoring wordt gekenmerkt door een focus op de relatief grote soorten die geschikt zijn als prooien voor vogels en door de hoge dichtheid aan waarnemingen, waardoor de semi-kwantitatieve monitoring een betere ruimtelijke dekking heeft. In tegenstelling tot de kwantitatieve monitoring blijft de ruimtelijke dichtheid aan waarnemingen van de semi-kwantitatieve monitoring constant, dus ook vóór de aanleg van de suppleties. Dit maakt een directe waarneming mogelijk van de effecten van de aanleg op elke suppletie.

In een eerdere rapportage (Escaravage, 2024) werd een vergelijking gedaan tussen die twee monitoring op basis van Roggenplaat gegevens verzameld tussen 2017 en 2022. Uit die analyse werden sterke overeenkomsten gevonden tussen die twee monitoring voor bepaalde indicatoren zoals de niveaus van bodemleven en de treffrequenties van kokkels, nonnetjes en wapenwormen. Deze overeenkomsten suggereren de geschiktheid van de semi-kwantitatieve monitoring voor ruimtelijk dekkende waarneming van doelsoorten, zoals de prooien van vogels. In de huidige rapportage zijn de gegevens uit de semi-kwantitatieve Roggenplaat monitoring meegenomen als aanvulling op de resultaten uit de kwantitatieve monitoring.

B2.2.3. Omgevingsfactoren

Voor de verklaring van de verspreiding van de bodemdiersoorten is gebruikgemaakt van de volgende omgevingsfactoren:

Sediment: het volumetrische percentage van de sedimentdeeltjes kleiner dan 63 μm (Slib) en de mediane korrelgrootte als 50^{ste} percentiel van de sferisch-equivalentdoorsnede in μm (Med_mu) op basis van de sedimentmonsters (top 3 cm) die zijn verzameld tijdens de benthosbemonstering. De sedimentenstelling van de monsters (gezeefd op een 2 mm-zeef, zonder chemische behandeling) is geanalyseerd met behulp van een laserdiffractiemethode waarin sedimentdeeltjes als sferische objecten worden beschouwd (Malvern® en signaalverwerking volgens de Mie-methode conform het MWTL-protocol).

Geomorfologie: de hoogteligging van de Roggenplaat (LiDAR) is bepaald op basis van de jaarlijkse LiDAR-opnamen (LiGht Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging) tijdens laagwater (zie B1.2.2).

Droogvalduur: De droogvalduur (DVD) is geëvalueerd met behulp van LiDAR-hoogtekaarten, omgezet naar droogvalduur (Tabel B1-7). Het areaal droogvalduur is bepaald door de bodemligging te combineren met de cumulatieve verdeling van de waterstanden (Bijlage 3 in Walles et al., 2021).

Hydrodynamica: hiervoor is onderscheid gemaakt tussen de bodemschuifspanning (τ , N/m^2) door getijstroming (GetijStrm) en door golven (Golven): de 95^{ste} percentielwaarden van de bodemschuifspanning door getijstroming én het gemiddelde van de piekwaarden van de bodemschuifspanning door golven zijn berekend op basis van modelsimulaties van Deltares (Lodewijk de Vet, persoonlijke communicatie). Twee simulaties zijn uitgevoerd voor een periode van twee springtij-doodtijcycli (15 jan.-14 feb. 2015) waarbij twee bodemprofielen zijn gebruikt: één van vlak vóór (2019) en één van vlak ná (2020) de aanleg. De randvoorwaarden, zoals wind en getij, zijn in beide simulaties gelijk gehouden. Dankzij deze aanpak zijn de berekende verschillen in de parameters tussen de verschillende simulaties uitsluitend het gevolg van verschillen in morfologie en niet van jaarlijkse variaties in meteorologische condities.

B2.2.4. Gegevensverwerking en statistische analyse

De bodemdierengemeenschappen uit de kwantitatieve benthosmonitoring zijn beschreven met de volgende indicatoren:

- Totale dichtheid N/m^2 , biomassa (AFDW g/m^2) en aantal soorten per monster;
- Taxonomische samenstelling op basis van dichtheden, geaggregeerd op het niveau van de klassen (polychaeta, oligochaeta, gastropoda, bivalvia, crustacea, overige);
- Selectie van een aantal kenmerkende prooisoorten voor vogels op basis van Swarts et al. (2011): *Crangon*, *Carcinus*, *Arenicola*, *Nereis*, *Cerastoderma*, *Mya*, *Mytilus* en *Crassostrea* en Leopold et al. (2004): *Hydrobia*, *Spisula*, *Lanice*, *Scrobicularia*, *Corophium*, *Capitella*, *Palaemonetus*, *Scoloplos*, *Heteromastus*, *Scololepis*, *Macoma*, *Nephtys* en *Ensis*. Voor de analyse is de biomassa van deze soorten geaggregeerd in de volgende groepen:
 - **Kokkels:** *Cerastoderma edule*
 - **Crustacea:** *Crangon crangon*, *Carcinus maenas*, *Corophium arenarium*, *Gammarus* sp., *Gammarus locusta*
 - **Wadpieren:** *Arenicola marina*
 - **Zeeduizendpoten:** *Hediste diversicolor*, *Alitta succinea*, *Alitta virens*, *Nereidinae* sp., *Malacoceros tetracerus*
 - **Nonnetjes:** *Macoma balthica*
 - **Schelpdieren overig:** *Scrobicularia plana*, *Ensis* sp., *Ruditapes philippinarum*, *Ruditapes* sp.
 - **Wadslakjes:** *Hydrobia*, *Peringia ulvae*
 - **Wormen overig:** *Lanice conchilega*, *Capitella* sp., *Capitellidae*, *Scoloplos armiger*, *Heteromastus filiformis*, *Nephtys cirrosa*, *Nephtys hombergii*

-
- Selectie van prooi-soortgroepen op basis van taxonomie én grootte naar aanleiding van waarnemingen in Esselink & Zwarts (1989), Zwarts & Wanink (1989) en Zwarts et al. (1996). Voor de analyse zijn de dichtheden van deze groepen geaggregeerd als treffrequentie door de jaren heen binnen de verschillende suppleties en in de referentiegebieden. De kwantitatieve monitoring maakt een onderscheid in grootte klassen en op basis daarvan is de volgende grootteverdeling gehanteerd:
 - Schelpdieren, groot (>10 mm) en klein (<10 mm) met onderscheid tussen *Cerastoderma edule*, *Macoma balthica*, *Ruditapes philippinarum* en overige tweekleppigen
 - *Arenicola marina* groot (>85 mm), middel (25<->85 mm) en klein (<25mm)
 - Nereidinae (alle zeeduizendpoten samen) groot (>8 mm), middel (2<->8 mm) en klein (<2mm)
 - Overige bodemdieren met onderscheid tussen slakken en vlokreeftjes

De resultaten uit de semi-kwantitatieve monitoring zijn gebruikt om de trends in frequenties van voorkomen van een aantal kenmerkende prooi-soorten voor vogels op de suppleties over de jaren heen in kaart te brengen. Om de statistische robuustheid van de analyse te waarborgen, is een selectie gemaakt van taxa met relatief hoge frequenties van voorkomen (>0.25). Deze selectie omvat de volgende groepen: Kokkelbroed, Kokkels, Nonnetjes, Tapijtschelpen, Wadpieren (klein, middel et groot), Lanice, Wapenwormen, Zandkokerwormen, Wadslakjes en Vlokreeftjes. In deze rapportage worden de variaties in frequenties van voorkomen van deze taxa op de suppleties tussen 2017 en 2024 gepresenteerd en besproken. Een vergelijking met de kwantitatieve monitoring is eerder opgenomen in Escaravage (2024).

Bij een vergelijking van de bodemdierindicatoren en de omgevingsfactoren wordt veelal gebruikgemaakt van boxplots, waarmee verschillen tussen groepen gegevens visueel beoordeeld kunnen worden op basis van de weergave van de statistische percentielenwaarden. Er is een multivariate analyse (RDA, redundantieanalyse) uitgevoerd als verkenningsmiddel om de relaties tussen de bodemdiorgemeenschappen uit de kwantitatieve benthosmonitoring en de omgevingsfactoren te bepalen. De RDA is een ordinantiemethode waarbij een hoofdcomponentenanalyse (PCA) wordt gecombineerd met een regressieanalyse waarmee de relatie tussen de individuele soortendichtheid, de monsterlocaties en de omgevingsfactoren wordt berekend en grafisch weergegeven.

Voor deze RDA is gebruikgemaakt van de dichtheden van de soorten na een dubbelworteltransformatie, om de onevenredige invloed van de talrijke soorten op de overige soorten te verminderen. Alleen de taxa die in meer dan 5% van de monsters voorkomen zijn meegenomen in de analyse, om het effect van 'toevalstreffers' te verminderen. De omgevingsfactoren zijn gestandaardiseerd (alle tussen de 0 en 1), zodat verschillen in het numerieke bereik van de verschillende indicatoren (bodemschuifspanning tussen 0.20 en 0.90 N/m² vs. mediane korrelgrootte tussen 80 en 350µm) geen invloed kunnen hebben op het resultaat.

B2.3 De ontwikkeling van de voedselbeschikbaarheid voor vogels (d.w.z. bodemdieren) op de Roggenplaat ná aanleg van de suppleties

In deze paragraaf wordt ingegaan we in op de eerste evaluatievraag over hoe de voedselbeschikbaarheid voor vogels (d.w.z. bodemdieren) zich op de Roggenplaat heeft ontwikkeld ná aanleg van de suppleties.

Evaluatievraag voedselbeschikbaarheid voor vogels 1

Hoe ontwikkelt de voedselbeschikbaarheid voor vogels (i.e. bodemdieren) zich op de Roggenplaat als geheel na uitvoering van de suppleties?

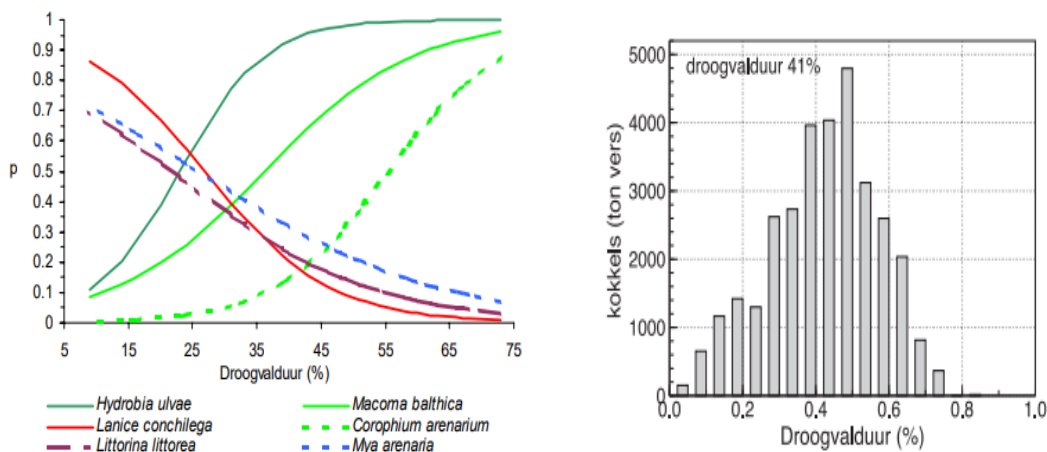
Samenvatting:

Vanwege de grote invloed van de droogvalduur op de bodemdieren (onderwerp van de kennisvraag 1), is de temporele ontwikkeling in de bodemdiereengemeenschappen onderzocht na het ordenen van de waarnemingen op droogvalduur.

Daaruit blijkt dat de jaar-tot-jaarvariatie in bodemdierdichtheid, biomassa en soortenrijkdom van monsters binnen een droogvalduurklasse, op enkele uitzonderingen na, binnen de ruimtelijke variatie van die klasse blijft (Figuur B2-7). Een uitzondering vormt de 20-30%-klasse, waar bodemdierdichtheid, soortenrijkdom en biomassa na een toename in 2022 weer sterk afnemen in 2024. Daarentegen nemen in de 60-70%-droogvalduurklasse, de biomassa en het aantal soorten juist toe tussen 2022 en 2024. De voedselbeschikbaarheid voor vogels blijft dus, ná de suppletie, voor het overgrote deel vergelijkbaar als vóór de suppleties.

Om een goed onderbouwd antwoord te kunnen geven op de eerste evaluatievraag, is het van belang om de waargenomen veranderingen in de voedselbeschikbaarheid voor vogels (bodemdieren) te kunnen relateren aan de omgevingsfactoren die mogelijk zijn beïnvloed als gevolg van de aanleg van de suppleties (eerste kennisvraag).

Op basis van een omvangrijk corpus aan waarnemingen, afkomstig uit ecologische studies naar de relatie tussen bodemdieren en omgevingsfactoren in intergetijdengebieden, zoals verzameld door de Vet et al. (2023), is in een vorige rapportage (Escaravage et al., 2024) een overzicht gemaakt. Dit overzicht is hieronder overgenomen als leidraad voor de huidige analyse.

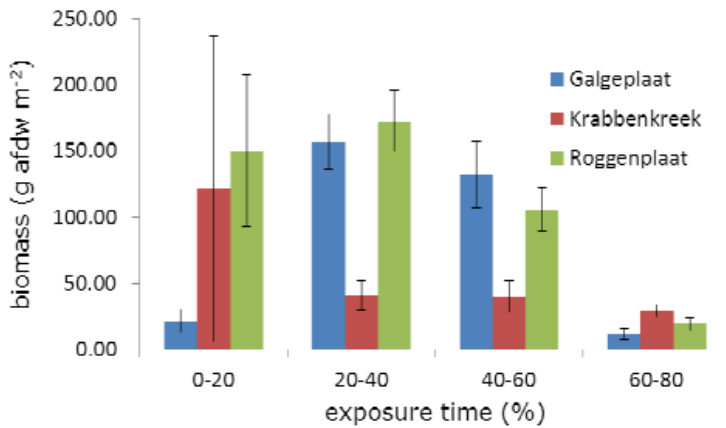


Figuur B2-2. Links: trefkans voor bodemdiersoorten als functie van droogvalduur (%) in de Oosterschelde (Escaravage et al., 2003). Rechts: verdeling van de kokkelbiomassa (na de zomergroei) over de droogvalduurklassen (Rappoldt et al., 2006).

De ruimtelijke verdeling van bodemdieren in de intergetijdengebieden van de Oosterschelde wordt sterk beïnvloed door de droogvalduur (Figuur B2-2) met soorten die de voorkeur geven aan gebieden met een korte droogvalduur, zoals de schelpkokerworm (*Lanice conchilega*), de strandgaper (*Mya arenaria*) en de alikruik (*Littorina littorea*). Andere soorten, zoals het nonnetje (*Macoma balthica*), de slijkarnaal

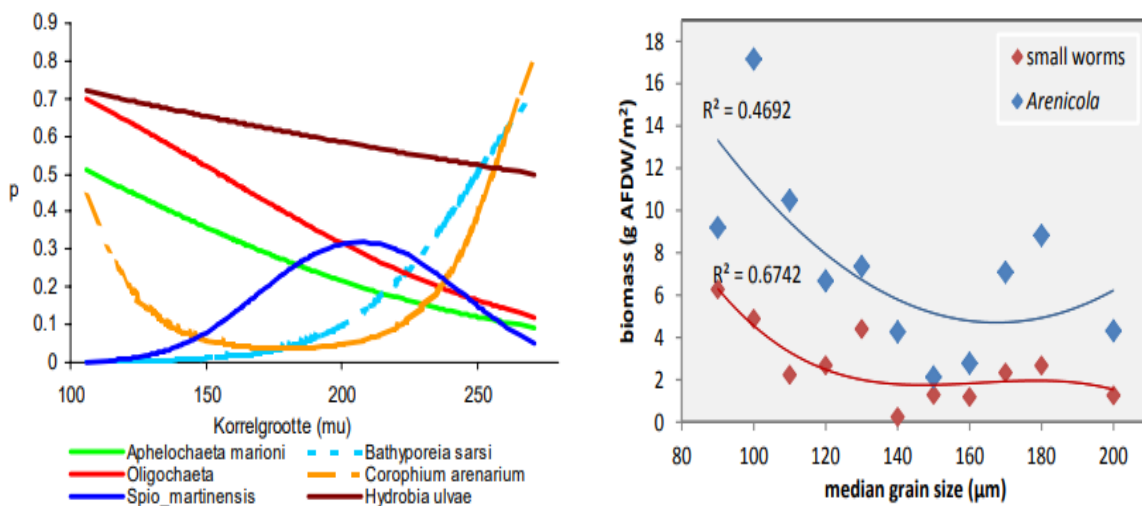
(*Corophium arenarium*) en het wadslakje (*Hydrobia ulvae*, nu *Peringia ulvae* genoemd) hebben juist een voorkeur voor gebieden met een lange droogvalduur. Een derde groep soorten, zoals kokkels, hebben een voorkeur voor gebieden met een gematigde droogvalduur (30-70%) (Figuur B2-2).

De invloed van de droogvalduur op de soortensamenstelling van de bodemdieren vertaalt zich ook in een sterke variatie in de bodemdierbiomassa en daarmee de voedselbeschikbaarheid voor vogels (Figuur B2-3) als functie van de droogvalduur.



Figuur B2-3. Totale bodemdierbiomassa op de Galgeplaat, Krabbenkreek en Roggenplaat voor verschillende droogvalduurklassen (Troost & Ysebaert, 2011).

Naast de droogvalduur kunnen de verschillen in de relatie tussen de bodemdierbiomassa en de droogvalduur voor de verschillende gebieden in de Oosterschelde in Figuur B2-3 (Troost & Ysebaert, 2011) erop wijzen dat ook andere factoren van invloed zijn op de bodemdierbiomassa. Zoals eerder beschreven voor de droogvalduur zorgt ook de sedimentsamenstelling voor verschuivingen in de soortensamenstelling en voor significante verschillen in bodemdierbiomassa (Figuur B2-4).



Figuur B2-4. Links: trefkans voor bodemdiersoorten als functie van de mediane korrelgrootte (Escaravage et al., 2003). Rechts: biomassa van wadpieren (*Arenicola*) en overige kleine wormen als functie van de mediane korrelgrootte (Zwarts et al., 2011).

Waar de meeste wormen (oligochaeta, *Aphelocheata*, *Arenicola*) en het wadslakje vaker voorkomen in gebieden met fijner sediment, worden vlokreeftjes zoals *Bathyporeia sarsi* en *Corophium arenarium* juist vaker aangetroffen in gebieden met grover sediment (Figuur B2-4). Ook schelpdieren zoals de kokkel, het nonnetje, de strandgaper en de platte slijkgaper laten een significante voorkeur zien voor slibrijke gebieden (van der Meer, 1991).

B2.3.1. Relatie tussen het voorkomen van een bodemdierengemeenschap en omgevingsfactoren

Onderliggende kennisvraag Voedselbeschikbaarheid voor vogels 1

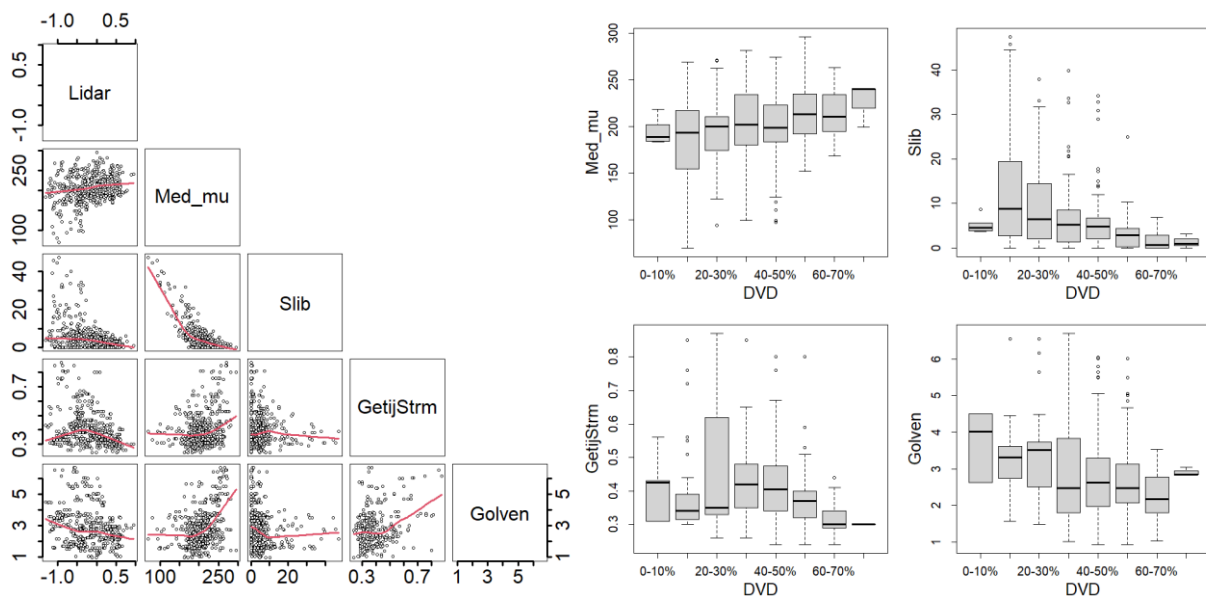
Wat is de relatie tussen het voorkomen van bodemdieren op de Roggenplaat en de factoren droogvalduur, hydrodynamica en/of sedimentsamenstelling?

Samenvatting:

Op basis van eerdere studies weten we dat variabelen als droogvalduur, sedimentsamenstelling en hydrodynamica belangrijke sturende factoren zijn voor het voorkomen van een bodemdierengemeenschap in de intergetijdengebieden zoals de Roggenplaat. Deze omgevingsfactoren hebben sterke onderlinge relaties (Figuur B2-5) en het is niet eenduidig vast te stellen welke omgevingsfactor verantwoordelijk is voor een bepaalde verandering in de bodemdierengemeenschap.

Uit de multivariate analyse (Redundancy Analysis, RDA) blijkt dat droogvalduur (bodemhoogte) veruit de belangrijkste verklarende factor is voor de samenstelling van de bodemdierengemeenschap op de Roggenplaat. Gebieden die vaker droogvallen, hebben andere leefomstandigheden dan delen die langer onder water staan, en dat bepaalt welke soorten zich vestigen. Daarnaast spelen korrelgrootte van het sediment en de bodemschuifspanning als gevolg van getijstroom en golven ook een rol, maar deze factoren zijn minder bepalend dan de droogvalduur (Figuur B2-6). Deze RDA, inclusief alle meegenomen factoren, verklaart echter slechts 17% van de totale variatie in de soortensamenstelling per monsterlocatie. Dat betekent dat er naast deze omgevingsfactoren nog veel natuurlijke variatie bestaat die niet in de huidige analyse zijn meegenomen. Deze variatie hangt samen met processen zoals schommelingen in het aantal jonge dieren, sterfte, kleine verschillen in microhabitats en andere lokale omstandigheden.

Wat betreft de hoeveelheid bodemdieren: dichtheid en biomassa nemen toe tot een droogvalduur van 40%-50% en zijn het hoogst bij een droogvalduur tussen 50% en 70%, waar voor dichtheid vooral kreeftachtigen (crustacea) en voor biomassa schelpdieren de dominante groepen zijn. Het aantal soorten neemt eveneens toe tot een droogvalduur van 40%-50%, en blijft daarna redelijk stabiel (Figuur B2-7). Kortom de droogvalduur is de sleutelvariabele die bepaalt welke bodemdieren voorkomen op de Roggenplaat, terwijl sediment en hydrodynamica een aanvullende maar kleinere rol spelen.



*Figuur B2-5. Relaties tussen de omgevingsfactoren als verklarende factoren voor de samenstelling van de bodemdiergemeenschappen: **LIDAR**-hoogtemetingen en afgeleide droogvalduur (**DVD**); **Med_mu** en **Slib**, mediane korrelgrootte en sedimentaire slibfractie (%<63µm) uit de boxcorermonsters; **GetijStrm**, de 95ste percentielwaarde van de bodemschuifspanning door getijstroming en **Golven**, de gemiddelde piekwaarden van de bodemschuifspanning door golven uit modelsimulaties (zie §B1.2.3 voor een nadere uitleg).*

Voor het bepalen van de relaties tussen bodemdiersoorten en omgevingsfactoren zijn macrofaunamonsters verzameld na 2019 op de suppleties uitgesloten. Dit is gedaan vanwege de verstoring van zowel de bodemstructuur (B1.6.2) als de bodemdiergemeenschappen (B2.4.1) als gevolg van de aanleg. De bodemdiergemeenschap ontwikkelt zich namelijk na de aanleg, door kolonisatie en groei onder de nieuwe en snel veranderende omgevingscondities op de suppleties. Hierdoor kunnen de relaties tussen bodemdiersoorten en omgevingsfactoren op de suppleties afwijken van die op de rest van de Roggenplaat. Om deze reden blijven alle suppletie-monsters tot en met 2024 buiten beschouwing in deze analyse, aangezien onbekend is hoe lang de effecten van de verstoring als gevolg van de aanleg aanhouden. Daardoor zijn er 505 monsters geselecteerd voor deze analyse, waarbij er in de jaren 2015, 2019, 2020, 2022 en 2024 respectievelijk 113, 112, 95, 91 en 94 monsters zijn verzameld (in 2021 en 2023 zijn er geen monsters verzameld buiten de suppleties).

De volgende vijf omgevingsfactoren zijn gebruikt als verklarende factoren voor de samenstelling van de bodemdiergemeenschappen: **LIDAR**-hoogtemetingen; **Slib** en **Med_mu**, respectievelijk de sedimentaire slibfractie (<63µm) en mediane korrelgrootte uit de boxcorermonsters; **GetijStrm**, de 95ste percentielwaarde van de bodemschuifspanning door getijstroming en **Golven**, de gemiddelde piekwaarden van de bodemschuifspanning door golven. (zie §B2.2.3 voor een nadere uitleg).

De relaties tussen de omgevingsfactoren zijn weergegeven in de matrix van correlatieplots in (Figuur B2-5, links). Ondanks een grote variatie in de meetwaarden vallen sommige patronen op:

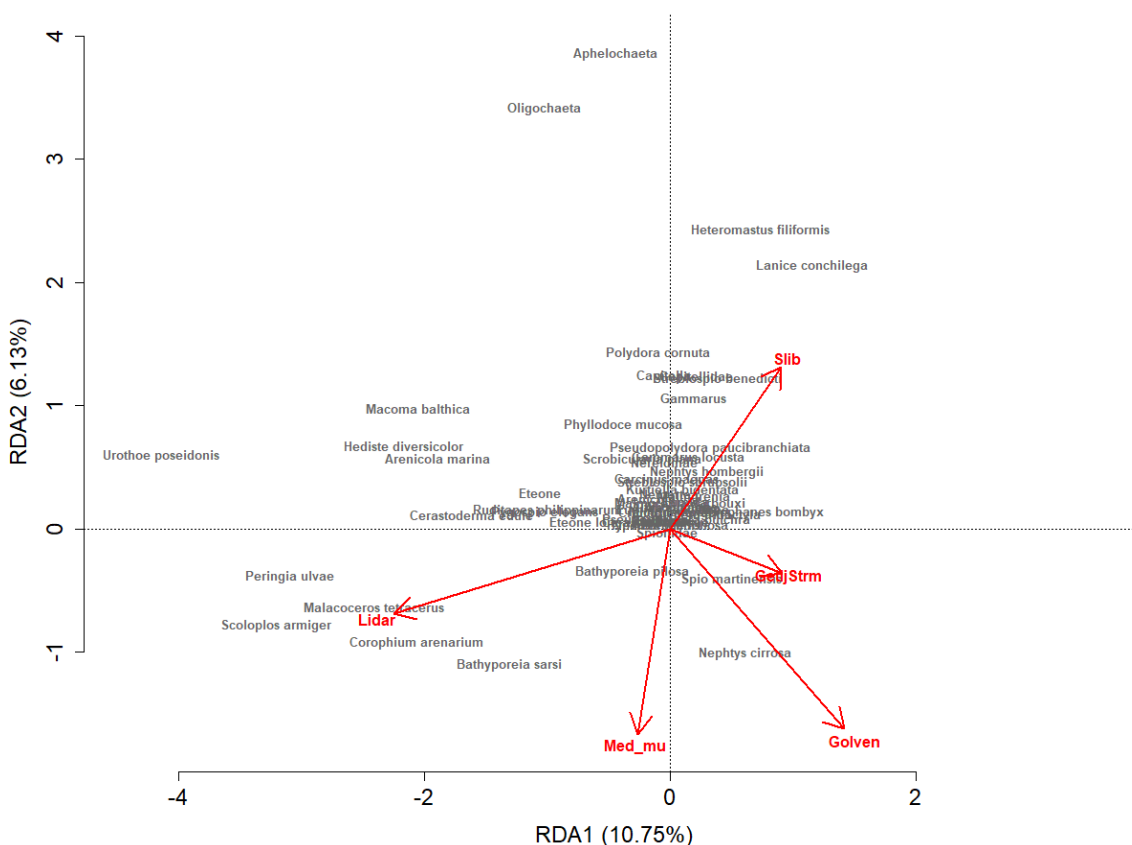
- Zoals verwacht (kolom Med_mu in matrix, Figuur B2-5) gaat een toenemend slibgehalte gepaard met een afnemende mediane korrelgrootte van het sediment.
- Hoge waarden van de mediane korrelgrootte komen met name voor bij een hoge intensiteit aan getijstroming en golven (kolom Med_mu in matrix, Figuur B2-5).
- Hoge waarden van de slibfractie worden daarentegen vooral waargenomen bij een lage intensiteit aan getijstroming en golven (kolom Slib in de matrix, Figuur B2-5).

Het uitzetten van deze omgevingsfactoren tegen de hoogteligging (Kolom Lidar in matrix, Figuur B2-5) illustreert hun ruimtelijke verdeling:

- De mediane korrelgrootte van het sediment neemt licht toe met toenemende hoogteligging. Opvallend is een groep waarnemingen met een lage korrelgrootte (<150 µm) in relatief laaggelegen gebieden.

- De slibfractie vertoont een licht toenemende trend van hoge naar tussenliggende gebieden en bereikt vooral hoge waarden (>10%) in een deel van de laaggelegen gebieden.
- De getijstrooming vertoont een bolvormige verdeling, met een meerderheid van hoge stroomintensiteit in tussenliggende gebieden en een beperkt aantal waarnemingen met zeer hoge stroomintensiteit in laaggelegen gebieden.
- De dynamiek door golven vertoont een licht toenemende trend met afnemende hoogteligging en enkele uitschieters in tussenliggende gebieden.

De boxplotweergave in Figuur B2-5 (rechts) geeft inzicht in de variatie in sedimentsamenstelling en hydrodynamica als functie van de droogvalduur, afgeleid van de hoogteligging (Figuur B2-5). Het sediment wordt grover (toename van de mediane korrelgrootte en afname van de slibfractie) bij een toenemende droogvalduur. De hoogste waarden van de voorspelde bodemschuifspanning door getijstrooming (GetijStrm) zijn waargenomen op locaties met een droogvalduur tussen de 20% en 50%. Voor de golven neemt de voorspelde waarde van de bodemschuifspanning af met de toenemende droogvalduur.



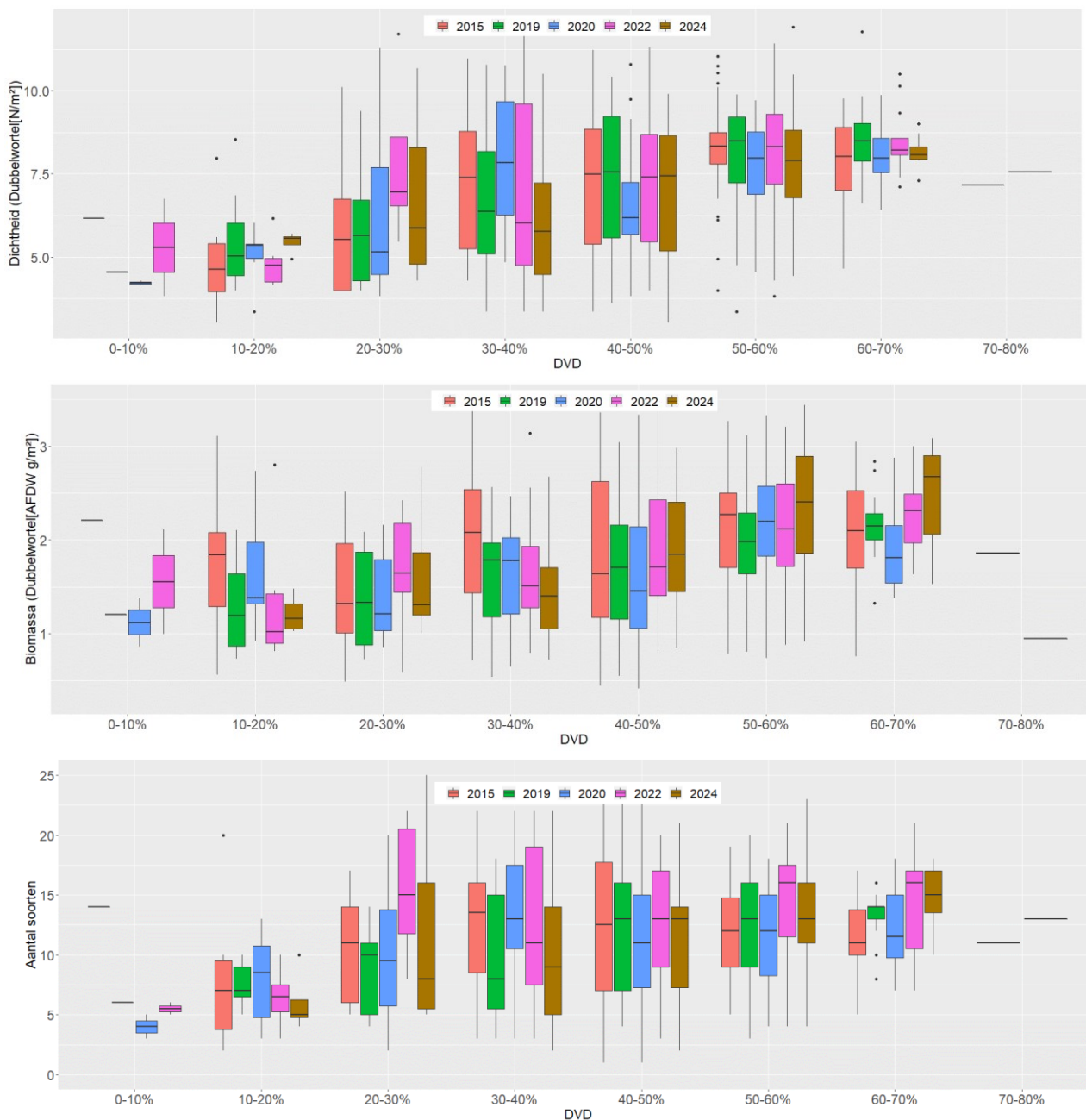
Figuur B2-6. De eerste twee assen van de RDA (verklaard fractiepercentage van totale variatie), berekend op basis van de dichtheden van de bodemdiersoorten (N/m^2) na dubbelworteltransformatie en bereikstandaardisatie van de omgevingsfactoren (LiDAR-hoogtemetingen; Med_mu en Slib, mediane korrelgrootte en sedimentaire slibfractie ($\% < 63\mu m$); GetijStrm, de 95^{ste} percentielwaarde van de bodemschuifspanning door getijstrooming; Golven, gemiddelde piekwaarden van de bodemschuifspanning door golven (zie §B2.2.3 voor nadere uitleg).

Als een eerste verkenning van de abiotische factoren die van invloed zijn op de bodemdierengemeenschap op de Roggenplaat (buiten de suppleties) is een multivariate analyse (RDA, zie § B2.2.4) uitgevoerd van de vijf omgevingsfactoren (LiDAR, Slib, Med_mu, GetijStrm en Golven, zie §B2.2.3) en de 58 bodemdier taxa die in meer dan 5% van de monsters van elk jaar voorkomen. De resultaten van de RDA, met RDA1, RDA2 als de twee belangrijkste assen van variantie, zijn weergegeven in Figuur B2-6.

De huidige analyse van de vijf omgevingsfactoren (met sterke onderlinge covariantie, Figuur B2-5) verklaart 16,9% van de totale variantie in de verspreiding van de 58 taxa over de 505 monsters. De eerste as van de RDA (RDA1) is vooral negatief gecorreleerd met de LiDAR-metingen ($R = -0.15$) met soorten die karakteristiek

zijn voor hooggelegen gebieden, zoals het vlokreeftje *Urothoe poseidonis* en het wadslakje *Peringia ulva* aan de negatieve kant van RDA1. De tweede as (RDA2) is vooral negatief gecorreleerd met de mediane korrelgrootte ($R=-0.12$) en met de bodemschuifspanning door golven ($R=-0.15$) met soorten die karakteristiek zijn voor fijn sediment, zoals de wormen *Oligochaeta* en *Heteromastus filliformis*.

B2.3.2. Temporele variatie in de bodemdierengemeenschappen op de Roggenplaat



Figuur B2-7. Totale bodemdierdichtheid ($\sqrt[4]{N/m^2}$), biomassa ($\sqrt[4]{AFDWg/m^2}$) en aantal soorten als functie van de droogvalduur (DVD) op de Roggenplaat door de jaren heen.

Vanwege de grote invloed van de droogvalduur op de bodemdieren, is de temporele ontwikkeling in de bodemdierengemeenschappen onderzocht na het ordenen van de waarnemingen op droogvalduur. Bij de interpretatie van de grafische weergave van de resultaten moet wel rekening worden gehouden met het feit dat er slechts zes locaties gevonden zijn voor een droogvalduur van 0-10% (een locatie in 2015 en 2019 en twee locaties in 2020 én 2022) en drie locaties voor een droogvalduur van 70-80% (een locatie in 2019, 2020 en 2022).

De ontwikkeling van de totale dichtheid, biomassa en het aantal bodemdiersoorten door de jaren heen is in Figuur B2-7 weergegeven als functie van de droogvalduur. Daaruit blijkt dat de meetwaarden binnen elke droogvalduurklasse en tussen de jaren aanzienlijk kunnen verschillen. Een aantal patronen kunnen wel onderscheiden worden:

De laagste bodemdierdichtheid wordt gevonden in de gebieden met de laagste droogvalduur (droogvalduurklassen 0-10% en 10-20%) en deze dichtheid neemt toe richting hoger gelegen gebieden (tussen droogvalduurklassen 20-30% en 40-50%). De hoogste dichtheden worden aangetroffen in droogvalduurklassen 50-60% en 60-70%. De biomassa laat vooral hogere waarden zien bij een droogvalduur van 50-60% en 60-70%. Ook het aantal soorten laat vooral lage waarden zien in de lager gelegen gebieden (droogvalduurklassen 0-10% en 10-20%).

De jaar-tot-jaarvariatie binnen elke droogvalduurklasse valt meestal binnen de ruimtelijke variatie binnen elk gebied (overlap tussen de boxplots in Figuur B2-7). Een aantal verschillen tussen jaren springen wel in het oog, zoals de toename in de totale bodemdierdichtheid tussen 2015 en 2020 tot 2022, gevolgd door een sterke in 2024 in gebieden met een gemiddelde droogvalduur tussen de 20% en 40%. Relatief lage waarden van biomassa en het aantal soorten zijn ook in 2024 waargenomen in die gebieden. Zowel de biomassa als het aantal soorten laat een afname zien tussen 2020 en 2024 in gebieden met een droogvalduur tussen de 10% en 20%. Het omgekeerde is waargenomen in hoger gelegen gebieden met een droogvalduur tussen de 40% en 70% (Figuur B2-7).

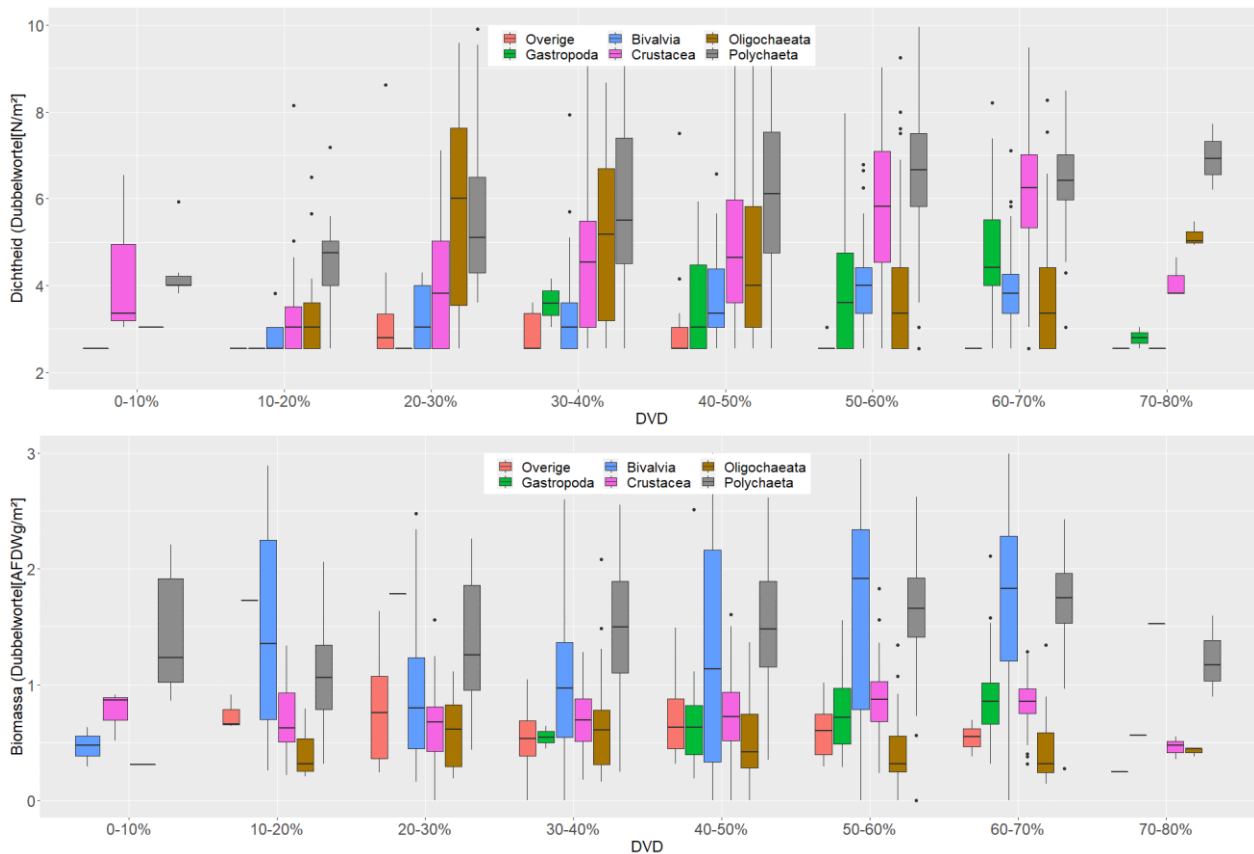
De biomassagegevens in Figuur B2-7 maken het mogelijk om de overeenstemming tussen de huidige resultaten en eerdere studies te evalueren. De totale biomassa van bodemdieren, gemeten op de locaties binnen de suppleties tussen 2015 en 2024 en uitgedrukt in AFDW (g/m^2), vertoont een gemiddelde van 20, een mediaan van 10 en een maximale waarde van 330. Na dubbelworteltransformatie (zie Figuur B2-7) bedraagt het gemiddelde van de totale biomassa per monster 1,8, met een mediaan van 1,8 en een maximale waarde van 4,3.

Het waargenomen gemiddelde van 20 AFDW g/m^2 lijkt op het eerste gezicht laag in vergelijking met de waarden van circa 150 g/m^2 die Troost en Ysebaert (2011) rapporteren voor de Roggenplaat (Figuur B2-3) afkomstig van Troost en Ysebaert (2011). Deze gegevens zijn afkomstig uit het Interecos-project, uitgevoerd in de Oosterschelde vóór (1985) en ná (1989) de ingebruikname van de stormvloedkering (Meire et al., 1994). Deze gegevens zijn gebaseerd op een bemonsteringsmethode waarbij per locatie tien monsters (doorsnede 4,5 cm, diepte 10 cm) gezeefd op 1 mm, en vijf monsters (doorsnede 15 cm, diepte 30 cm) gezeefd op 3 mm waren genomen. De vijf monsters die op 3 mm werden gezeefd, waren specifiek bedoeld voor de kwantitatieve waarneming van grote organismen, zoals schelpdieren.

De huidige monitoring volgt het MWTL-protocol, waarbij drie cores (doorsnede 10 cm, diepte 30 cm) op 1 mm worden gezeefd. Het monsteroppervlak is hiermee vier keer kleiner dan bij de INTERECOS-monitoring, wat resulteert in een minder efficiënte bemonstering van grote en relatief zeldzame schelpdieren. Dit verklaart deels de lagere biomassa in de huidige gegevens vergeleken met Troost en Ysebaert (2011).

Daarnaast beschrijft Meire et al. (1994) het jaar 1989 als een jaar met bijzonder hoge schelpdierenbiomassa, zelfs twee keer hoger dan in 1985. De combinatie van methodologische verschillen en de uitzonderlijk hoge biomassa in 1989 kan het verschil in gemiddelde biomassa tussen de huidige resultaten en die in Troost en Ysebaert (2011) verklaren.

Deze verklaring wordt bevestigd door een vergelijking tussen de huidige gegevens en de resultaten van Escaravage et al. (2003). Zij rapporteren voor de MWTL-bodemdierenmonitoring tussen 1994 en 2002 een gemiddelde biomassa van 20 AFDW mg/m^2 voor het gebied rondom de Roggenplaat (plot 'Monding', dieptestrata 0–2 m). Het kan dus geconcludeerd worden dat de huidige gegevens goed overeenkomen met de resultaten uit de lange termijn MWTL monitoring.

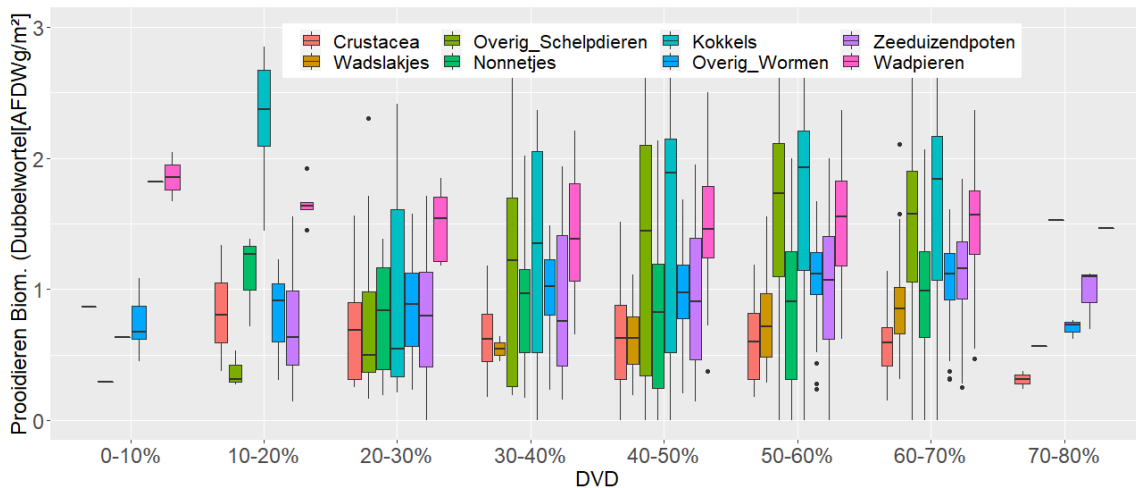


Figuur B2-8. Dichtheid ($\sqrt[4]{N/m^2}$) en biomassa ($\sqrt[4]{AFDWg/m^2}$) voor de verschillende taxonomische groepen als functie van de droogvalduur (DVD) op de Roggenplaat voor alle monsterjaren (2015, 2019, 2020, 2022, 2024) samen.

Door in deze weergave van de dichtheid en biomassa (alle jaren samen) de taxonomische groepen als functie van de droogvalduur te onderscheiden, is de specifieke respons van de verschillende groepen op de droogvalduur te zien (Figuur B2-8).

Borstelwormen (polychaeta) bereiken hoge en vaak zelfs de hoogste dichtheden in bijna alle droogvalduurklassen. Waar de oligochaeta de bodemdierdichtheid domineren in de droogvalklasse 20-30% en geleidelijk afnemen bij een toenemende droogvalduur, volgen de crustacea dichtheden een tegenovergestelde trend met toenemende waarden tussen de droogvalklassen 20-30% en 60-70%. Bivalvia bereiken samen met gastropoda hoge dichtheden tussen de droogvalklassen 30-40% en 60-70%. Polychaeta vormen ook de dominante groep in bijna alle droogvalduurklassen met betrekking tot de biomassa, maar wel samen met bivalvia in droogvalduurklasse 10-20% en ook tussen droogvalduurklassen 40-50% en 60-70%. De overige groepen laten weinig variatie in biomassa zien tussen de droogvalduurklassen.

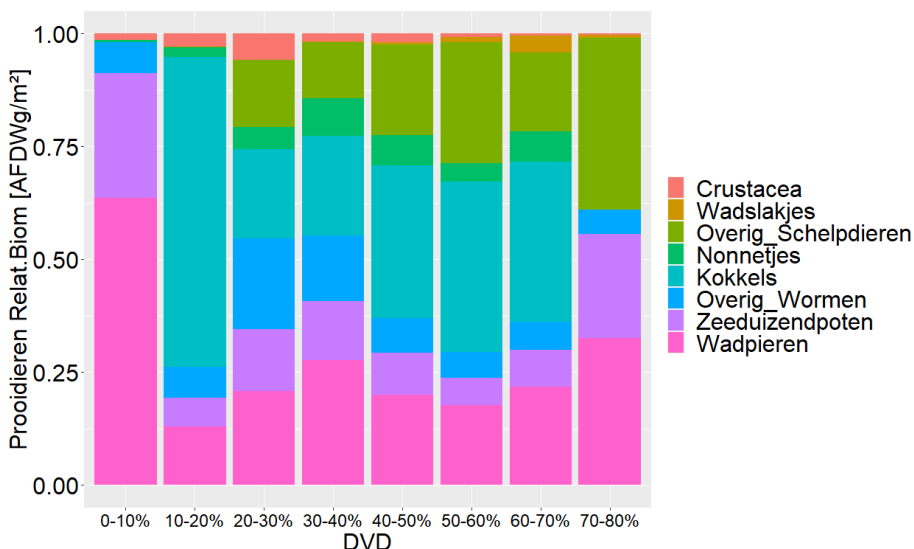
De verdeling van de biomassa aan prooidiersoorten over de droogvalduurklassen (Figuur B2-9) laat voor een aantal groepen/soorten weinig verandering zien, bijvoorbeeld voor de wadpieren en overige wormen en de crustacea. De biomassa aan zeeduizendpoten vertoont wel iets hogere waarden in droogvalklassen tussen 50 en 70%.



Figuur B2-9. Biomassa ($\sqrt[4]{\text{AFDWg/m}^2}$) aan geselecteerde prooisorten als functie van de droogvalduur (DVD) op de Roggenplaat voor alle monsterjaren (2015, 2019, 2020, 2022, 2024) samen.

Bij de volgende groepen zijn er wel duidelijke veranderingen te zien langs de droogvalduurgradiënt:

- Kokkels en nonnetjes (wel in mindere mate) bereiken een piekwaarde in droogvalduurklasse 10-20%.
- Overige schelpdieren nemen toe tussen droogvalduurklasse 10-20% en 60-70%.
- Wadslakjes nemen toe tussen droogvalduurklasse 30-40% en 60-70%.



Figuur B2-10. Relatieve biomassa van de geselecteerde prooidiersoorten op basis van het gemiddelde dat is berekend binnen elke droogvalduurklasse op de Roggenplaat voor alle monsterjaren (2015, 2019, 2020, 2022, 2024) samen.

De weergave als relatieve biomassa van de verschillende prooidieren in Figuur B2-10 geeft een samenvatting van de dominante patronen die zijn beschreven op basis van Figuur B2-9, met een piek in kokkelbiomassa in droogvalduurklasse 10-20%, een toename van de overige schelpdieren tussen droogvalduurklassen 20-30% en 60-70% en een toename van wadslakjes tussen droogvalduurklassen 50-60% en 60-70%.

B2.4 Ecologische ontwikkelingen op de suppleties

Deze paragraaf gaat in op de tweede evaluatievraag over de ecologische ontwikkeling van de suppleties, rekening houdend met hun beoogde bijdrage aan de voedselbeschikbaarheid voor steltlopers. Gezien het belang van bodemdieren als voedsel voor steltlopers worden de waarnemingen van bodemdierengemeenschappen gebruikt om de ecologische ontwikkeling op de suppleties te volgen.

Evaluatievraag voedselbeschikbaarheid voor vogels 2

Hoe ontwikkelt de bodemdiergemeenschap zich op de afzonderlijke suppletie-elementen?

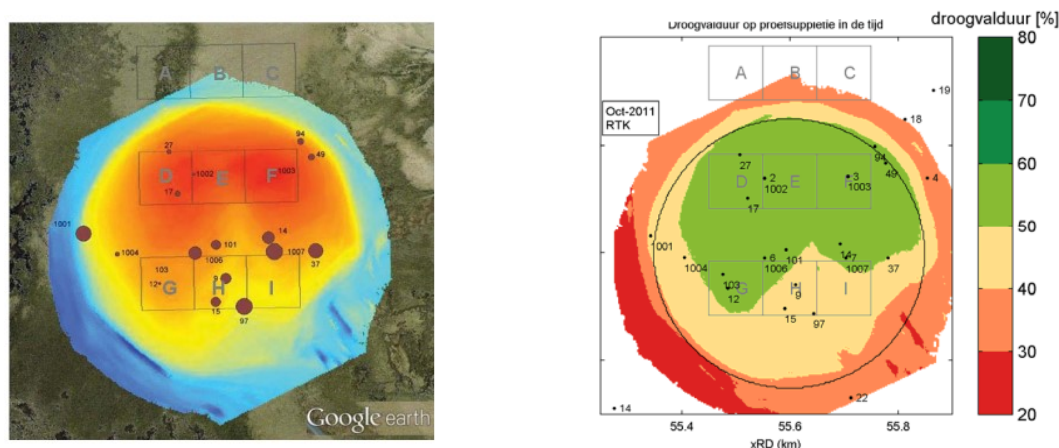
Samenvatting:

De beschrijving van de ontwikkeling van de bodemdierengemeenschap op de afzonderlijke suppleties vereist dat expliciet rekening wordt gehouden met de fysieke omgeving van de suppleties. De zeven suppleties onderscheiden zich van elkaar door hun geografische ligging en hoogteligging die bepalend zijn voor hun blootstelling aan de bodemschuifspanning door golven en hun sediment samenstelling (Figuur B2-13, Figuur B2-14). Hierdoor ontstaan verschillen in de rekolonisatie dynamiek en uiteindelijk in de bodemdiergemeenschap die zich op langere termijn kan vestigen/handhaven op de verschillende suppletie-elementen.

Bij suppleties 1-3 (noordelijk gelegen) en 6 (gelegen achter een schelpenrug) trad binnen enkele jaren herstel op tot dichtheden en samenstellingen die vergelijkbaar zijn met die van de omliggende plaat (Figuur B2-15). Bij suppleties 4, 5 en 7 (zuidelijk gelegen; voor suppletie 5 is met name het zuidelijke deel erosief) bleef het herstel beperkt, met name bij de meest erosieve suppleties 4 en 7 (Figuur B2-15).

Op de meeste suppleties, met uitzondering van suppleties 4 en 7, is de biomassa in 2024 vergelijkbaar met die van referentiegebieden elders op de Roggenplaat, wat erop wijst dat de voedselvoorraad niet langer beperkend is voor foeragerende vogels (Figuur B2-15).

Eerdere studies naar de ontwikkeling van de bodemdiergemeenschappen op de zandsuppletie van de Galgeplaat bieden zeer relevante waarnemingen voor de huidige evaluatievraag en kunnen een leidende rol spelen in de analyse. Hieronder volgt een overzicht van de huidige kennis op basis van deze studies, waarvan een uitgebreide beschrijving beschikbaar is in de Vet et al. (2023).



Figuur B2-11. Links: ruimtelijke verdeling van bodemdierbiomassa (relatieve biomassa) op de suppletie (drie jaar na de aanleg). Rechts: droogvalduur drie jaar na de aanleg van de suppletie op de Galgeplaat (uit van der Werf et al., 2013).

Drie jaar na aanleg van de pilot-suppletie op de Galgeplaat (van der Werf et al., 2013) was de gemiddelde biomassa aan de zuidelijke en laaggelegen kant van de suppletie van dezelfde orde van grootte als in het referentiegebied. Dit was echter niet het geval voor het hoge deel aan de noordzijde van de suppletie, waar de rekolonisatie veel trager op gang is gekomen (Figuur B2-11).

Van der Werf et al. (2013) wijzen naar het vochtgehalte van de bodem als een mogelijke verklarende factor voor de trage rekolonisatie op de Galgeplaat-suppletie. De suppletie bestond inderdaad uit grover sediment dan oorspronkelijk voorkwam op de getijdeplaat. In combinatie met de dikte van de suppletie (vooral aan de

noordkant) bleek dit grove sediment bij laag water maar beperkt in staat om water vast te houden, zoals waargenomen door Schaap (2012).

Het negatieve effect van een grove korrelgrootte op het waterretentievermogen van het sediment werd beschreven door Van Dusen et al. (2012). Zij zagen dat na het terugtrekken van de zee het water langer bleef staan op de plaatdelen met hoge slibpercentages in vergelijking met de overige gebieden die sneller droog werden bij laag water en een lager slibpercentage hadden.

Deze bevindingen kunnen verklaard worden door de hydraulische conductiviteit (capillaire werking) van het sediment, die sterk wordt beïnvloed door de korrelgrootte, zoals bevestigd door veldmetingen die Drabsch (1999) heeft uitgevoerd. In de studie van Drabsch (1999) bleek een geringe slibtoename grote gevolgen te hebben voor het vermogen van plaatdelen om water vast te houden tijdens laagwater en vervolgens ook voor de ontwikkeling van de bodemdiergemeenschap, zoals van der Werf et al. (2013) opperen als verklaring voor de observaties op de Galgeplaat-suppletie. Hun hypothese was gebaseerd op de resultaten van Borsje et al. (2012), die lieten zien dat vochtige bodems een hogere biomassa aan bodemdieren bevatten dan droge bodems.

De analyse voor de evaluatie van vraag 2 heeft duidelijk gemaakt dat droogvalduur en sedimentsamenstelling, die sterk zijn beïnvloed door de aanleg van suppleties, belangrijke sturende factoren zijn voor de ontwikkeling van bodemdieren in deze gebieden.

Een belangrijk aspect voor de huidige studie betreft de keuze van een referentiegebied voor het kwantificeren van het suppletie-effect. Van der Werf et al. (2013) adviseren vooral om bij de keuze van een referentiegebied rekening te houden met de habitatveranderingen als gevolg van de aanleg zelf.

De suppleties vormen een nieuwe habitat die hoger ligt dan het omliggende gebied, waardoor niet te verwachten valt dat zich op de suppletie en in het omliggende gebied dezelfde bodemdierengemeenschap gaat ontwikkelen. Bij de keuze van een geschikte referentie voor het meten van het suppletie-effect zou een gebied gezocht moeten worden met een vergelijkbare hoogte, dynamiek en sedimentsamenstelling als het nieuw aangelegde gebied.

B2.4.1. De ontwikkeling van bodemdieren op de suppleties in relatie tot de omgevingsfactoren

Onderliggende kennisvraag voedselbeschikbaarheid voor vogels 2

Is de ontwikkeling van de bodemdiergemeenschappen op de suppleties gerelateerd aan veranderingen in droogvalduur, hydrodynamica, sedimentdynamiek etc.?

Samenvatting:

De toenemende aanlegdikte tussen de suppletie-elementen S3, S6, S2, S1, S5, S7 en S4 valt ongeveer samen met toenemende bodemhoogte, droogvalduur, sediment mediane korrelgrootte en golf-gerelateerde bodemschuifspanning door de sterke correlatie tussen deze factoren (Figuur B2-5).

Als gevolg van deze differentiële golfforcering (Figuur B1-54) en de daaraan gekoppelde erosie (Figuur B1-40) zijn Suppleties 1-3 (noordelijk gelegen) en 6 (gelegen achter een schelpenrug) substantieel minder erosief dan suppleties 4, 5 en 7 (zuidelijk gelegen; voor suppletie 5 is met name het zuidelijke deel erosief).

Het herstel van de dichtheid, biomassa en het aantal soorten verloopt wel het traagst in de sterk erosieve suppleties S7 en S4 (Figuur B2-15). Een jaar na de aanleg nemen de totale dichtheid, het aantal soorten en de biomassa van bodemdieren drastisch af ten opzichte van de referentiegebieden met vergelijkbare droogvalduur. Tot 2024 volgen de suppleties uiteenlopende hersteltrajecten: bij de minder erosieve suppleties 1-3 en 6 herstellen de dichtheid en samenstelling binnen 2-3 jaar tot niveaus vergelijkbaar met de omliggende plaat, terwijl bij suppleties 4, 5 en 7 het herstel beperkt blijft, vooral bij de meest erosieve suppleties 4 en 7.

De verhouding van de soortensamenstelling van de bodemdierdichtheid verandert weinig direct na de aanleg van de suppletie-elementen in 2019, waarbij borstelwormen en kreeftachtige dominant blijven (Figuur B2-16). Na een tijdelijke toename van kreeftachtige op sterk erosieve suppleties S4 en S7 in 2021 wordt de samenstelling in 2024 over alle suppleties vrij homogeen. Alleen op de minder erosieve suppleties S1, S3 en S6 blijft de bijdrage van oligochaeta, net als in de referentiegebieden, hoger.

Na aanleg neemt de bijdrage van borstelwormen aan de biomassa sterk toe, gevolgd door een geleidelijke toename van schelpdieren (vooral kokkels en overige schelpdieren) tot 2024. Bij de sterk erosieve suppleties S4 en S7 blijft wormenbiomassa dominant.

De frequentieverdeling van de schelpdierprooien voor steltlopers vertoont, zowel in de kwantitatieve als in de semi-kwantitatieve monitoring, een sterke afname het jaar na de aanleg (Figuur B2-19, Figuur B2-23, Figuur B2-24). Het herstel verschilt sterk tussen de suppleties: kokkelbroed verspreidt zich breed tussen 2021-2023 (Figuur B2-23), terwijl grote kokkels in 2023-2024 vooral op minder erosieve suppletie S1 en S6 en op de meer erosieve suppletie S5 voorkomen (Figuur B2-19). Grote nonnetjes verschijnen in 2024 vooral op minder erosieve suppleties S2 en S3, waar kokkels juist minder vertegenwoordigd zijn (Figuur B2-19).

De semi-kwantitatieve monitoring laat verschillen in hersteldynamiek en ruimtelijke verdeling goed zien, zoals de snellere kolonisatie van de suppleties door jonge wadpieren versus oudere individuen. Middelgrote wadpieren zijn in 2024 homogeen aanwezig op alle suppleties, terwijl de frequentie van grote individuen afneemt met toenemende droogvalduur (Figuur B2-25).

Deze verschillen in ontwikkelingen van bodemdieren in combinatie met sterk gekoppelde gradiënten in droogvalduur, sediment samenstelling en bodemschuifspanning door golven, wijzen op een duidelijk invloed van deze factoren op de bodemdieren.

Om antwoord te kunnen geven op evaluatievraag 2 met betrekking tot het effect van de suppleties op de voedselbeschikbaarheid voor vogels, is het van belang om de mechanismen achter die effecten in kaart te brengen. Dat staat centraal in kennisvraag 2.

Waar kennisvraag 1 gericht was op de relatie tussen gradiënten in omgevingsfactoren (zoals bodemhoogte, sediment en hydrodynamica) en bodemdieren op de Roggenplaat, richt kennisvraag 2 zich op de effecten van het specifieke samenspel van omgevingsfactoren op de bodemdiergemeenschap, zoals waargenomen op de verschillende suppleties.

Selectie van de monsters voor de analyse op basis van de omgevingsfactoren

De suppleties dienen voor het behoud van de huidige foerageerfunctie met een droogvalduur tussen de 50% en 80% voor de komende 25 jaar. Om het effect van de suppleties op de bodemdiergemeenschappen te kunnen toetsen, worden de waarnemingen op de suppleties vergeleken met gebieden (de referentielocaties) op de Roggenplaat binnen dezelfde droogvalduurklassen (50-60% en 60-70%) die niet worden beïnvloed door de suppleties.

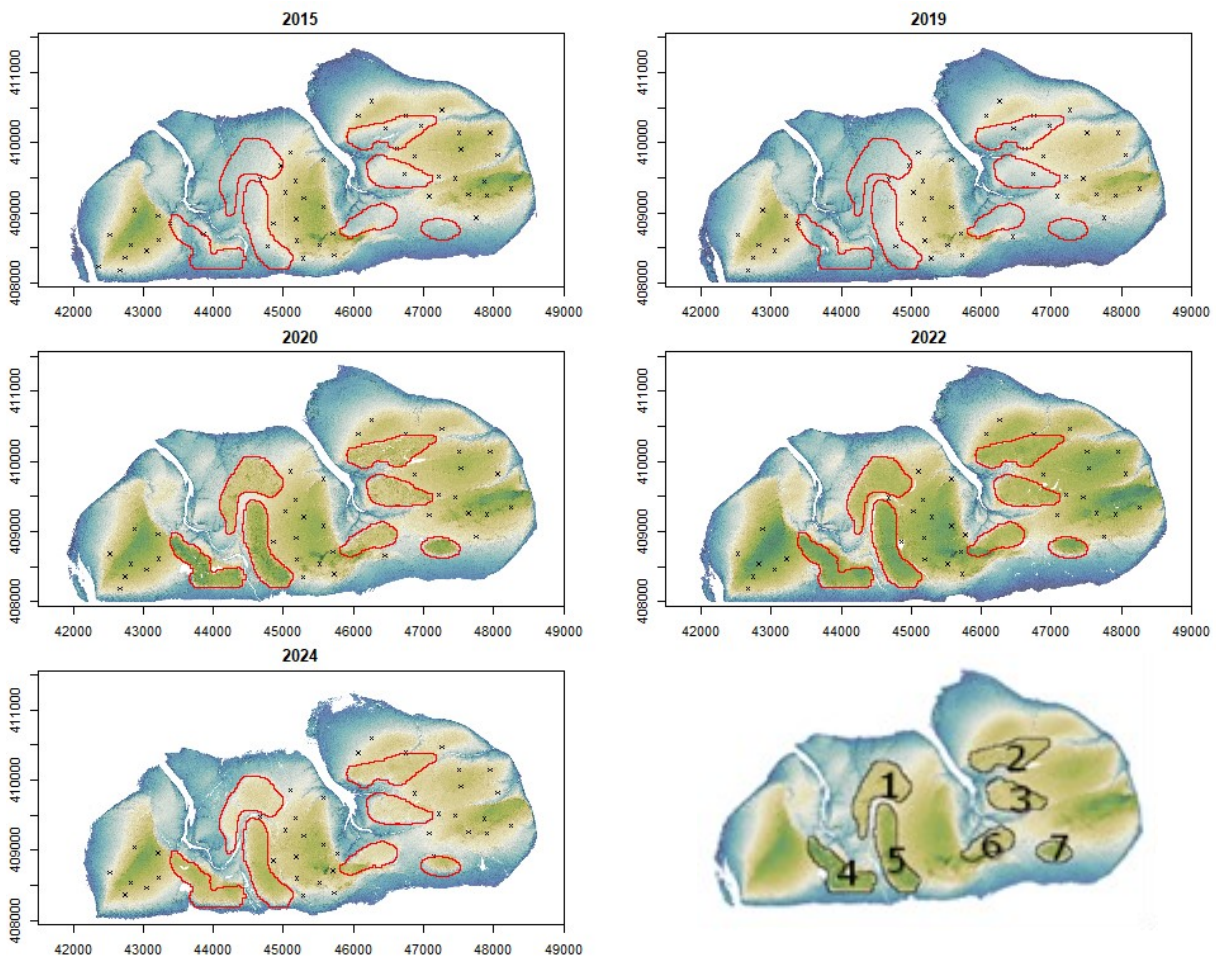
Tabel B2-1 geeft het aantal monsterlocaties per droogvalduurklasse, zowel op als buiten de suppleties. De locaties binnen de droogvalduurklassen 50-60% en 60-70% zijn als referentielocatie geselecteerd, omdat de meeste suppletielocaties zich ook in deze twee categorieën bevinden.

Tabel B2-1. Aantal monsterlocaties (alle jaren samen) binnen de verschillende droogvalduurklassen, verzameld op de suppleties en daarbuiten.

DVD	0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%
Aantal locaties op suppleties	0	0	1	3	27	372	150	4
Aantal locaties buiten suppleties	6	31	39	80	136	136	74	3

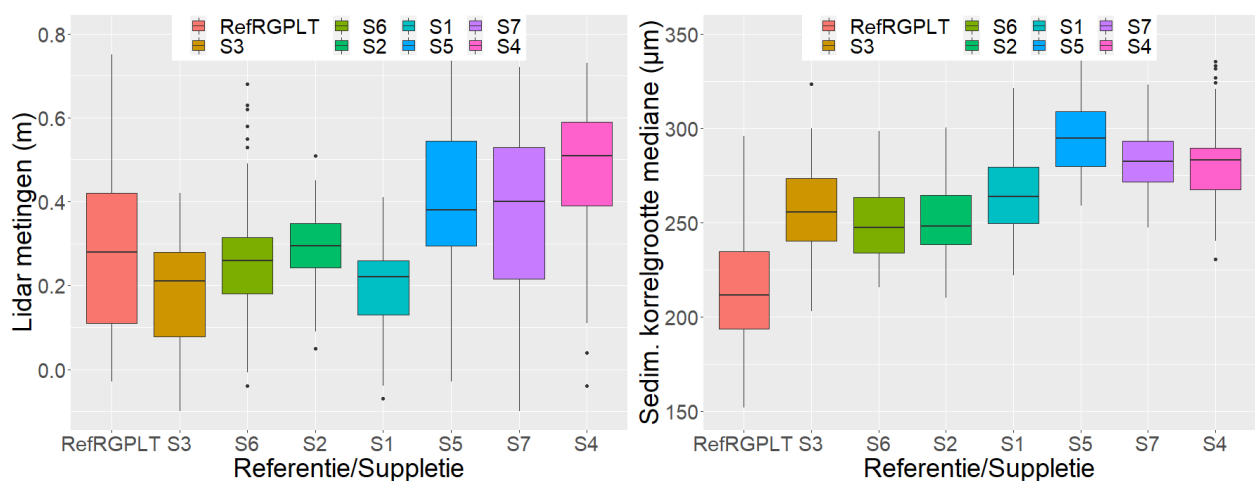
In totaal zijn er 210 referentielocaties geselecteerd; 136 in droogvalduurklasse 50-60% en 74 in klasse 60-70%, met een evenredige verdeling over de jaren 2015 (48), 2019 (46), 2020 (38), 2022 (37) en 2024 (41).

De locaties ('RefRGPLT') die zijn aangewezen als referentie voor de suppleties, liggen op afstand van de suppleties maar wel in gebieden met een droogvalduur tussen de 50 en 70%, omdat de meeste suppletielocaties zich ook binnen die range bevinden. De locaties zijn verdeeld in drie groepen rondom de hoger gelegen gebieden aan de oostelijke en westelijke kant en in het midden van de Roggenplaat (Figuur B2-12).



Figuur B2-12. Weergave van de referentielocaties ('RefRGPLT'), verzameld tussen 2015 en 2024, die worden gebruikt als referentie voor de suppleties. In 2015 en 2019 (vóór de aanleg) bevond een aantal locaties zich binnen de toekomstige ligging van de suppleties. Rechtsonder een weergave van de suppleties nummering.

Terwijl de hoogteligging van de referentielocaties goed overeenkomt met die op de suppleties is de mediane korrelgrootte op de referentielocaties duidelijk kleiner (212 μm) dan op de suppleties (247-295 μm , Figuur B2-13).

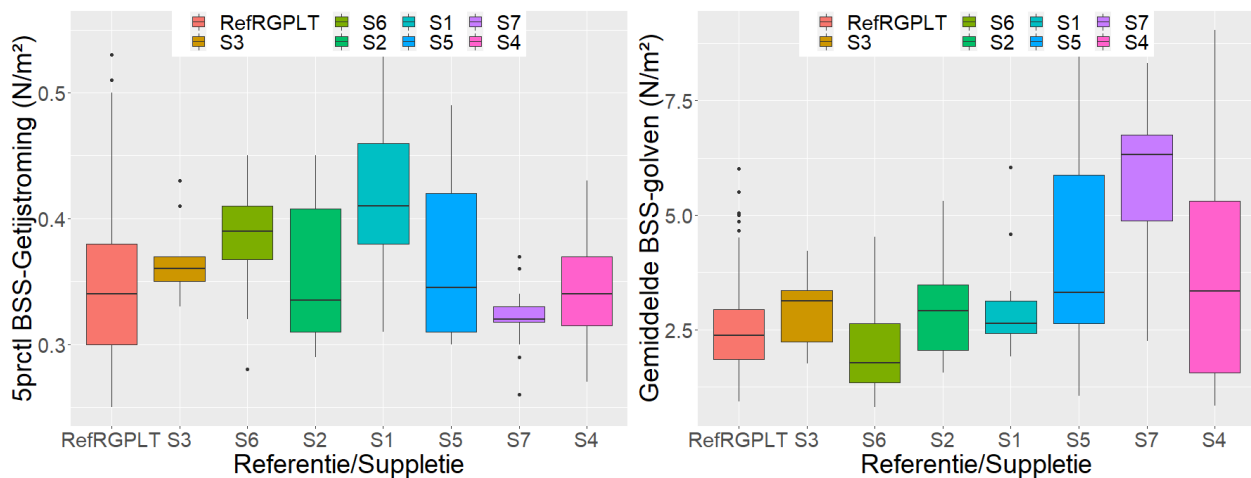


Figuur B2-13. Links: hoogteligging (LiDAR-metingen); rechts: mediane korrelgrootte van de referentielocaties (RefRGPLT) en van de suppleties (S1-S7, alle jaren samen). De suppleties zijn gerangschikt op toenemende aanlegdikte.

Het verschil in sedimentsamenstelling tussen de referenties- en de suppletie locaties kan, gegeven het belang van korrelgrootte voor de ontwikkeling van de bodemdieren, problematisch zijn bij het vergelijken van deze twee groepen van locaties. Toch blijkt de mediane korrelgrootte van 212 μm berekend voor deze locaties buiten de suppletie met een droogvalduur tussen 50 en 70%, hoger te zijn dan de waarde van 205 μm berekend voor alle locaties buiten de suppletie zonder onderscheid van droogvalduur. Geconcludeerd kan worden dat de referentielocaties (RefRGPLT) de meest geschikte selectie van beschikbare locaties op de plaat vormen voor de vergelijking met de suppletie locaties.

Naast het verschil in hoogteligging onderscheiden de suppleties zich van elkaar op basis van hun aanlegdikte (Tabel B1-9), van de dunste naar de dikste: S3 (27 cm), S6 (39 cm), S2 (41 cm), S1 (45 cm), S5 (56 cm), S7 (62 cm) en S4 (79 cm). Die volgorde is ook aangehouden in de grafische weergaven van de waarnemingen per suppletie voor alle figuren in deze bijlage.

De mediane korrelgrootte neemt toe met de hoogteligging en de aanlegdikte van de suppleties (Figuur B2-13) en de gemiddelde mediane korrelgrootte is lager in de dunne (255 μm) dan in de dikke (286 μm) suppleties. Deze positieve relatie tussen mediane korrelgrootte en hoogteligging is ook waargenomen buiten de suppleties (Figuur B2-5).



Figuur B2-14. Links: bodemschuifspanning door getijstrooming (95^{ste} percentiel, N/m^2); rechts: gemiddelde bodemschuifspanning door golven op de referentielocaties (RefRGPLT) en de suppleties (S1-S7, alle jaren samen). De suppleties zijn gerangschikt op toenemende aanlegdikte.

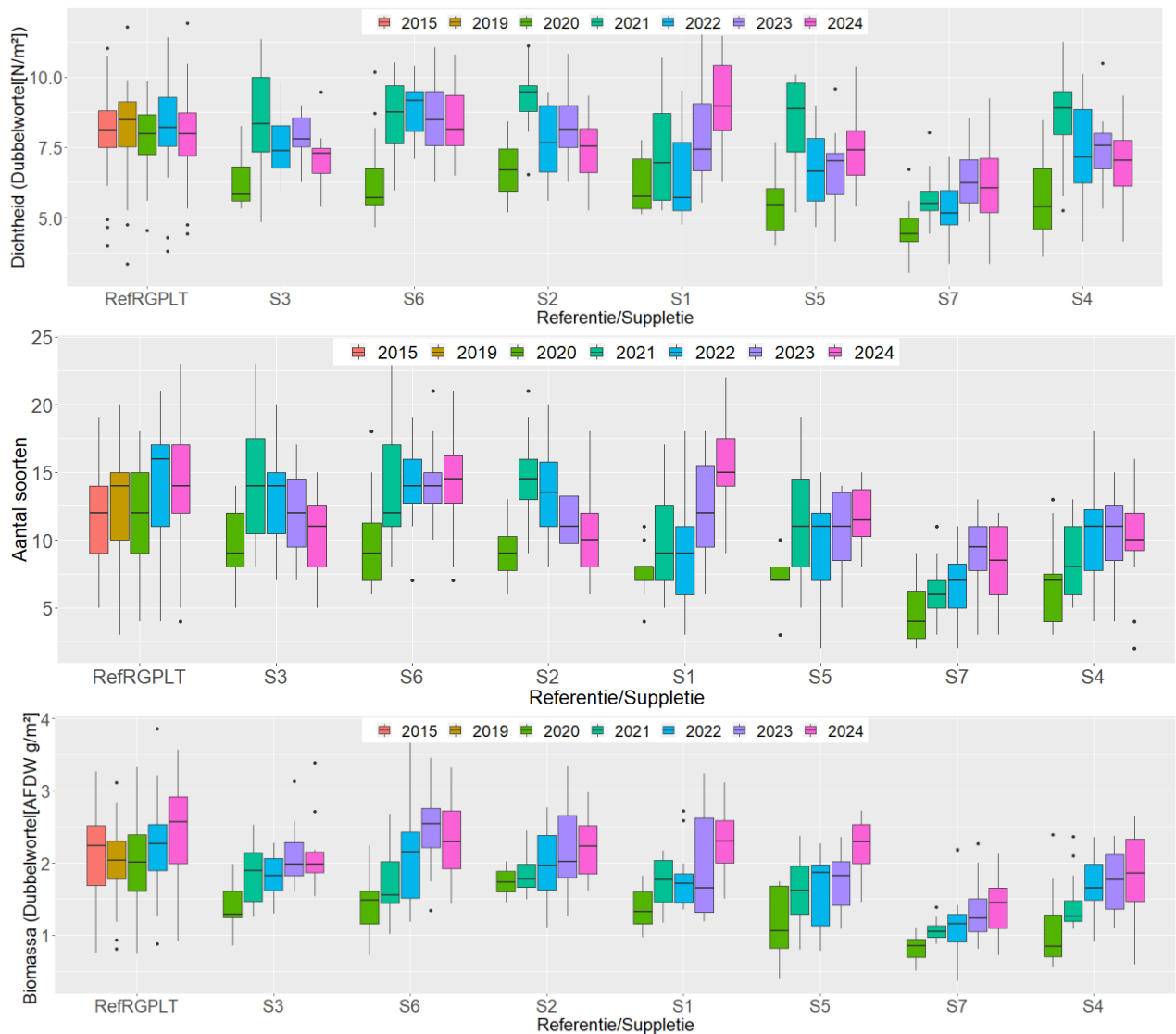
De bodemschuifspanning door getijstrooming op de monsterlocaties vertoont geen eenduidige relatie met de aanlegdikte en/of de bodemhoogte (Figuur B2-13) en de waarden die zijn gemeten op de meeste suppleties vallen binnen de bandbreedte van de metingen op de referentielocaties, met uitzondering van de hogere waarden die op S1 en (in mindere mate) op S6 zijn waargenomen. Daar staat tegenover dat de bodemschuifspanning door golven duidelijk hoger is op de dikke en hooggelegen suppleties 5, 7 en 4 dan op de overige suppleties en/of op de referentielocaties (Figuur B2-13).

Op basis van de verschillen in hoogteligging van de suppleties tussen 2020 en 2024 (Figuur B1-40) blijkt dat vooral de zuidelijke suppleties 4 en 7 het sterkste eroderen. Suppletie 5 die ook gekenmerkt door een relatieve hoge niveau van bodemschuifspanning door getijstrooming of golven (Figuur B2-14) blijkt onderhevig te zijn aan een actieve erosieproces vooral aan de zuidelijke kant (Figuur B1-40). Het erosie proces is substantieel minder intens in suppleties 1, 2, 3 en 6 die door de noordelijke ligging (1, 2, 3) of de beschutte ligging achter een schelpenrug (6) (Figuur B1-54).

Bodemdierdichtheid, biomassa en aantal soorten op de suppleties en in de referentiegebieden

De totale dichtheid, biomassa en het aantal soorten bodemdieren op de referentielocaties (RefRGPLT) vertonen geen duidelijke trend en laten nog steeds een grote overlap tussen de jaren zien (Figuur B2-15). In het eerste jaar na de aanleg (2020) zijn op alle suppleties de dichtheid, biomassa en het aantal soorten sterk afgenomen vergeleken met de referentielocaties. De laagste waarden voor deze drie indicatoren werden gevonden op de sterk erosieve suppleties S4 en S7, en in mindere mate op suppletie S5. Tussen 2020 en 2021, tijdens het eerste jaar na de aanleg, is de dichtheid sterk toegenomen op de beschutte suppleties S3, S6 en S2 en op de meer erosieve suppleties S5 en S4. Deze toename was minder

intens op suppleties S1 en S7 (Figuur B2-15). De dichtheidsniveaus lagen in 2021 op veel suppleties binnen hetzelfde bereik als voor de referentielocaties, met uitzondering van suppleties S1 en S7, waar relatief lage waarden werden waargenomen vergeleken met de overige suppleties.



Figuur B2-15. Totale bodemdierdichtheid ($\sqrt[4]{N/m^2}$), aantal soorten en biomassa ($\sqrt[4]{AFDWg/m^2}$) in de referentielocaties (RefRGPLT) en op de suppleties (S1 tot S7) over de jaren (geen RefRGPLT-monster in 2021). De suppleties zijn gerangschikt op toenemende aanlegdikte.

Het aantal soorten nam ook sterk toe tussen 2020 en 2021 op de beschutte suppleties S3, S6 en S2 en, in mindere mate, op suppletie S1. Het aantal soorten nam tussen 2020 en 2021 ook toe op de meer erosieve suppleties (5, 7, 4) maar bleef op deze suppleties in beide jaren lager dan op de overige suppleties vooral bij S7 en S4 en in mindere mate bij S5.

Ook de biomassa nam tussen 2020 en 2021 op de meeste suppleties toe, maar die relatieve toename is wel minder duidelijk dan die van de dichtheid en het aantal soorten. De sterk erosieve suppleties S7 en S4 hadden de laagste biomassawaarden vergeleken met de andere suppleties, en dat gold ook voor de dichtheid en het aantal soorten.

Tussen 2021 en 2024 nam de dichtheid geleidelijk af op de suppleties waar in het eerste jaar na de aanleg een sterke toename te zien was. Dit geldt voor de beschutte suppleties S3 en S2 en de meer erosieve suppleties S5 en S4. In dezelfde periode, van 2021 tot 2024, stabiliseerde de dichtheid op suppletie S6 en nam zelfs toe op S1 en S7.

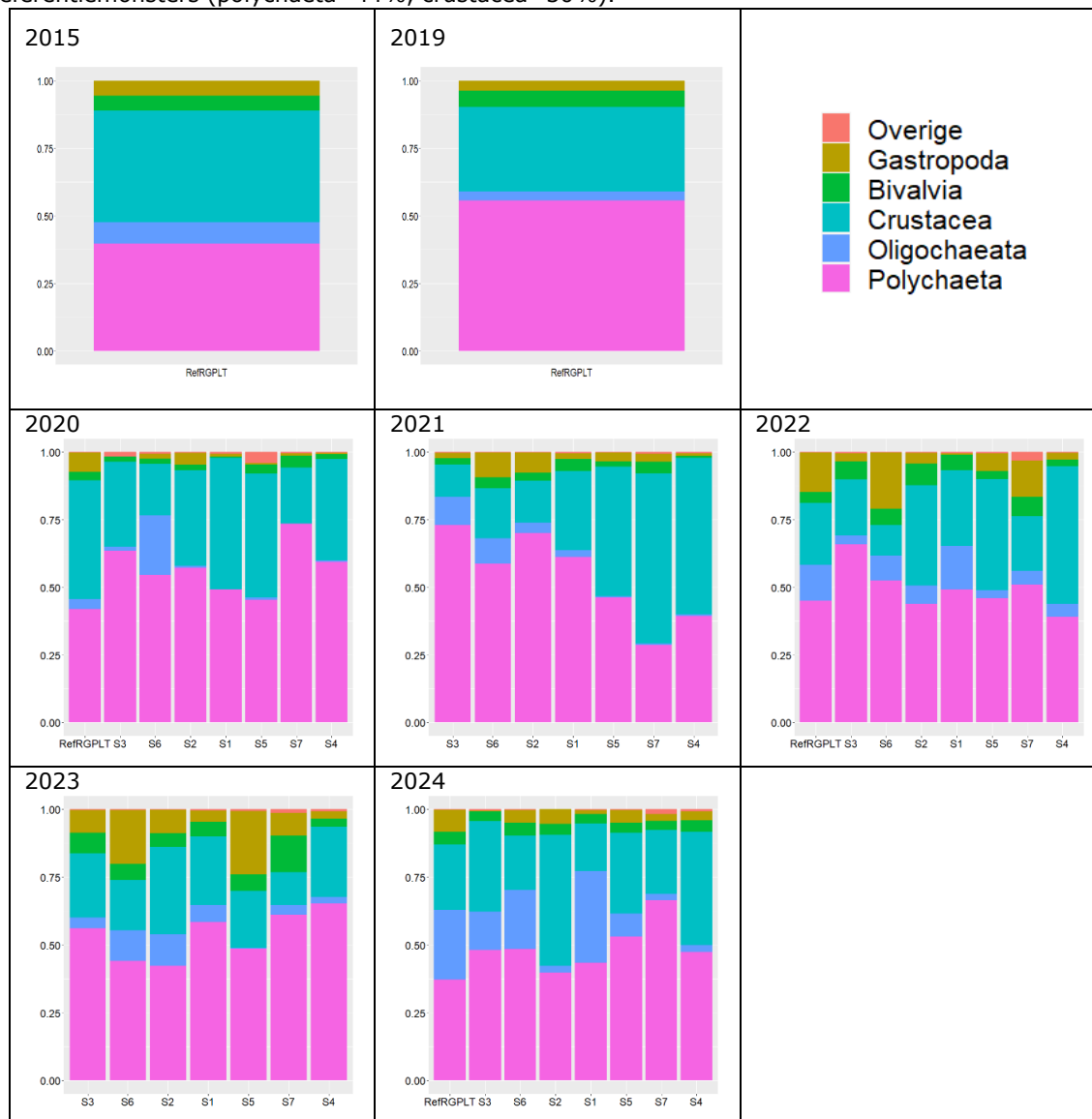
Het aantal soorten per monster nam af tussen 2021 en 2024 op suppleties waar het eerste jaar na de aanleg een sterke toename te zien was, zoals de beschutte suppleties S3 en S2. Op de beschutte suppletie S6 en de meer erosieve suppletie S5 was er na 2021 eerder sprake van een stabilisatie van het aantal soorten. Op de substantieel minder erosieve suppletie S1 en op de sterk erosieve suppleties S7 en S4 nam het aantal

soorten toe na 2021 (S4) of 2022 (S1, S7). Ondanks die positieve trend bleef het aantal soorten het laagste op die sterk erosieve suppleties S7 en S4.

In die jaren nam de biomassa geleidelijk toe op alle suppleties en ook op de referentielocaties (RefRGPLT) liet de biomassa een stijgende lijn zien sinds 2020. De biomassa bleef wel het laagst op de sterk erosieve suppleties S7 en S4.

Taxonomische samenstelling van bodemdieren op de suppleties en in de referentiegebieden

De bodemdierdichtheid wordt sterk gedomineerd door de polychaeta en de crustacea, die gemiddeld over de jaren en op alle locaties respectievelijk 52% en 30% van de totale dichtheden vertegenwoordigen (Figuur B2-16), met weinig verschil tussen de suppleties (polychaeta=53%, crustacea=33%) en de referentiemonsters (polychaeta=44%, crustacea=30%).



Figuur B2-16. Taxonomische verdeling als relatieve dichtheid op basis van het gemiddelde zoals berekend voor elk monsterjaar voor de referentielocaties (RefRGPLT) en op de suppleties (S1 tot S7). De suppleties zijn gerangschikt op toenemende aanlegdikte.

Opmerkelijk aan de ontwikkeling van de taxonomische samenstelling is de relatief hoge bijdrage van de crustacea aan de bodemdierdichtheden, vooral op de sterke erosieve suppleties S7 (63%) en S4 (58%) in 2021.

Door de jaren heen is de bijdrage van de oligochaeta toegenomen met een gemiddelde over alle locaties van 4% tussen 2015 en 2021 tot 9% tussen 2022 en 2024. In 2024 vertegenwoordigden de oligochaeta gemiddeld 14% van de totale dichtheid. In hetzelfde jaar werd op de gematigde erosieve suppletie S1 een maximale bijdrage van de oligochaeta aan de totale dichtheid van 34% waargenomen en maar liefst 22% op suppletie S6 en 26% op de referentielocaties. De jaren 2022-2023 werden ook gekenmerkt door een

relatieve toename van de bivalvia en de gastropoda die tussen 2015 en 2021 samen gemiddeld 6% van de totale dichtheid vormden en 15% tussen 2022 en 2023. In 2024 nam de bijdrage van de gastropoda weer af tot het niveau van 2021.

De relatieve taxonomische samenstelling op basis van biomassa (Figuur B2-17) wordt sterk gedomineerd door de polychaeta en de bivalvia, die gemiddeld over de jaren en op alle locaties respectievelijk 39% en 53% van de totale biomassa vertegenwoordigen. Daar onderscheiden de referentiemonsters zich van de suppletiemonsters met een hogere bijdrage van de bivalvia met 61% van de totale biomassa in de referentiemonsters vergeleken met slechts 33% in de suppletiemonsters. In die suppletiemonsters domineren de polychaeta met 59% vergeleken met 34% in de referentiemonsters.



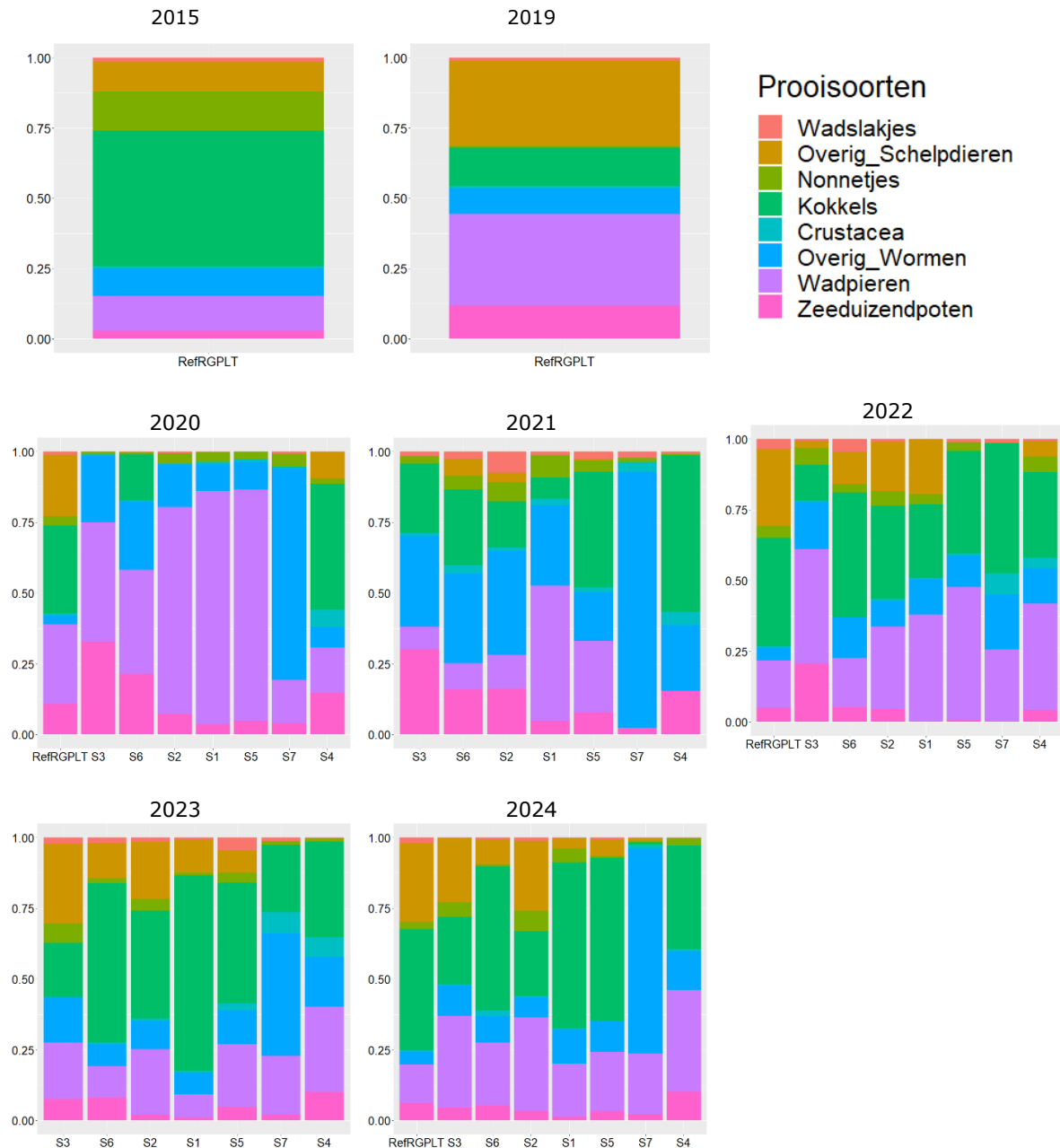
Figuur B2-17. Taxonomische verdeling als relatieve biomassa op basis van het gemiddelde zoals berekend voor elk monsterjaar voor de referentielocaties (RefRGPLT) en op de suppleties (S1 tot S7). De suppleties zijn gerangschikt op toenemende aanlegdikte.

In 2020 (na de aanleg) vertegenwoordigden de polychaeta het overgrote deel van de biomassa (gemiddeld 91%) op de meeste suppleties, met uitzondering van de sterk erosieve suppletie S4 met slechts 37% als bijdrage aan de totale biomassa. Op die suppletie (S4) bestond de bodemdierbiomassa, zoals in de referentiemonsters, hoofdzakelijk uit bivalvia, respectievelijk 52% en 54%.

Tussen 2020 en 2024 nam de bijdrage van bivalvia op alle suppleties toe (zie het groener worden van de balken tussen 2020 en 2024 in Figuur B2-17), met uitzondering van de sterk erosieve suppleties S7 en S4, waar de bijdrage van polychaeta tussen 2023 en 2024 weer toenam tot respectievelijk 74% en 56% van de totale biomassa.

Relatieve biomassa van individuele prooi-soorten op de suppleties en in de referentiegebieden

De relatieve biomassa van de geselecteerde prooi-soorten (paragraaf B2.2.2) laat een sterke dynamiek zien op de referentielocaties (refRGPLT) waar de dominantie van kokkels en overige schelpdieren eerst afneemt tussen 2015 en 2019 en vervolgens weer toeneemt tussen 2019 en 2024 (Figuur B2-18).



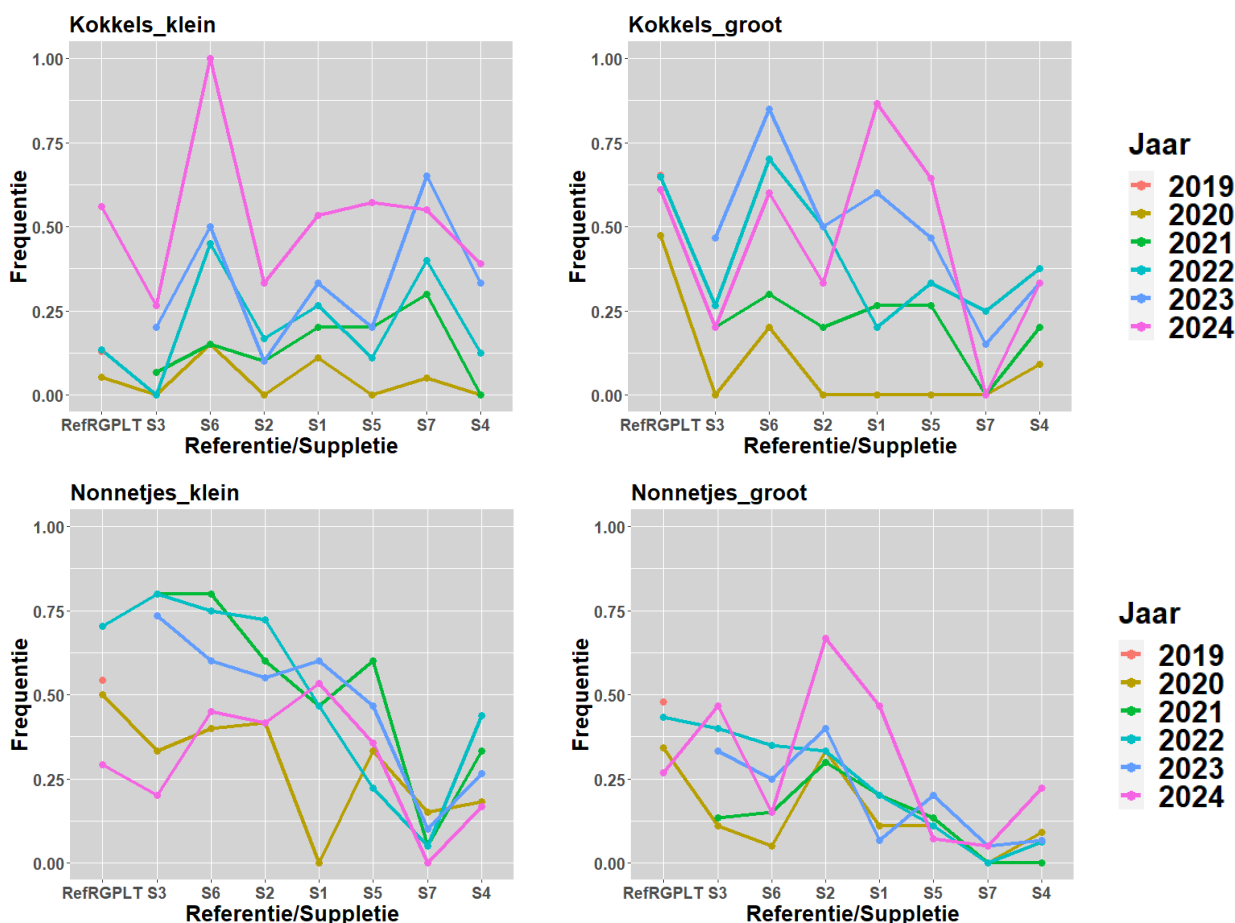
Figuur B2-18. Relatieve biomassa van de geselecteerde prooi-soorten op basis van het gemiddelde zoals berekend voor elk monsterjaar voor de referentielocaties (RefRGPLT) en op de suppleties (S1 tot S7). De suppleties zijn gerangschikt op toenemende aanlegdikte.

De dominantie (tussen 82% en 99%) van polychaeta in de prooi-soortbiomassa op de suppleties m.u.v. van de sterk erosieve suppletie S4 in 2020 (na de aanleg) was vooral te danken aan wadpieren, zeeduizendpoten en overige wormen, terwijl kokkels, nonnetjes en overige schelpdieren 56% van de prooi-soortbiomassa vertegenwoordigden in zowel de referentie monsters als in de S4-suppletiemonsters (Figuur B2-18). Tussen 2020 en 2024 nam de relatieve bijdrage van kokkels, nonnetjes en overige schelpdieren aan de prooi-soortbiomassa toe tot gemiddeld 59% in de substantieel minder erosieve suppleties (1, 2, 3, 6) en respectievelijk 64% en 39% in de meer erosieve suppleties S5 en S4. Op de sterk erosieve suppletie S7 vond de relatieve toename van schelpdieren (vooral kokkels) in de prooi-soortbiomassa (46%) een jaar later

plaats dan op de andere suppleties, namelijk pas tussen 2021 en 2022. In 2023 nam de bijdrage van kokkels aan de prooidiersoortbiomassa op S7 weer af tot 24%, en die afname ging door in 2024 met minder dan 1% kokkels in de prooisooortbiomassa. Ondanks de waargenomen toename van schelpdieren in de totale biomassa bleef de relatieve bijdrage van de wormen (wadpieren, zeeduizendpoten en overige wormen) nog steeds groter in 2022 en 2024 op alle suppleties (gemiddeld 52% en 50%) dan op de referentielocaties (26% en 24%).

Frequentie van voorkomen van prooisooortgroepen op de suppleties en in de referentiegebieden

De frequentie van voorkomen als maat voor de trefkans is heel geschikt voor een evaluatie van de beschikbaarheid van potentiële prooien. Rekening houdend met de statistische relatie tussen dichtheid en frequentie zeggen de frequenties van voorkomen ook iets over de kwantitatieve aspecten van de voedselbeschikbaarheid.



Figuur B2-19. Frequentie van voorkomen (kwantitatieve monitoring) van kokkels (*Cerastoderma edule*) en nonnetjes (*Macoma balthica*) met onderscheid tussen kleine (<10 mm) en grote (>10 mm) individuen in de referentiegebieden (RefRGPLT) en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen (vóór de aanleg van de suppleties in 2019 was er geen representatieve bemonstering op de aanleglocaties).

De huidige analyse is gebaseerd op een selectie uit de kwantitatieve monitoring van soorten met relatief hoge frequenties van voorkomen (>0.25), wat de nodige robuustheid biedt bij de interpretatie van temporele trends en/of verschillen tussen gebieden. De frequentie van voorkomen van de geselecteerde soorten die door de jaren heen (vóór en na de aanleg) zijn waargenomen in de referentiegebieden ('RefRGPLT') én op de suppleties zelf (S1 tm S7) zijn weergegeven in de onderstaande figuren.

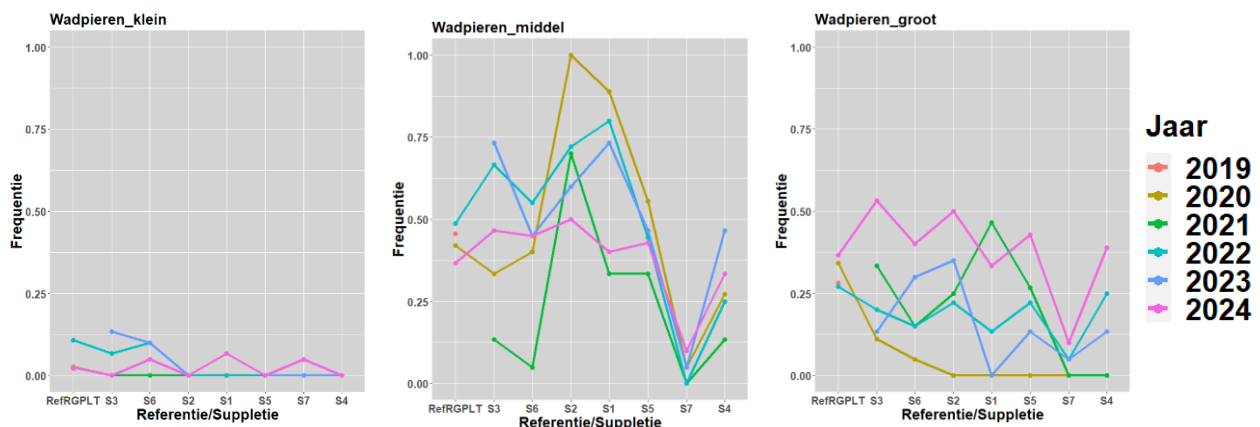
De kleine kokkels lieten, na de zeer lage frequenties van voorkomen op de suppleties (wel iets hoger op S6, S1 en S7) en ook in de referentiegebieden in 2020 na de aanleg, een gestaag herstel zien door de jaren heen (Figuur B2-19). Het herstel verliep het snelst op de suppleties met de hogere frequenties van voorkomen in 2020 (S6, S1 en S7). Het succesvolste herstel vond in 2024 plaats op de beschutte suppletie S6, met een frequentie van voorkomen van 100%. Het herstel verliep beduidend trager op de andere minder erosieve

suppleties S3 en S2 en zelfs minder snel dan op de meer erosieve suppleties (S5, S7 en S4). Net als op de beschutte suppleties S6 en S1 namen de frequenties van voorkomen op de meer erosieve suppleties S5 en S7 tot 2024 toe tot waarden van meer dan 50%, wat beduidend hoger is dan de waarden van minder dan 30% die werden waargenomen op suppleties S3, S2 en S4.

De frequenties van voorkomen van de grote kokkels zijn tussen 2019 en 2020 iets gedaald (van circa 65% tot 50%) in de referentiegebieden en herstelden zich de jaren erna (Figuur B2-19). Na lage frequenties van voorkomen op de suppleties in 2020, maar met hogere waarden voor de kleine kokkels (ca. 20%) op beschutte suppletie S6, namen de frequenties van voorkomen tot 2023 weer toe en tussen 2023 en 2024 weer af op de andere beschutte suppleties S3, S6 en S2. De frequenties van voorkomen van de grote kokkels namen wel toe na 2020, maar bleven al die jaren lager dan 30% op de sterk erosieve suppleties S7 en S4. In 2024 waren de frequenties van voorkomen op de minder erosieve suppleties S6 en S1 en de op de meer erosieve suppletie S5 net als in de referentiegebieden hoger dan 50%.

In 2020 (na de aanleg) liet de voorkomfrequentie van de kleine nonnetjes (Figuur B2-19) een dalende trend zien van de referentiegebieden (50%) naar de minder erosieve suppleties S3, S6 en S2 (ca. 40%) tot de meer erosieve suppleties S5, S7 en S4 (tussen 15% en 30%). De beschutte suppletie S1 werd in 2020 gekenmerkt door de totale afwezigheid van kleine nonnetjes. De frequenties van voorkomen namen in de daaropvolgende jaren toe op de meeste suppleties, met de hoogste waarden in 2021 (S6, S5), 2022 (S3, S2, S4) en 2023 (S1). Op de sterk erosieve suppletie S7 namen de frequenties van voorkomen van de kleine nonnetjes constant af tussen 2020 (15%) en 2024 (0%). In 2024 waren de frequenties van voorkomen van de kleine nonnetjes gelijk of lager dan in 2020 op de meeste suppleties (met uitzondering van S1) en in de referentiegebieden.

De frequenties van voorkomen van de grote nonnetjes (Figuur B2-19), door de jaren heen tussen de 25% en 50% in de referentiegebieden, lagen in 2020 beduidend lager op de meeste suppleties (ca. 10%) met uitzondering van suppletie S2 (ca. 30%). In de jaren na 2020 gingen de frequenties van voorkomen van de grote nonnetjes op en neer op de meeste suppleties, evenals in de referentiegebieden. In 2024 zijn de hoogste frequenties van voorkomen waargenomen op de minder erosieve suppleties S1, S2 en S3.



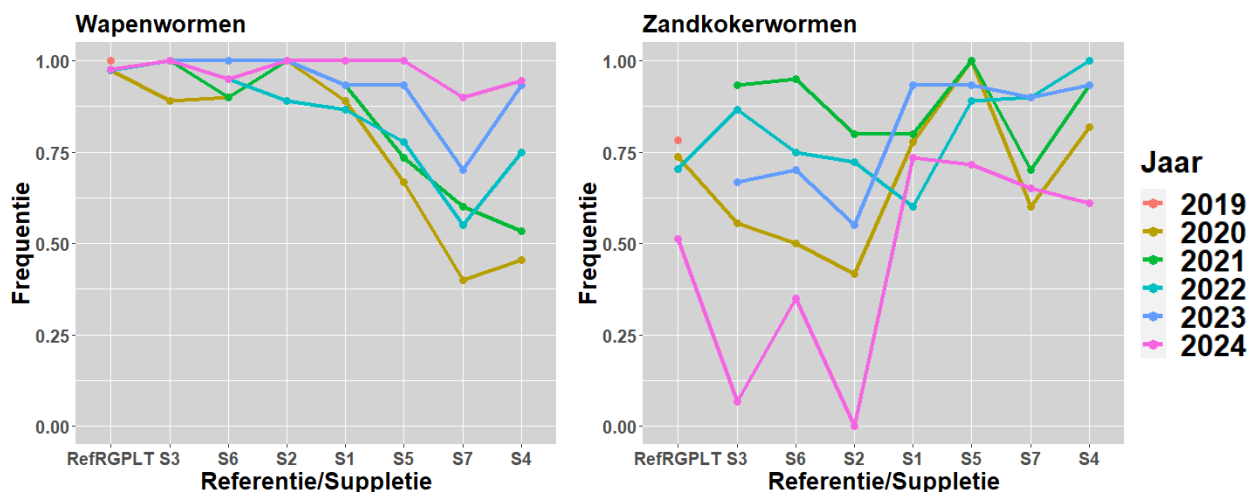
Figuur B2-20. Voorkomfrequentie (kwantitatieve monitoring) van de wadpieren met onderscheid tussen de grootteklassen klein (<25 mm), middel (25->85 mm) en groot (>85 mm) in de referentiegebieden (RefRGPLT) en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen (vóór de aanleg van de suppleties in 2019 was er geen representatieve bemonstering op de aanleglocaties).

De lage frequenties van voorkomen van de kleine wadpieren (<25mm) in alle gebieden maakt de kwantitatieve interpretatie van de waarnemingen niet betrouwbaar.

De voorkomfrequentie van de middelgrote wadpieren (25-85 mm) in de referentiegebieden is door de jaren heen vrij stabiel gebleven, tussen de 35% en 50%. In 2020, een jaar na de aanleg, was de voorkomfrequentie van de middelgrote wadpieren op suppleties S3 en S6 met waarden tussen de 30% en 40% zeer vergelijkbaar met de referentiegebieden, maar wel met respectievelijk 100% en 88% beduidend hoger op de overige minder erosieve suppleties S1 en S2. Op de meer erosieve suppleties S5, S4 en S7 was de voorkomfrequentie van de middelgrote wadpieren respectievelijk 56%, 26% en 7%. De frequenties van voorkomen van de middelgrote wadpieren gingen tussen 2020 tot 2024 op en neer op alle suppleties. In 2024 lagen de frequenties van voorkomen van de middelgrote wadpieren tussen de 33% en 50% in de referentiegebieden en op alle suppleties, met uitzondering van sterk erosieve suppletie S7 met waarden van circa 10%.

Net als bij de middelgrote wadpieren is de voorkomfrequentie van de grote wadpieren (>85 mm) door de jaren heen vrij stabiel gebleven, tussen de 25% en 40% in de referentiegebieden. De voorkomfrequentie van de grote wadpieren (>85 mm) was in 2020 (een jaar na de aanleg) beduidend lager op de suppleties, met waarden van respectievelijk 12% en 6% op de minder erosieve suppleties S3 en S6 en 0% op de overige suppleties. Na schommelingen van jaar tot jaar op de verschillende locaties bereikten de frequenties van voorkomen van de grote wadpieren op de meeste suppleties relatief hoge waarden, vergelijkbaar met of zelfs hoger dan in de referentiegebieden (30% tot 55%). Op sterk erosieve suppletie S7 bleven de frequenties van voorkomen van de grote wadpieren gedurende die jaren lager dan op de overige suppleties, met waarden tot 12%.

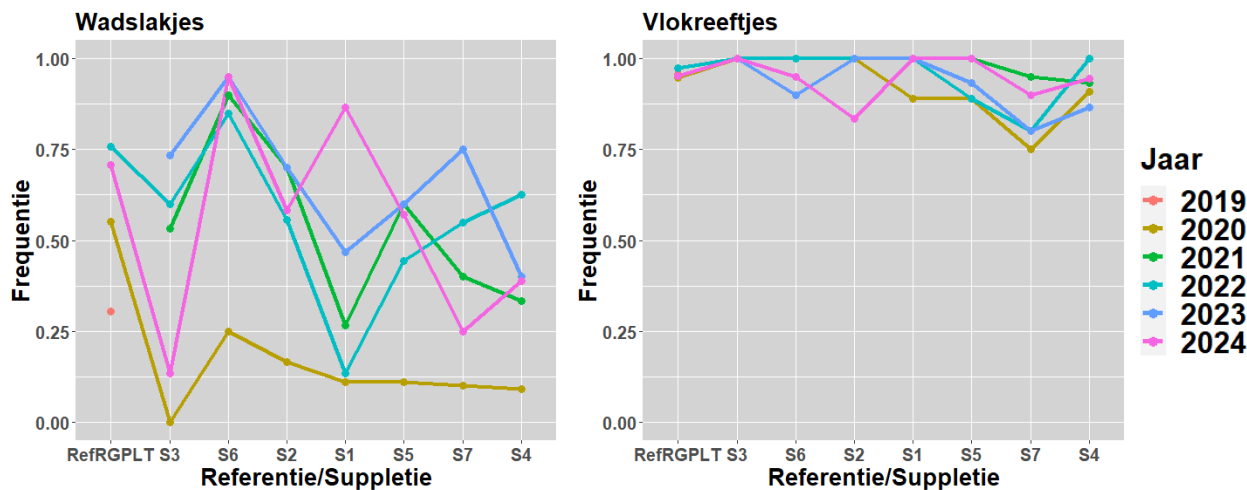
Naast de wadpieren bereikten twee andere soorten borstelwormen, namelijk de wapenwormen en de zandkokerwormen, frequenties van voorkomen van veelal boven de 25% (Figuur B2-21).



Figuur B2-21. Voorkomfrequentie (kwantitatieve monitoring) van de wapenwormen en de zandkokerwormen in de referentiegebieden (RefRGPLT) en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen (vóór de aanleg van de suppleties in 2019 was er geen representatieve bemonstering op de aanleglocaties).

Wapenwormen kwamen door de jaren heen constant voor in de monsters uit de referentiegebieden. Op de minder erosieve suppleties (1, 2, 3, 6) gingen de frequenties van voorkomen tussen 2020 en 2024 op en neer (90%-100%) en bereikten de hoogste waarde in 2024 of 2023 bij S6. De laagste frequenties van voorkomen van de wapenwormen zijn waargenomen bij de zeer erosieve suppleties S4 en S7.

De voorkomfrequentie van de zandkokerwormen in de referentiegebieden bleef tussen 2019 en 2022 hangen rond de 75% en zakte tot 50% in 2024. Op de minder erosieve suppleties lag de voorkomfrequentie van de zandkokerwormen in 2020 tussen de 40% en 60% in S3, S6, S2 tot 80% in S1, bereikte in al die suppleties waarden tussen de 80% en 90% in 2021. Tussen 2021 en 2024 daalde de voorkomfrequentie van de zandkokerwormen in de minder erosieve suppleties naar respectievelijk 35% (S6), 10% (S3), en zelf 0% (S2), terwijl deze in S1 hoog bleef (75%). Op de overige meer erosieve suppleties S5, S7 en S4 ging de voorkomfrequentie van de zandkokerwormen tussen 2020 en 2022 op en neer, bereikte relatief hoge waarden van rond de 90% en nam vervolgens af met waarden tussen de 60% en 70% in 2024.



Figuur B2-22. Voorkomfrequentie (kwantitatieve monitoring) van de wadslakjes en de vlokreeftjes in de referentiegebieden (RefRGPLT) en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen (vóór de suppletie in 2019 was er geen representatieve bemonstering op de aanleglocaties).

Na een relatief lage voorkomfrequentie van de wadslakjes (32%) in 2019 volgde weer een toename in de jaren erna tot respectievelijk 75% en 70% in 2022 en 2024 in de monsters uit de referentiegebieden (Figuur B2-22). In 2020 (na de aanleg) werden er geen wadslakjes waargenomen op de beschutte suppletie S3, terwijl de voorkomfrequentie op de overige minder erosieve suppleties S6, S2 en S1 nog respectievelijk 25%, 18% en 12% was. Op de meer erosieve suppleties (4, 5, 7) was de voorkomfrequentie van de wadslakjes ook relatief laag (circa 12%) in 2020.

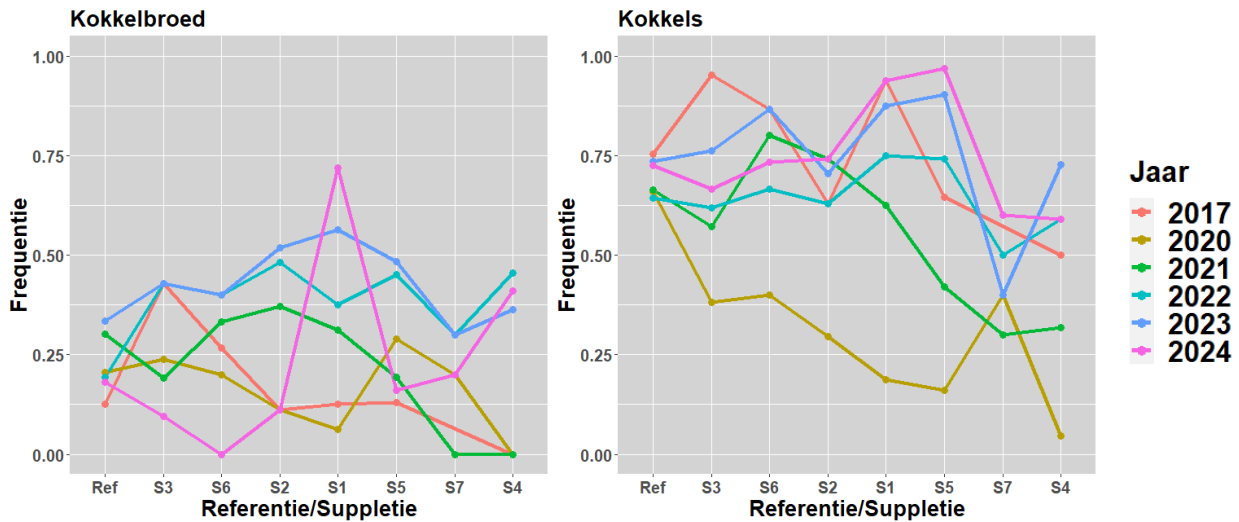
Tussen 2020 en 2024 toonde de voorkomfrequentie van de wadslakjes grote variaties tussen de suppleties en door de jaren heen. Na een toename tot circa 75% in 2023 in de beschutte suppletie S3 daalde de voorkomfrequentie van de wadslakjes naar 12,5% in 2024. In de overige minder erosieve suppleties (1, 2, 6) was de voorkomfrequentie van de wadslakjes relatief hoog in de jaren na de suppletie met waarden van circa 90% in S6 en 65% in S2. In de minder erosieve suppletie S1 nam de voorkomfrequentie van de wadslakjes geleidelijk toe na de aanleg tot circa 90% in 2024. De voorkomfrequentie van de wadslakjes nam ook toe na 2020 in de meer erosieve suppleties en toonde relatief veel variatie in de jaren na de aanleg tot waarden in 2024 van 60% (S5), 40% (S4) en 25% (S7).

De voorkomfrequentie van de vlokreeftjes bleef hoog door de jaren heen (tussen de 75% en 100%) in alle gebieden, maar veelal wel met iets lagere waarden op de zeer erosieve suppleties S7 en S4 (Figuur B2-22).

Voorkomfrequentie van prosoorten die zijn waargenomen tijdens de semi-kwantitatieve monitoring door Rijkswaterstaat

Waar de kwantitatieve monitoring van bodemdieren verspreid is over de hele plaat (Figuur B2-1), is de semi-kwantitatieve monitoring geconcentreerd op de suppleties (Escaravage, 2024). De referentielocaties ('Ref') liggen in deze monitoring rondom en dus lager dan de suppleties en kijken daarom af van de referentiegebieden ('RefRGPLT') die zijn geselecteerd bij de kwantitatieve monitoring binnen dezelfde droogvalduurklassen (50%-70%) als de suppleties.

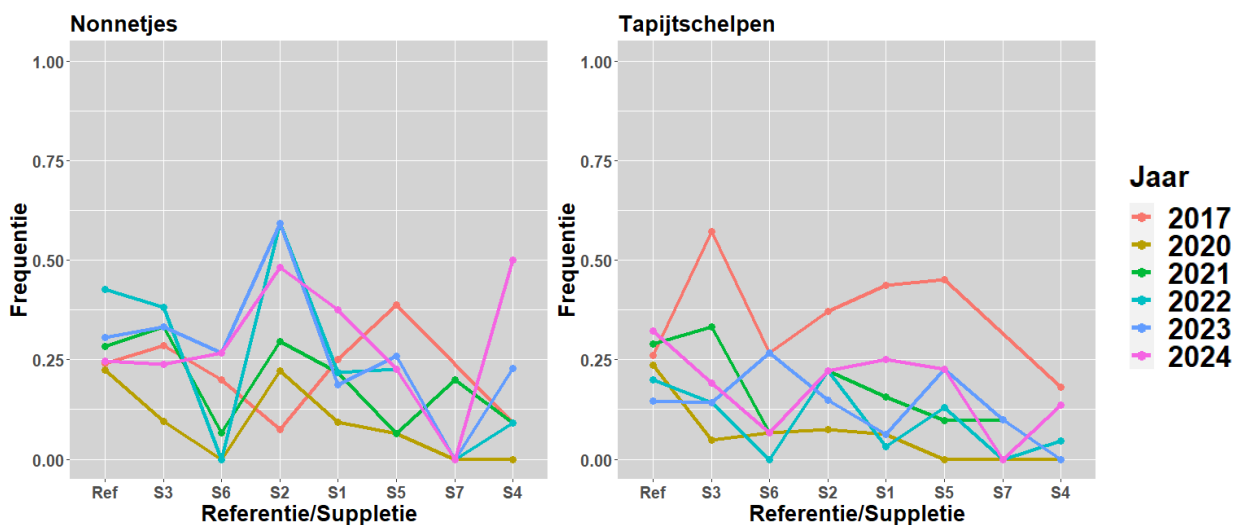
De huidige analyse is gebaseerd op een selectie uit de semi-kwantitatieve monitoring van soorten met relatief hoge frequenties van voorkomen (>0.25), wat de nodige robuustheid biedt bij de interpretatie van temporele trends en/of verschillen tussen gebieden. De frequenties van voorkomen van de geselecteerde soorten die door de jaren heen (vóór en na de aanleg) zijn waargenomen in de referentiegebieden rondom de suppleties ('Ref') én op de suppleties zelf (S1-S7), zijn weergegeven in de onderstaande figuren (geen waarneming op suppletie S7 in 2017).



Figuur B2-23. Voorkomfrequentie (semi-kwantitatieve monitoring) van kokkelbroed en (volwassen) kokkels in de referentiegebieden (Ref) rondom de suppleties en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen.

De frequenties van voorkomen van het kokkelbroed in de referentiegebieden gingen, na een toename van 12% naar 32% in de jaren 2017, 2020 en 2021, in 2022, 2023 en 2024 op en neer tot een waarde van 20% (Figuur B2-23). De frequenties van voorkomen van het kokkelbroed lieten uiteenlopende trends zien tussen de suppleties, met bijvoorbeeld een respectievelijk sterke afname en toename op S3 en S5 tussen 2017 en 2020. Na 2021 vertoonden de frequenties van voorkomen van het kokkelbroed een wat eentoniger patroon met een toename tot 2023 op de meeste suppleties. Tussen 2023 en 2024 namen de frequenties van voorkomen van het kokkelbroed sterk af op de meeste suppleties en ook in de referentiegebieden, terwijl juist een toename waar te nemen was op suppleties S1 en S4.

De frequenties van voorkomen van de kokkels in de referentiegebieden bleven vrij stabiel door de jaren heen met waarden tussen de 63% en 75% (Figuur B2-23). Op de aanleglocaties in 2017 (vóór de aanleg) waren de frequenties van voorkomen van de kokkels het hoogst (85% tot 95%) op suppleties S3, S6 en S1, wat lager (63%) op suppleties S2 en S5 en het laagst op de meer erosieve suppleties S7 en S4 (50%). Na de aanleg (2020) vertoonden de frequenties van voorkomen van de kokkels een drastische afname op alle suppleties, maar wel in mindere mate op suppletie S7, tot minder dan 10% op suppletie S4. Na 2020 gingen de frequenties van voorkomen van de kokkels op de meeste suppleties omhoog met in 2024 de hoogste waarden (ca. 95%) op suppleties S1 en S5, tussenliggende waarden van 65% tot 75% net als in de referentiegebieden op suppleties S3, S6, S2 en de laagste waarden (ca. 60%) op suppleties S7 en S4.



Figuur B2-24. Voorkomfrequentie (semi-kwantitatieve monitoring) van nonnetjes en tapijtschelpen in de referentiegebieden (Ref) rondom de suppleties en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen.

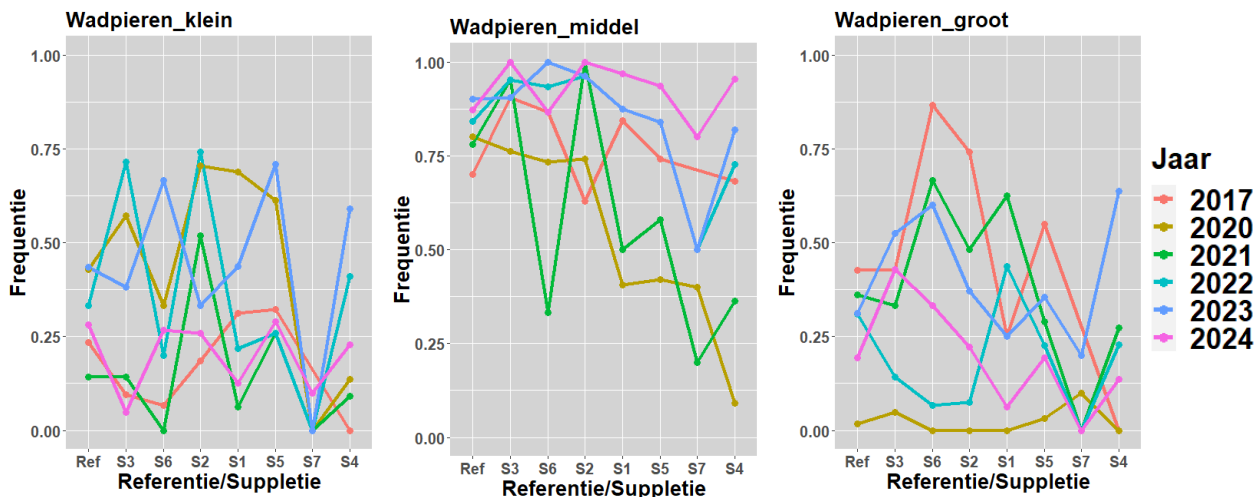
In de referentiegebieden lagen de frequenties van voorkomen van de nonnetjes in 2017 en 2020 rond de 25% en namen toe tot 40% in 2022 en weer af tot 25% in 2024. De frequenties van voorkomen van de nonnetjes lagen net als in de referentiegebieden rond de 25% op suppleties S3, S6 en S1, hoger (ca. 38%) op suppletie S5 en lager (ca. 10%) op suppletie S4. In 2020 (na de aanleg) namen de frequenties van voorkomen van de nonnetjes sterk af op de meeste suppleties, met circa 10% op suppleties S3, S1, S5 tot 0% op suppleties S6, S7 en S4, terwijl in dezelfde periode juist een toename (ca. 10% tot 20%) plaatsvond op suppletie S2. Na 2020 namen de frequenties van voorkomen van de nonnetjes op de suppleties in het algemeen toe en bereikten in 2024 relatief hoge waarden (38% tot 50%) op S2, S1 en S4, waarden rond de 25% op S3, S6 en S5, maar namen weer af op suppletie S7, van 20% in 2023 tot 0% in 2024.

De frequenties van voorkomen van de tapijtschelpen waren in 2017 hoger dan of gelijk aan 25% in alle gebieden, met uitzondering van suppletie S4 (ca. 20%). Na de aanleg namen de frequenties van voorkomen van de tapijtschelpen in 2020 op alle suppleties sterk af tot circa 10% (S3, S6, S2, S1) en tot 0% op de dikke suppleties S5, S7 en S4. Na 2020 namen de frequenties van voorkomen van de tapijtschelpen enigszins toe op de meeste suppleties met in 2024 relatief hogere waarden (ca. 20% tot 25%) op suppleties S3, S2, S1 en S5, rond de 10% op suppleties S6 en S4 en nog steeds 0% op S7.

In de semi-kwantitatieve monitoring is onderscheid gemaakt tussen kleine, middelgrote en grote wadpieren, maar dit onderscheid is gemaakt op basis van grote wadpieroopjes zonder aanvullende informatie over de individuele grootte van die individuen, ook bij navraag aan de verantwoordelijken.

De frequenties van voorkomen van de kleine wadpieren in de referentiegebieden schommelden door de jaren heen tussen de circa 25% in 2017 en 44% in 2020, 13% in 2021, 32% in 2022, weer 44% in 2023 en uiteindelijk 30% in 2024 (Figuur B2-27). Evenals de referentiegebieden werden de minder erosieve suppleties (1, 2, 3, 6) in het algemeen gekenmerkt door relatief hoge frequenties van voorkomen van de kleine wadpieren in de jaren 2020, 2022 en 2023 vergeleken met 2017. Op de meeste suppleties, net als in de referentiegebieden, waren de frequenties van voorkomen van de kleine wadpieren in 2021 relatief laag. Suppletie S7 had nog steeds de laagste voorkomfrequentie van de kleine wadpieren (0% tussen 2020 en 2023).

Tussen 2017 en 2020 namen de frequenties van voorkomen van de middelgrote wadpieren af op de meeste suppleties met uitzondering van S2 (toename van 63% tot 75%), waar de laagste frequentie al was waargenomen in 2017. Tussen 2020 en 2021 namen de frequenties van voorkomen van de middelgrote wadpieren toe op suppleties S3, S2, S1, S5 en S4 en af op suppleties S6 en S7. Tussen 2021 en 2024 namen de frequenties van voorkomen van de middelgrote wadpieren toe op de meeste suppleties, met uitzondering van suppletie S6 waar de frequentie weer afnam tussen 2023 en 2024. In 2024 waren de frequenties van voorkomen van de middelgrote wadpieren relatief hoog (rond de 88%) op de minder erosieve suppleties S3, S6 en S1 en binnen hetzelfde bereik als de referentiegebieden in 2017 op suppleties S2, S5 en S4 (Figuur B2-27).



Figuur B2-25. Voorkomfrequentie (semi-kwantitatieve monitoring) van kleine, middelgrote en grote wadpieren (onderscheid op basis van grote wadpieroepjes) in referentiegebieden (Ref) rondom de suppleties en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen.

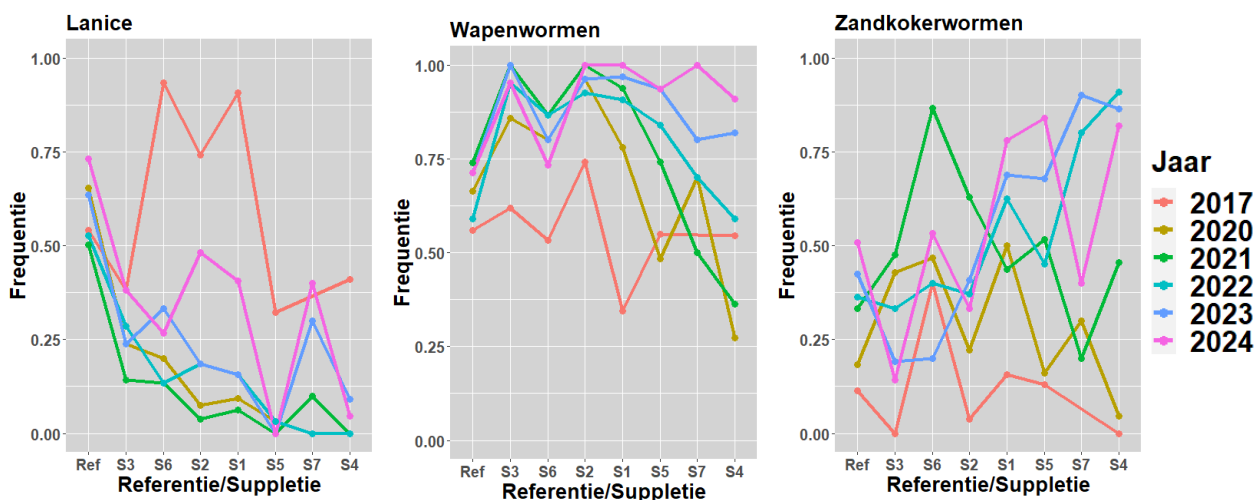
De frequenties van voorkomen van de grote wadpieren waren hoger op de aanleglocaties van suppleties S2 (75%), S6 (88%) en S5 (55%) dan in de omliggende referentiegebieden (44%) in 2017 (Figuur B2-27). In 2017 werden de laagste frequenties van voorkomen van de grote wadpieren gevonden op de suppleties S1 (25%) en S4 (0%).

Tussen 2017 en 2020 (na de aanleg) namen de frequenties van voorkomen van de grote wadpieren drastisch af tot zeer lage waarden op alle suppleties en zelfs op de referentielocaties rondom de suppleties. Tussen 2020 en 2021 namen de frequenties van voorkomen van de grote wadpieren sterk toe op alle locaties tot waarden die niet ver liggen van de waarnemingen van 2017. Op suppletie S7 nam de voorkomfrequentie van de grote wadpieren af van 10% in 2020 tot 0% in 2021, net als in de jaren erna, met uitzondering van 2023. Na uiteenlopende trends op de verschillende suppleties in de jaren na 2021 lieten de frequenties van voorkomen van de grote wadpieren afnemende frequenties van voorkomen zien tussen suppleties S3, S6 en S2. De laagste frequenties van voorkomen van de grote wadpieren in 2024 werden waargenomen op suppleties S1 en S7.

De hoogste frequenties van voorkomen van Lanice (tussen 75% en 90%) zijn waargenomen in 2017 op de aanleglocaties van suppleties S6, S2 en S1, terwijl frequenties van voorkomen van circa 40% zijn waargenomen op de overige aanleglocaties en van 55% in de referentiegebieden (Figuur B2-26). Tussen 2017 en 2020 namen de frequenties van voorkomen op de suppleties sterk af, met waarden die een inverse functie zijn van de aanlegdikte, wat suggereert dat hoge droogvalduurwaarden een negatief effect hebben op deze soort. Tot en met 2022 bleven de frequenties van voorkomen dicht bij de niveaus van 2020 en pas in 2023 namen ze weer significant toe op suppleties S6 en S7 en vooral in 2024 op suppleties S2 en S1. Deze frequenties waren echter wel duidelijk lager dan de niveaus van 2017, vooral op de erosieve suppleties S5 en S4.

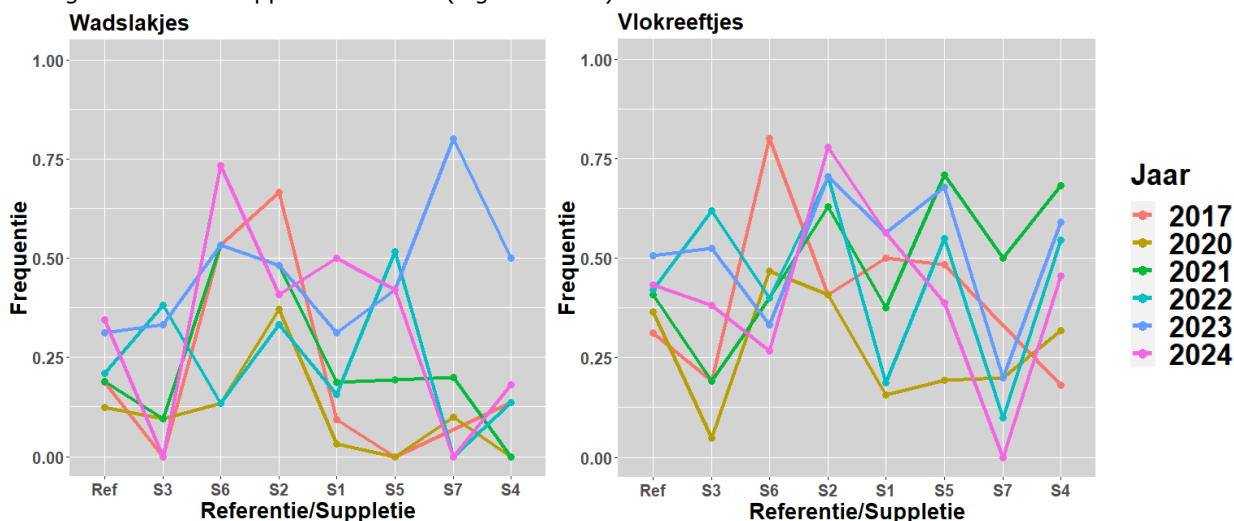
De frequenties van voorkomen van de wapenwormen en zandkokerwormen vertoonden door de jaren heen een bijzondere ontwikkeling op de verschillende locaties vergeleken met de overige taxa. De frequenties van voorkomen van deze twee soorten lagen namelijk in het algemeen lager dan in 2017, dus vóór de aanleg, dan in de jaren erna, met uitzondering van de wapenwormen op de dikste suppleties S5 en S4 (Figuur B2-26).

Na die initiële toename vanaf 2017 bleven de voorkomfrequenties van wapenwormen tot en met 2024 nagenoeg gelijk op de beschutte suppleties (S2, S3, S6) en in mindere mate bij S1, met relatief hoge waarden op S1, S2 en S3 in vergelijking met S6. Bij de meer erosieve suppleties S1, S5, S7 en S4 verliep de toename trager dan bij de beschutte suppleties, maar uiteindelijk waren de frequenties van voorkomen van de wapenwormen op die locaties in 2024 net zo hoog als op suppleties S3 en S2.



Figuur B2-26. Voorkomfrequentie (semi-kwantitatieve monitoring) van Lanice, wapenwormen en zandkokerwormen in referentiegebieden (Ref) rondom de suppleties en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen.

Net als bij de wapenwormen bleven de frequenties van voorkomen van de zandkokerwormen op de meeste locaties toenemen na 2020. De trends liepen door de jaren heen echter uiteen tussen de verschillende suppleties, wat blijkt uit de toename op suppletie S6 tussen 2020 (45%) en 2021 (88%) en de afname op suppletie S7 tussen 2023 (89%) en 2024 (40%). Door de ogenhaar kijkend blijken de frequenties van voorkomen van de zandkokerwormen tussen 2022 en 2024 sterker toe te nemen naarmate ook de aanlegdikte van de suppleties toenam (Figuur B2-26).



Figuur B2-27. Voorkomfrequentie (semi-kwantitatieve monitoring) van wadslakjes en vlokreeftjes in referentiegebieden (Ref) rondom de suppleties en op de suppleties, gerangschikt op toenemende aanlegdikte door de jaren heen.

De frequenties van voorkomen van de wadslakjes werden in 2017 gekenmerkt door relatief hoge waarden op de aanleglocaties van suppleties S6 en S2 (50% tot 75%), terwijl die frequenties onder de 25% lagen in de referentiegebieden en rond de 10% op suppleties S1 en S4 en op 0% op suppleties S3 en S5. De aanleg van de suppleties zorgde voor een afname op de meeste suppleties en ook in de omliggende referentiegebieden. In de jaren erna namen de frequenties van voorkomen van de wadslakjes weliswaar toe op de meeste locaties, maar wel op uiteenlopende manieren. Zo was er een sterke toename op suppleties S7 en S4 met waarden van respectievelijk 80% en 50%, gevolgd door een drastische afname tot 0% op S7 en 15% op S4 tussen 2023 en 2024. In 2024 leek de verdeling van de frequenties van voorkomen van de wadslakjes over de locaties in 2024 enigszins op de situatie van 2017, maar dan met hogere waarden op suppleties S1 en S5, maar nog steeds lage waarden voor S3 en S4.

De frequenties van voorkomen van de vlokreeftjes vertoonden tussen 2017 en 2020 (na de aanleg) een afname op de meeste suppleties. In de jaren erna en in ieder geval tot 2023 namen de frequenties van voorkomen respectievelijk toe op suppleties S3, S2, S1 en S5 en af op suppleties S6 en S7.

Bijlage 3 De ontwikkeling van benthos-etende vogels op de Roggenplaat en de suppleties

Bijlage 3	De ontwikkeling van benthos-etende vogels op de Roggenplaat en de suppleties	193
B3.1	Opbouw hoofdstuk	192
B3.2	Methodologie	192
B3.3	Evaluatievraag 1	200
B3.3.1	Kennisvraag 1. Verklarende variabelen in de verspreiding van vogels	215
B3.3.2	Kennisvraag 2: benutten van suppleties door vogels	228

B3.1 Opbouw hoofdstuk

In dit hoofdstuk worden de resultaten getoond van de ontwikkeling in aantallen en soortensamenstelling van (met name) steltlopers op de Roggenplaat door middel van laagwatertellingen die zijn uitgevoerd sinds 2015 tot en met januari 2025. Dit hoofdstuk is gestructureerd aan de hand van de onderzoeksvragen die hieronder zijn opgesomd. Deze vragen komen overeen (herformuleringen daargelaten) met de vragen uit het oorspronkelijke monitoringsplan (Ysebaert et al., 2016).

Evaluatievragen:

1. Hoe wordt de Roggenplaat gebruikt door benthos-etende vogels in ruimte en tijd? Welke soorten komen voor en in welke aantallen?

Onderliggende kennisvragen:

1. Is de verspreiding van benthos-etende vogels gerelateerd aan factoren zoals droogvalduur, sedimentsamenstelling (vochtgehalte) en voedselbeschikbaarheid?
2. Hoe worden de suppleties benut door benthos-etende vogels in vergelijking tot niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat?

B3.2 Methodologie

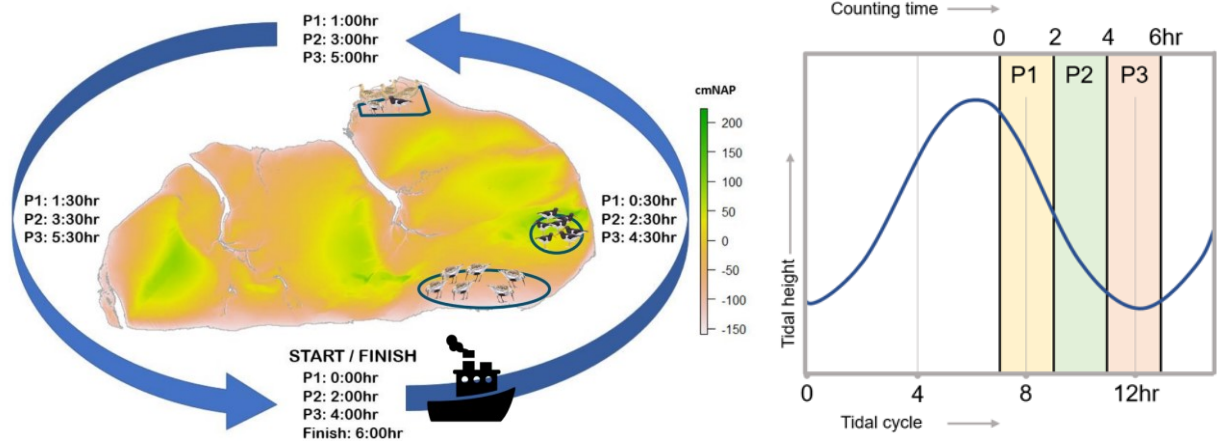
Het uiteindelijke doel van de zandsuppleties van de Roggenplaat is de instandhouding van de huidige foerageerfunctie van het Roggenplaat/Neeltje Jans-complex voor de komende 25 jaar. Specifiek gaat het om de soorten steenloper (*Arenaria interpres*), bonte strandloper (*Calidris alpina*), kanoet (*Calidris canutus*), strandplevier (*Charadrius alexandrinus*), bontbekplevier (*Charadrius hiaticula*), scholekster (*Haematopus ostralegus*), rosse grutto (*Limosa lapponica*), wulp (*Numenius arquata*), zilverplevier (*Pluvialis squatarola*), kluut (*Recurvirostra avosetta*), bergeend (*Tadorna tadorna*), zwarte ruiter (*Tringa erythropus*), groenpootruiter (*Tringa nebularia*) en tureluur (*Tringa totanus*). Om de ontwikkelingen in aantallen, soortensamenstelling en ruimtelijk gebruik van deze en andere benthos-etende soorten in kaart te brengen zijn laagwatertellingen uitgevoerd over de jaren.

Methodie tellingen

Tellingen zijn uitgevoerd bij afgaand water door ervaren vogeltellers van Deltamilieu Projecten (Arts et al., 2017) vanaf een boot die voldoende hoogte had zodat ook tijdens laagwater de vogels midden op de plaat geteld konden worden (Figuur B3-1). De boot voer in twee uur tijd rond de Roggenplaat (tegen de klok in). Van hoog naar laag water konden op die manier drie tellingen worden uitgevoerd; telmomenten. Telmomenten gebeurden 0-2 uur na hoog water, 2-4 na hoog water, en rond de laagwaterperiode (4-6 uur na hoog water). Vogels werden vanaf de boot op het zichtbare deel van de plaat geteld door twee tellers. Vogels konden met een telescoop bij gunstige weersomstandigheden tot midden op de plaat worden geteld.

Planning van tellingen

De tellingen zijn uitgevoerd in de maanden januari, februari, maart, mei, augustus, oktober, november en december en vonden plaats tussen 2015 en januari 2025 (Arts et al., 2017; Van der Werf et al., 2016b; Walles et al., 2021b). Het was niet mogelijk om in alle maanden te tellen gedurende alle jaren. In een aantal jaren zijn teldagen uitgevallen door bijvoorbeeld slechte weersomstandigheden. Omdat er in 2015 en 2016 onregelmatiger geteld is en de meeuwensoorten hier niet zijn meegenomen, zijn die tellingen niet gebruikt in onderstaande figuren. Wel zijn deze data gebruikt in de analyse naar de ruimtelijke verspreiding. Ook zijn deze tellingen gebruikt in eerdere verslaglegging (Walles et al., 2021a, 2021b). In 2021 is éénmaal een telling uitgevoerd in juni. Omdat de aantallen vogels in die maand veel lager zijn dan in andere maanden, is deze telling in sommige figuren en analyses ook weggelaten. Voor de figuren die het totaal aantal vogels tonen, zijn benthos-etende vogels (alle getelde steltlopers en de bergeend) en meeuwen geselecteerd.



Figuur B3-1. Visualisatie van de uitvoering van de laagwatertellingen op de Roggenplaat. Links: De boot vaart driemaal tegen de klok in om de Roggenplaat, elk rondje duurt ongeveer 2 uur. Getelde vogels worden ingetekend in polygoon. Rechts: tellingen vinden plaats van hoog naar laagwater.

Ruimtelijke verspreiding

De ruimtelijke verspreiding van vogels is in kaart gebracht door groepen in te tekenen als polygoon op een kaart. Per polygoon werd de soort, het aantal vogels van de soort en het gedrag genoteerd. Tijdens de teldagen werden alle steltlopers, bergeend en rotgans tot op soort geteld en de verspreiding in kaart gebracht. Er werd onderscheid gemaakt tussen foeragerende en niet foeragerende vogels, met name als het ging om grote groepen rustende vogels. Daarnaast werden waar mogelijk en relevant vliegbewegingen genoteerd. Per teldag is een dagverslag gemaakt voor het vastleggen van de telomstandigheden. De aantallen per polygoon zijn vervolgens omgezet naar dichtheden per hectare per telmoment (zie voor uitgebreide methodiek: Walles et al., 2021a, 2021b).

Foerageeruren

De foerageeruren per hectare zijn berekend door het aantal foeragerende vogels per hectare te vermenigvuldigen met 2 uur foerageren (de tijd van een telmoment) en deze vervolgens per teldag bij elkaar op te tellen (cumulatief). De foerageertijd geeft dan het aantal uren aan foeragerende vogels per 6 tot 0 uur voor laagwater per hectare. Op deze manier kunnen alle drie de tellingen tegelijkertijd mee worden genomen in analyses en figuren en wordt ook meegenomen als een bepaalde vogelsoort meer in het begin van het getij of juist later in het getij foerageert.

Analyse relatie verspreiding van foeragerende vogels en omgevingsfactoren

Vogelsoorten en voedselgroepen

De berekeningen en statistiek zijn uitgevoerd voor alle steltlopers + bergeend samen; in deze analyse zijn meeuwen niet meegenomen, omdat meeuwen voor 2016 nog niet goed geteld werden. Ook is specifiek gekeken naar de meest voorkomende natura2000 soorten; bonte strandloper, kanoet, scholekster, rosse grutto, wulp en zilverplevier. Daarnaast hebben we ook een analyse uitgevoerd waarbij de ruiters gegroepeerd hebben (tureluur, zwarte ruiters, groenpootruiter). Voor de statistische analyse zijn telkens enkel de foeragerende vogels gebruikt.

Responsvariabele en verklarende variabelen gebruikt in de analyse

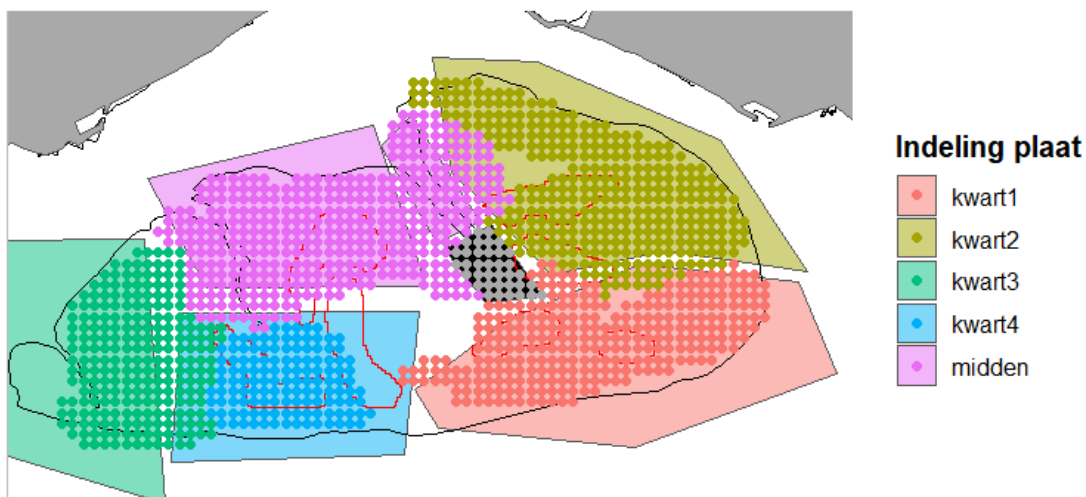
Als responsevariabele is zowel foerageertijd in uren per hectare als dichtheden per hectare gebruikt. Bij de laatste responsvariabele is het telmoment ook meegenomen. Voor deze analyse is het gemiddelde berekend van de tellingen van het najaar en de winter (september-februari), zodat deze konden worden gecombineerd met andere variabelen zoals bodemdieren, die in het najaar zijn bemonsterd. Er is hierbij aangenomen dat de bodemdieren in het najaar een indicatie zijn van de voedselsituatie gedurende de gehele winter. Als verklarende variabelen zijn factoren gebruikt waarvan in de literatuur bekend is dat zij verspreiding van vogels kunnen verklaren. Ten eerste is de dichtheid aan bodemdieren gebruikt; de reden waarom getijdenvogels naar de Roggenplaat trekken, waarbij in de modellen voor specifieke soorten rekening werd gehouden met hun dieet voor zover bekend. Zo is voor kanoeten enkel de dichtheden kleine (<10 mm) schelpdieren gebruikt, voor scholeksters de grotere schelpdieren (>10m m), voor de rosse grutto en wulp de

dichtheid aan wormen en voor de zilverplevier en bonte strandloper zowel de dichtheid aan wormen als ook de dichtheid aan slakjes en vlokreeftjes.

De bodemhelling (berekend door Deltares adhv de LiDAR data) was ook een verklarende variabele in het model, waarbij er vanuit werd gegaan dat vogels een flauwe bodemhelling prefereerden zodat zij mee kunnen lopen met het terugtrekkende water (Vanoverbeke and van Ryckegem, 2015). Ook werd korrelgrootte gebruikt in het model, bemonsterd door WMR. De preferentie tussen soorten verschilt; sommige soorten prefereren een bodem met een fijnere korrel (slik) terwijl andere soorten een meer zandige bodem prefereren.

De droogvalduur werd berekend door de jaarlijkse hoogtekaarten te gebruiken die weer zijn omgerekend naar een percentage droogvalduur (%) (van Donk, 2022). De gebruikte hoogtekaarten waren niet op alle plekken waar vogels geteld zijn dekkend. De aantallen aan de randen van de plaat zonder hoogtemeting zijn daarom verwijderd. Ook zijn binnen de analyse 24 punten met een droogvalduur boven de 80% verwijderd. Tevens is er ook een andere maat voor droogval gebruikt; een aantal steltlopers loopt namelijk mee met de terugtrekkende waterlijn waardoor we verwachten dat sommige soorten gedurende de tijd met de waterlijn meelopen. Als maat voor droogval is het verschil in meters tussen de waterlijn op het moment van tellen en de Roggenplaat genomen. Hiervoor is de waterstand bij Roompot binnen gedownload (waterinfo.rws.nl) en werd de hoogteligging van de Roggenplaat gebruikt (Lidar) om te berekenen welk deel wanneer droogstaat. Wanneer een bepaalde plek op de Roggenplaat op het moment van tellen lang droogligt, is er een groot verschil tussen de waterlijn en de plaat. Wanneer deze plek op de plaat kort droogligt is er een klein verschil tussen de waterlijn en de plaat. Een negatief verschil betekent dat de plaat op die plek nog (net niet) droogligt. Bij deze methode kwam wel een moeilijkheid naar boven die ervoor zorgt dat de maat van droogval niet heel precies bepaalt kon worden, maar met een marge van 15-30 minuten: er is namelijk niet genoteerd hoelaat vogels zijn geteld, enkel of zij in de eerste, tweede of derde telronde op een teldag zijn geteld. Hierbij hebben wij de hulp ingeschakeld van de medewerkers van Delta Milieuprojecten, die inzicht gaven in de tijdsplanning en gewoontes binnen een telronde. Hierbij konden we een inschatting maken hoelaat een bepaald deel van de plaat ongeveer geteld wordt, waarbij de plaat in ongeveer 5 delen werd opgedeeld (Figuur B3-2). De eerder getelde en ingetekende shapefiles werden hierbij toegekend aan het deel waarbij die shapefile het meest mee overlapte of het dichtsbij lag. Echter, kon hierbij niet ingeschat worden hoelaat plekken waar geen vogels werden waargenomen werden geteld. Hierdoor vallen de nullen in deze analyse weg.

Tenslotte namen we ook het jaar van de herfst/winter van de metingen mee omdat condities per jaar kunnen verschillen. De verklarende factoren waren vaak niet normaal verdeeld, wat statistieke processen bemoeilijkt. Sommige variabelen werden hierop getransformeerd; de vierdemachtswortel is gebruikt voor de dichtheid in bodemdieren, het logaritme is gebruikt voor de bodemhelling in m/m. Er waren niet voor alle variabelen kaartdekkende datasets beschikbaar. Om dit te bereiken is 'inverse distance weighting' gebruikt om de ontbrekende waardes bij te schatten, op hetzelfde raster als is gebruikt voor de vogel-analyse. Deze methode is toegepast voor de korrelgrootte waarbij onderscheid is gemaakt tussen suppleties en niet gesuppleerde delen, en ook voor de dichtheid aan bodemdieren. Vervolgens zijn deze waardes aan elkaar gekoppeld.



Figuur B3-2. Visualisatie van de methode die gebruikt is om een schatting te maken wanneer bepaalde delen van de plaat zijn geteld. 'midden' werd geteld ongeveer 1 uur na het begin van de telling. 'kwart1', 'kwart2', 'kwart3', en 'kwart4' respectievelijk 15, 45, 75 en 105 minuten na het begin van de telling. Shapefiles werden toegekend aan het dichtstbijzijnde deel of waarbij shapefile het meest mee overlapte. De zwarte rechthoek in bovenstaande figuur is een plek die door de medewerkers van DMP niet goed geobserveerd kon worden door de lage ligging. De vogelaantallen die in dat gebied vallen zijn niet meegenomen in de analyse.

Statistische methode

Om meer inzichten te krijgen in de variabelen die belangrijk zijn voor de verspreiding van vogels op intergetijdengebied is een statistische analyse uitgevoerd met een generalized additive model met een negatief binominale verdeling (R Core Team, 2024b; Wood, 2017). Dit statistisch model kan goed omgaan met teldata waarbij vaak veel nullen of lage aantallen in de data zitten en een lange 'staart' met hogere aantallen. Daarnaast is dit een gebruikelijk model voor non-lineaire relaties, die in een studie als deze te verwachten zijn. Als voorbeeld; de verwachting is dat vogels met name te vinden zijn op plekken met niet té grove zandkorrels maar ook weer niet te fijn. Het aantal knopen (de hoeveelheid 'bochten' die een niet lineaire curve kan maken) is beperkt tot maximaal 6. Dit is gedaan om de tijd die nodig is om een model te runnen te beperken, en daarnaast omdat er biologisch gezien geen reden was om een 'eindeloze' hoeveelheid curves te verwachten. De correlatiecoëfficiënt (r) tussen covariabelen is gecheckt en een correlatie groter dan 0.6 werd vermeden. Dit betekent dat droogvalduur en afstand tot de waterlijn bijvoorbeeld niet in 1 model gebruikt konden worden.

Voor elke groep vogels of soort zijn er 4 modellen gefit; twee modellen waarbij de responsvariabele de foerageertijd in uren was, en eentje waarbij de responsvariabele foerageerdichtheid was (*Tabel B3-1*). In elk model zat de dichtheid aan bodemdieren en droogvalduur óf de afstand tot de waterlijn in het model. Droogvalduur en de afstand tot de waterlijn konden niet beiden in hetzelfde model omdat ze te sterk aan elkaar gerelateerd zijn. Verder zaten ook sediment en bodemhelling in het model, beiden ook als niet lineaire relatie. De beschrijving van de resultaten zijn op de uitkomsten van het model 1 gefocust, om de hoeveelheid informatie te beperken (*Tabel B3-1*). In dit model werd de foerageertijd gebruikt als responsvariabele en de voorspelde droogvalduur (plus de andere beschreven verklarende variabelen). De keuze om te focussen op dit model is omdat er in dit model ook de nulwaardes van vogelaantallen konden worden meenemen in de analyse, terwijl dit niet mogelijk was in het model met de waterlijn als variabele (zie beschrijving hierboven). Daarnaast is het percentage aan areaal met droogvalduur tussen 50-80% een doel binnen dit project en daarom van groter belang. Hiernaast worden de relaties met de variabelen die niet in model 1 zaten gepresenteerd.

Voor het visualiseren van de invloed van verklarende factoren op de responsvariabele is gebruik gemaakt van de uitkomsten van de modellen. In de gegenereerde grafieken is telkens één verklarende variabele gevarieerd, terwijl de overige variabelen op een vaste (referentie)waarde zijn gehouden. Hierdoor wordt geïsoleerd zichtbaar hoe elke afzonderlijke factor de responsvariabele (dichtheid of foerageertijd vogels) beïnvloedt, binnen de context van het model.

Tabel B3-1.-Opbouw van gebruikte statistische modellen. Als responsvariabele werd de foerageertijd of dichtheid gebruikt van de verschillende groepen of soorten vogels. Voor elke verklarende variabele werd een smoother met 6 knopen gebruikt, omdat er een niet-lineaire relatie te verwachten was. In elk model werd ook het jaar van de winter als factor meegenomen en is de niet-lineaire relatie van de dichtheid aan bodemdieren gevarieerd per seizoen en de dichtheid aan bodemdieren, droogvalduur en waterlijn gevarieerd per telmoment (afhankelijk van het model).

	Respons-variabele	Verklarende variabelen			
Model 1	Foerageertijd in uren per hectare	Dichtheid bodemdieren per winter	Droogvalduur	Sediment	Bodemhelling
Model 2	Foerageertijd in uren per hectare	Dichtheid bodemdieren per winter	Waterlijn	Sediment	Bodemhelling

Model 3	Dichtheid per hectare per telmoment	Dichtheid bodemdieren	Droogvalduur per telmoment	Sediment	Bodemhelling
Model 4	Dichtheid per hectare per telmoment	Dichtheid bodemdieren	Waterlijn per telmoment	Sediment	Bodemhelling

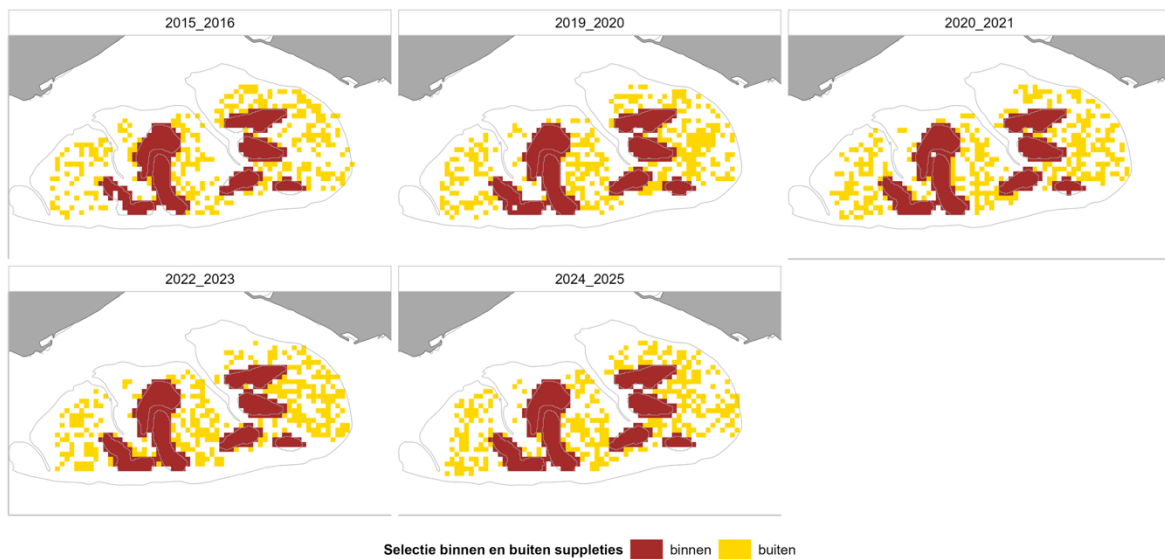
Analyse effect van zandsuppleties

Om te analyseren of de suppleties een effect hebben op de foerageeruren, kunnen de plekken van de suppleties vergeleken worden met voor de suppleties (de winter van 2015-2016) of met andere plekken op de Roggenplaat. Om een vergelijking te maken met de situatie op en naast de suppleties, is een selectie gemaakt van plekken op de Roggenplaat met een vergelijkbare droogvalduur. De gesuppleerde delen liggen vooral in een droogvalduurklasse tussen de 40-60% droogvalduur, en vooral tussen de 50-60% droogvalduur nadat de suppleties zijn uitgevoerd. Om een zo goed mogelijke vergelijking te maken, is daarom een selectie gemaakt van zowel op als naast de suppletie van datapunten tussen de 40-70% droogvalduur. Vervolgens zijn uit de dataset zonder de suppleties datapunten genomen met een zo vergelijkbaar mogelijke droogvalduur en standaarddeviatie in droogvalduur. Dit lukt maar ten dele, omdat de suppleties nou eenmaal hoger liggen. Per winter is de volgende selectie gemaakt met evenveel datapunten als op de suppleties (*Tabel B3-2*). In

Figuur B3-3 is getoond welke gebieden gebruikt worden in deze analyse. Vervolgens zijn er twee modellen getest. Deze modellen zijn hetzelfde als model 1 in de tabel hierboven, met uitzondering dat de droogvalduur buiten beschouwing is gelaten, omdat er maar een kleine range aan droogvalduren is gebruikt. Daarnaast is de variabele binnen of buiten meegenomen in de analyse als variabele. In het model werd ook een interactie van het jaar van de winter met op of buiten de suppletie als factor meegenomen. Daarnaast werd de niet-lineaire relatie van de dichtheid aan bodemdieren gevarieerd per winter en op of buiten de suppletie, en werd de niet-lineaire relatie van korrelgrootte en bodemhelling gevarieerd per winter. Tenslotte is hetzelfde model, maar dan met de verschillende suppleties apart.

Tabel B3-2.-Verschillen in droogvalduurpercentages tussen de selectie van de dataset op en buiten de suppleties en de standaarddeviatie.

WINTER	DATASET OP SUPPLETIES GEMIDDELDE + SD	DATASET BUITEN SUPPLETIES GEMIDDELDE + SD
2015-2016 (VOOR SUPPLETIE)	48.2 ± 4.4	52.5 ± 7.6
2019-2020	55.5±5.9	54.3±7.2
2020-2021	54.8±5.4	54.3±7.3
2022-2023	54.4±5.2	54.2±7.0
2024-2025	54.4±5.2	54.1±6.9



Figuur B3-3. Overzicht van de selectie binnen en buiten de suppleties met vergelijkbare droogvalduur.

B3.3 Evaluatievraag 1

Evaluatievraag steltlopers 1

Hoe wordt de Roggenplaat gebruikt door benthos-etende vogels in ruimte en tijd? Welke soorten komen voor en in welke aantallen?

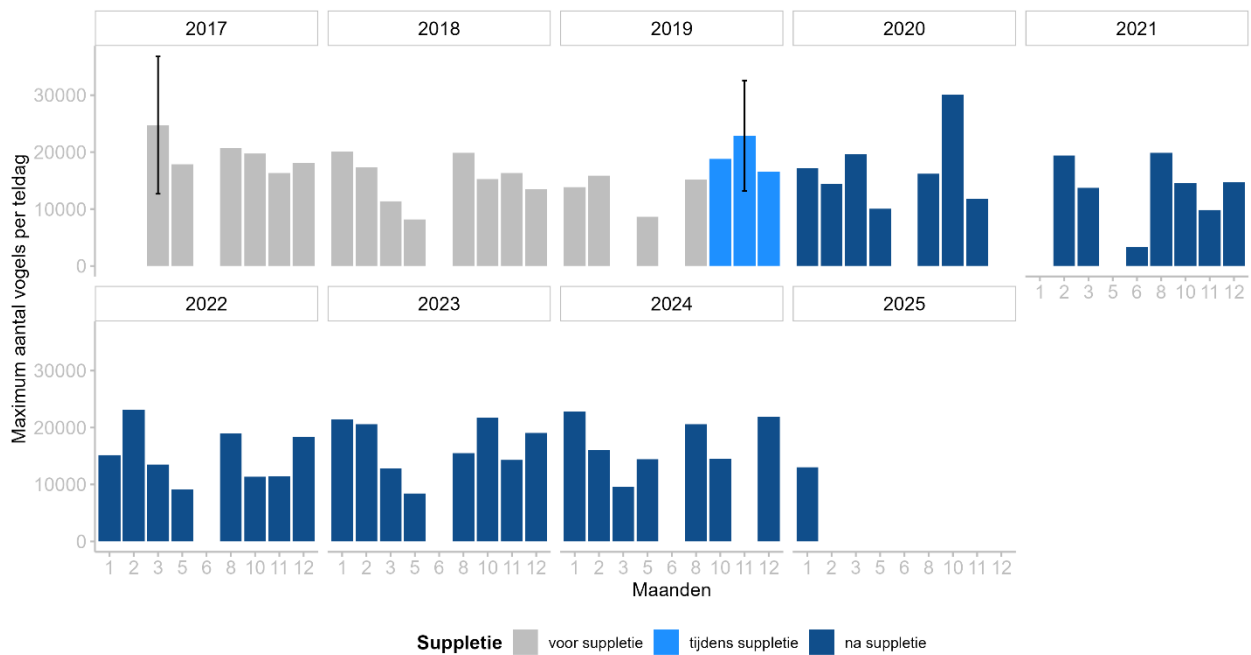
Samenvattende beantwoording:

De Roggenplaat wordt met laagwater bezocht door gemiddeld per teldag rond de 20.000 steltlopers, bergeenden en meeuwen. Hiernaast foerageren ook een aantal andere vogelsoorten op de Roggenplaat zoals rotganzen (met name op wieren) en visetende vogels zoals lepelaars en reigers. De vogels zijn tijdens droogval op de Roggenplaat geteld tussen 2015 en 2024 plus nog 1 maand in 2025 in maximaal acht maanden per jaar. Tellingen vonden plaat vanaf een boot die tijdens de eb-fase iedere twee uur om de Roggenplaat heenvoer. Hierdoor konden de vogels tijdens droogval driemaal worden geteld tussen 6 en 0 uur voor laagwater. De resultaten laten zien dat de aantallen behoorlijk kunnen schommelen per telling en dat de soort samenstelling verschilt over het jaar. De zomer (augustus) wordt ieder jaar gekenmerkt door een grote groep kokmeeuwen (6000-9000 individuen) die in de andere maanden bijna afwezig zijn en lage aantallen van de anders frequente bonte strandloper. De scholekster (~5000 individuen) en wulp (~4000 individuen) hebben beiden hun piek in de periode augustus tot en met oktober. De wintermaanden november tot en met januari komen vrij sterk overeen qua soort samenstelling. In deze maanden is de bonte strandloper de meest voorkomende soort (5000-9000 individuen). Het broedseizoen (mei) wordt gekenmerkt door vooral grote aantallen rosse grutto's (~2000 individuen) en zilverplevieren (~2000 individuen). De totale aantallen steltlopers op de Roggenplaat zijn niet significant veranderd na aanleg van de suppleties. Wat wel opvalt is dat drie soorten significant lagere aantallen laten zien in het laatste teljaar ('24-'25); de kanoetstrandloper, bontbekplevier en bergeend. Van deze soorten behalen de kanoetstrandloper en de bergeend hun instandhoudingsdoelen niet in de Oosterschelde (Hoekstein et al. 2024). Voor de kanoet en bontbekplevier spelen mogelijk (ook) externe factoren. De trend voor de kanoet is negatief in de gehele Oosterschelde en de aantallen van de bontbekplevier variëren sterk per jaar, omdat ze gepiekt doortrekken in voor- en najaar waardoor pieken in aantallen ook gemist kunnen worden.

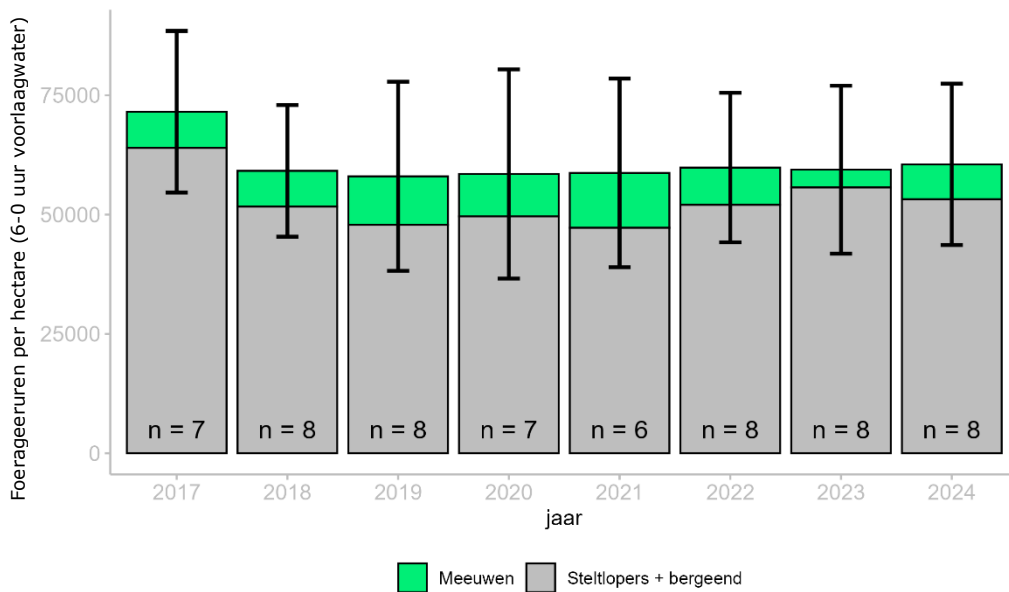
Niet elk deel van de Roggenplaat wordt evenveel gebruikt. De vogels verspreiden zich met het terugtrekkende water steeds verder over de Roggenplaat. Hierbij werden voor de suppleties met name het oostelijk deel gebruikt maar er waren ook hotspots in het noorden en zuiden van de plaat. In tegenstelling tot de totale aantallen vogels en de soort samenstelling is de ruimtelijke verspreiding wel erg veranderd nadat de zandsuppleties zijn uitgevoerd. De suppleties worden direct na aanleg veel minder gebruikt door benthos-etende vogelsoorten. Sommige suppleties worden vanaf 2022 met name gebruikt vroeg in de eb-fase (6-4 uur voor laagwater), terwijl deze gebieden in de jaren ervoor veel minder gebruikt werden als foerageerhabitat. De hogere ligging (en daardoor langere droogvalduur) en het herstel van bodemdieren maakt deze suppleties mogelijk interessant op het moment dat een groot deel van de Roggenplaat nog onderwater ligt. Verder valt op dat de suppleties 4-2 uur voor laagwater vanaf '22-'23 meer gebruikt worden dan in de eerste 2 jaar na de suppleties. Het gebruik van de suppleties door foeragerende vogels tijdens laagwaterperiode (2-0 uur voor laagwater) is nog steeds afwijkend van het beeld vóór aanleg van de suppleties. Ondanks de positieve ontwikkeling van bodemdieren op deze plekken kunnen andere variabelen een rol spelen. Zo liggen de suppleties hoger dan voorheen. Vogels lopen vaak (deels) met de waterlijn mee, en zijn met laagwater daarom meer op de lagere delen van de plaat te vinden. Echter, kunnen de suppleties door hun relatief grovere sedimentsamenstelling mogelijk ook eerder uitdrogen, wat het minder geschikt maakt als foerageergebied.

Het aantal steltlopers en de soortsaamenstelling op de Roggenplaat fluctueert over de teldagen en maanden. Er lijkt geen duidelijk verband met de aanleg van de suppleties. Het ruimtelijk gebruik van de Roggenplaat door vogels is wel duidelijk veranderd na de aanleg van de suppleties. Vogels vermeden de suppleties vlak na aanleg. In 2022 lijken vogels langzaam terug te keren op de suppleties, al dan niet op een ander (eerder) moment gedurende het getij. Hieronder zullen deze resultaten in meer detail worden toegelicht. Het aantal benthos-etende vogels dat foerageert op de Roggenplaat fluctueert behoorlijk per teldag, maar lijkt niet opvallend te zijn veranderd over de tijd of na aanleg van de suppleties (Figuur B3-4). Ook de foerageertijd in uren lijkt niet veranderd te zijn over de tijd (Figuur B3-5). In een lineair model met log getransformeerde foerageeruren, werd getest of er een significant verschil was in foerageertijd van steltlopers tussen de jaren waarbij we ook maand meenamen in de analyse. Dit model was significant ($F(16, 48) = 8.85, p < 0.001$) en verklaarde een groot deel van de variantie in foerageertijd ($R^2 = 0.75$, aangepaste $R^2 = 0.66$). Alleen het jaar 2017 vertoonde een significant hogere foerageertijd dan het referentiejaar 2016, maar in een posthoc test (Tukey) waren er geen significante verschillen in foerageertijd tussen jaren. Maanden weken significant af van de referentiemaand januari. In mei en augustus was de foerageertijd in uren significant lager dan in januari en de sterkste afname was in juni. De andere maanden verschilden niet significant van januari.

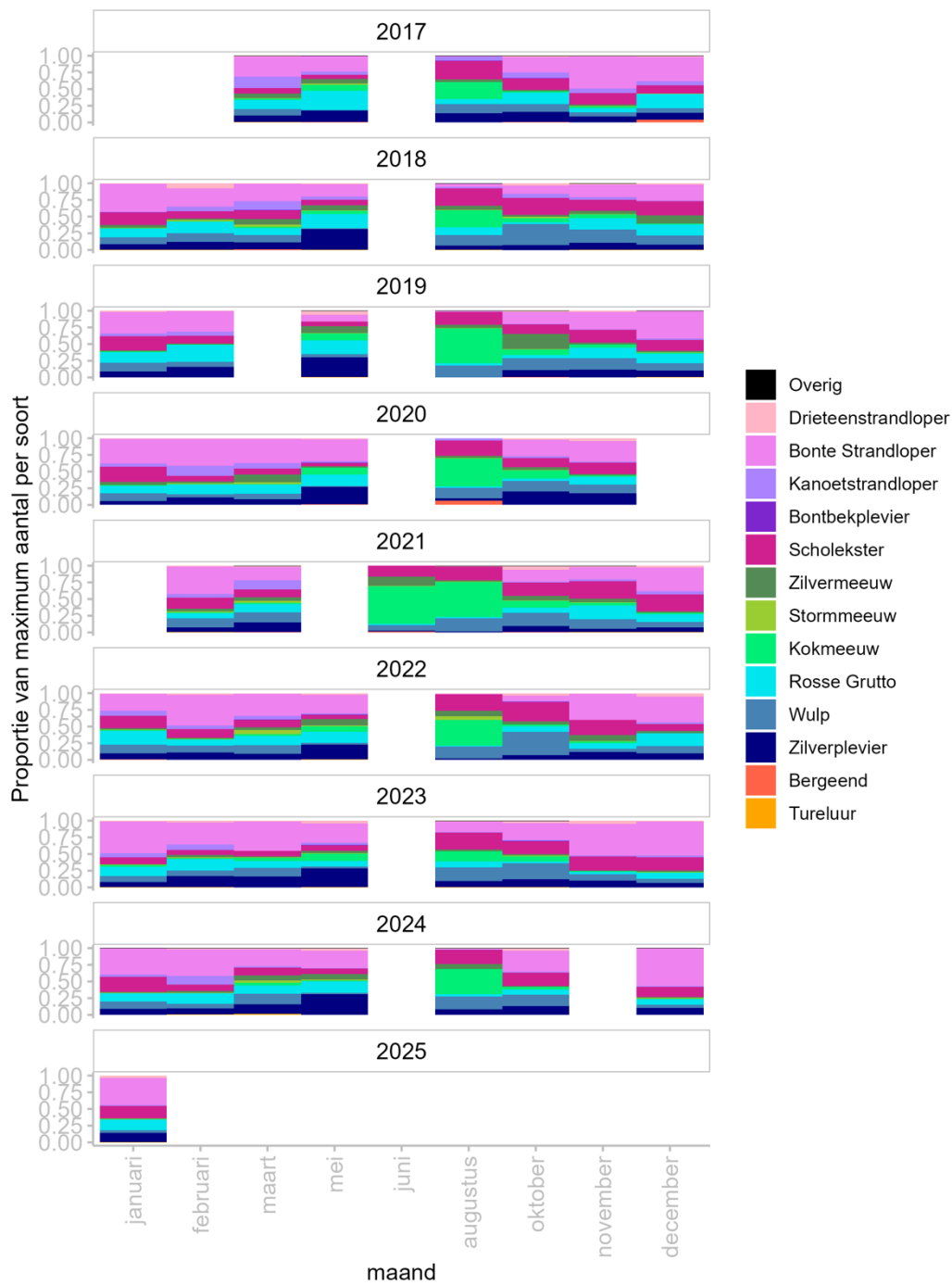
Soortsaamenstelling van de vogels op de Roggenplaat fluctueert afhankelijk van het seizoen, maar lijkt vrij stabiel over de jaren (Figuur B3-6). De zomer (augustus) wordt steevast gekenmerkt door een grote groep kokmeeuwen die in de andere maanden bijna afwezig zijn en lage aantallen van de anders frequent voorkomende bonte strandloper. De scholekster en wulp hebben beiden hun piek in augustus en oktober. De wintermaanden november tot en met januari komen vrij sterk overeen qua soortsaamenstelling. In deze maanden is de bonte strandloper de meest frequente soort. Het broedseizoen (mei) wordt gekenmerkt door vooral grote aantallen van rosse grutto's en zilverplevieren. Over het algemeen lijkt de soortsaamenstelling van de vogels op de Roggenplaat niet substantieel te zijn veranderd na de aanleg van de suppleties.



Figuur B3-4. Maximumaantal vogels uit de drie telrondes per teldag over de jaren 2017-2025. In kleur is aangegeven welke metingen voor, tijdens en na de suppleties hebben plaatsgevonden. In maart 2017 en november 2019 is er tweemaal geteld en is het gemiddelde en standaarddeviatie weergegeven.



Figuur B3-5. Foerageeruren per hectare (6-0 uur voor laagwater) per dag gemiddeld over het jaar met weergave van de standaarddeviatie. Binnen elke bar staat het aantal teldagen (n) dat is gebruikt om het gemiddelde te berekenen. In 2021 is als enige jaar ook een telling uitgevoerd in juni. Omdat aantallen fors lager lagen in deze maand is deze weggelaten in het berekenen van het gemiddelde. In 2025 is alleen maar 1 telling uitgevoerd (januari). Deze telling is meegenomen in 2024. In deze barplot is onderscheid gemaakt tussen steltlopers + bergeend en meeuwensoorten.



Figuur B3-6. Relatieve proportie van de 13 meest voorkomende benthos-etende soorten per maand en jaar. Soorten die minder vaak voorkwamen zijn gegroepeerd in "Overig".

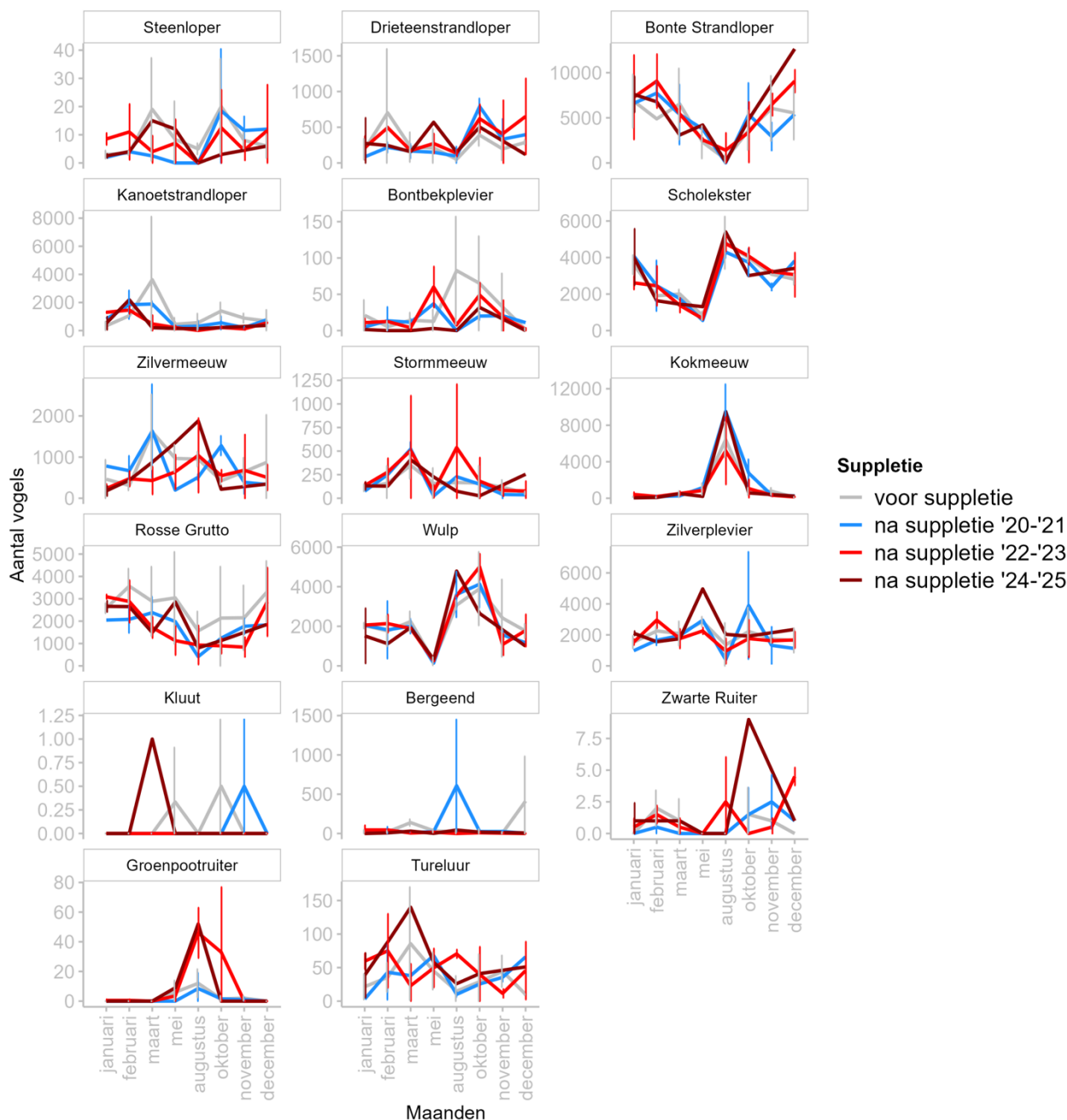
In een model is getest of de aantallen getelde vogels een seizoenspatroon vertonen en of de aantallen na de suppleties zijn veranderd. In dit model met een generalised additive model (GAM) met een negatieve binomiale verdeling zijn de maximale aantallen per teldag geanalyseerd per soort, met jaar als categorische variabele en een niet-lineair effect van maand via een smooth-term (Tabel B3-3). Soorten verschillen in de mate van voorspelbaarheid in hun seizoenspatroon (Figuur B3-7).

Het seizoenspatroon van bijvoorbeeld de bonte strandloper en kokmeeuw is erg duidelijk en omgekeerd aan elkaar en beiden (bijna) significant, terwijl het seizoenspatroon van bijvoorbeeld de zilvermeeuw en de zilverplevier wat meer variatie vertoont en hierom niet significant is in het model. Naast de bontes strandloper en kokmeeuw, hebben ook de kanoetstrandloper en groenpootruiter een significant seizoenseffect. De bontbekplevier en zwarte ruiter hebben net geen significant seizoenspatroon (Tabel B3-3). Voor de soorten die enkel in heel lage aantallen voorkomen op de Roggenplaat, zoals de kluut en bergeend, is een seizoenspatroon lastig te vinden puur vanwege de kleine kans dat je de soort ziet.

Wat betreft de patronen voor en na de suppletie, lijkt het seizoenspatroon er nog min of meer hetzelfde uit te zien als voor de aanleg van de suppleties, alhoewel er wat afwijkingen zijn. De steenloper lijkt in de eerste jaren na de suppletie in wat lagere aantallen in het voorjaar geteld te zijn, dit lijkt te zijn bijgetrokken in het laatste teljaar, alhoewel er dan relatief lage aantallen geteld zijn in het najaar. De kanoetstrandloper lijkt, ten opzichte van voor de suppletie, iets eerder te pieken en aantallen lijken voor de rest van de maanden iets lager te blijven, met name in de herfst. Aantallen van de bontbekplevier leken voor de suppletie gemiddeld hoger in september, in latere jaren is de piek gemiddeld iets lager en zijn de pieken in mei en oktober, maar aantallen fluctueren. Aantallen van de rosse grutto lijken gemiddeld iets hoger te liggen gedurende het jaar, maar ook hier is de variatie groot. Verder valt op dat de piek in groenpootruiters hoger is in afgelopen jaren (vanaf 2/3 jaar na suppletie). Een aantal soorten vertonen significante verschillen in aantallen met de jaren voor de suppleties. De kanoetstrandloper, bontbekplevier, en bergeend hebben allemaal significant lagere aantallen in het laatste jaar ('24-'25). De zwarte ruiter is juist significant meer gezien tijdens de suppleties.

Tabel B3-3. Tabel met modeluitkomsten van generalised additive model (GAM) waarbij de maximale aantallen vogels per soort per teldag zijn geanalyseerd. Aangegeven is of de aantallen verschillen ten opzichte van voor de suppleties en of er een seizoenseffect is gemeten. *p*-waarde wordt getoond als deze <0.05 is of als deze een trend vertoont (*p*-waarde <0.1). ns = niet significant ($\alpha=0.05$)

SOORT	SUPPLETIE-JAAREFFECT P-WAARDE, VERSCHIL MET VOOR SUPPLETIES	SEIZOENSEFFECT P-WAARDE	VERKLAARDE VARIANTIE	R ²
STEENLOPER	ns	ns	3.93%	-0.002
DRIETEENSTRANDLOPER	ns	ns	1.87%	-0.012
BONTE STRANDLOPER	ns	0.056 .	7.36%	0.290
KANOETSTRANDLOPER	Jaar '24-'25 0.0262 *	0.023 *	9.70%	-0.288
BONTBEKPLEVIER	Jaar '24-'25 <0.001 ***	0.060 .	13.20%	0.020
SCHOLEKSTER	ns	ns	5.40%	0.246
ZILVERMEEUW	ns	ns	2.77%	0.119
STORMMEEUW	ns	ns	3.98%	0.042
KOKMEEUW	ns	<0.001 ***	25.70%	0.444
ROSSE GRUTTO	ns	ns	3.67%	0.147
WULP	ns	ns	2.20%	0.094
ZILVERPLEVIER	ns	ns	0.63%	-0.011
KLUUT	ns	ns	12.50%	-0.042
BERGEEND	Jaar '24-'25 <0.007 **	ns	12,00%	-0.015
ZWARTE RUITER	Tijdens suppletie 0.029 *	0.069 .	28.70%	0.398
GROENPOOTRUITER	ns	<0.001 ***	56.40%	0.431
TURELUUR	ns	ns	2.25%	0.0236

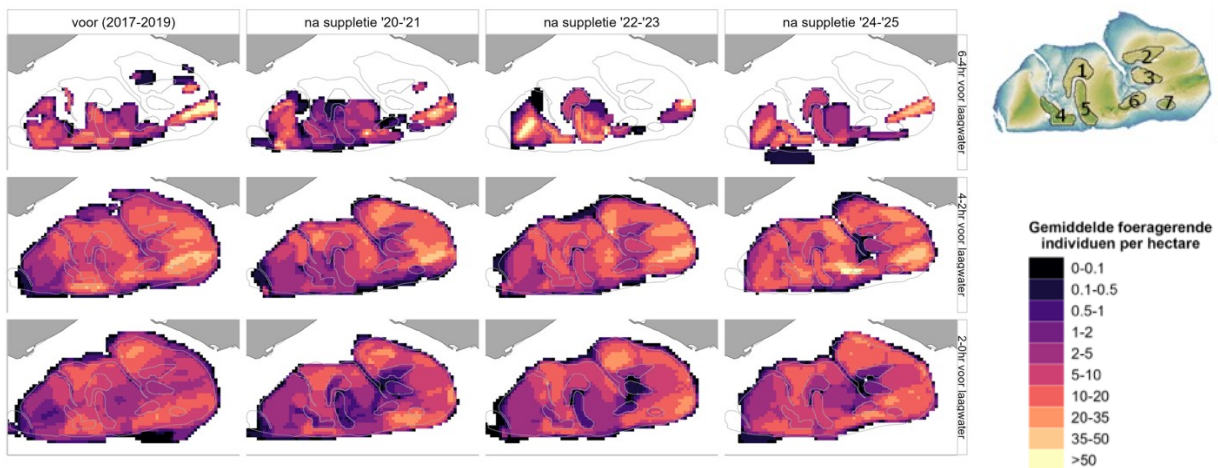


Figuur B3-7. Maximaal aantal per teldag en standaarddeviatie van de 13 meest voorkomende benthos-etende vogelsoorten plus de overige N2000 soorten die geteld zijn op de Roggenplaat (steenloper, kluut, zwarte ruiter en groenpootruiter, de strandplevier is niet aangetroffen tijdens de tellingen) per maand over de periode 2017-2025. In 2021 is als enige jaar ook een telling uitgevoerd in juni. Omdat aantallen fors lager lagen in deze maand is deze weggelaten. Ook zijn de tellingen tijdens de suppletie (oktober-december 2019) weggelaten uit dit overzicht. Kleuren geven aan of de tellingen voor tijdens of na de suppletie uitgevoerd zijn.

Voor het inschatten van het ruimtelijk gebruik, zijn de ingetekende polygonen opgewerkt tot shapefiles en over een raster van 100 bij 100 meter gelegd. Per cel is het percentage overlap met iedere shapefile berekend. Vervolgens is het aantal vogels berekend per rastercel, waarbij gecorrigeerd is voor het percentage overlap met het desbetreffende shapefile.

In tegenstelling tot de totale aantallen vogels en de soortsaamenstelling is de ruimtelijke verspreiding wel erg veranderd nadat de zandsuppleties zijn uitgevoerd (Figuur B3-8). De suppleties worden direct na de suppleties gemeden door benthos-etende vogelsoorten. Later komt daar voor sommige suppleties verandering in. Wat opvalt is dat in '22-'23 de suppleties 4 en 5 gebruikt worden vroeg in de ebperiode (6-4 uur voor laagwater), terwijl dit gebied in de jaren ervoor niet zo gebruikt werd als foerageerhabitat. Dit blijft

het jaar daarop in stand. De hogere ligging en het herstel van bodemdieren maakt deze suppleties mogelijk interessant op het moment dat een groot deel van de Roggenplaat nog onderwater ligt. Verder valt op dat de suppleties 4-2 uur voor laagwater vanaf '22-'23 meer gebruikt worden dan in de eerste 2 jaar na de suppleties. Het gebruik is wat betreft aantallen voor sommige suppleties weer vergelijkbaar met de aantallen voor de suppleties (bijvoorbeeld suppletie 1, 4, 5 en 3, en het laatste teljaar ook 6). Het gebruik van de suppleties door foeragerende vogels in de laagwaterperiode (2-0 uur voor laagwater) is nog steeds erg afwijkend van het beeld voor de suppleties. Ondanks de positieve ontwikkeling van bodemdieren op deze plekken kunnen andere variabelen een rol spelen. Zo liggen de suppleties hoger dan voorheen. Vogels lopen vaak (deels) met de waterlijn mee, en zijn met laagwater daarom meer op de lagere delen van de plaat te vinden. Echter, kunnen de suppleties mogelijk door hun relatief grovere sedimentsamenstelling ook eerder uitdrogen.



Figuur B3-8. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende benthos-etende vogels op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Rechtsboven een plaatje met de nummering van de suppleties.

Omdat de suppleties specifiek zijn uitgevoerd voor een aantal Natura2000 soorten, zijn de verspreidingskaarten voor deze soorten nog verder uitgelicht. Het gaat hier om de soorten steenloper, bonte strandloper, kanoetstrandloper, bontbekplevier, scholekster, rosse grutto, wulp, zilverplevier, bergeend, zwarte ruit, groenpootruit, tureluur. De strandplevier is hierin ook een doelsoort, maar die is niet geobserveerd gedurende de hele periode. Sommige soorten komen in zeer lage dichtheden voor op de Roggenplaat, waardoor verschillen in verspreiding niet altijd goed te interpreteren zijn. Omdat deze soorten in zulke lage aantallen worden gezien, worden de verspreidingskaarten afhankelijker van het aantal geobserveerde maanden: hoe meer teldagen in een bepaalde periode, hoe groter het deel van de Roggenplaat waarop deze soorten worden gezien. Dit geldt voor de steenloper, bontbekplevier, bergeend, zwarte ruit, groenpootruit, tureluur. Voor deze soorten hebben we gebruik gemaakt van kaarten waarbij we enkel de waarden boven de mediaan en het 75% kwantiel zijn gebruikt om toch iets te kunnen zeggen over de verspreiding tussen jaren. De mediaan is de waarde die precies in het midden van een dataset ligt wanneer alle data is geordend van laag naar hoog. Hierbij zijn de nullen uit de dataset niet meegenomen. Het 75% kwantiel is de waarde waaronder 75% van de waarnemingen valt, de 25% datapunten boven deze waarden zijn gebruikt. Door deze twee maatstaven te gebruiken in de visualisatie, wordt het mogelijk om trends en patronen in de data op een genuanceerde en informatieve manier te presenteren. Eerst zullen de verspreidingskaarten van de meer talrijke soorten worden gepresenteerd gevolgd door de kaarten van de minder talrijke soorten.

Na aanleg van de suppleties verschilt de verspreiding van de bonte strandloper nog steeds vergeleken met voor de suppleties (Figuur B3-9). Wat opvalt is dat 6-4 uur voor laagwater er hoge dichtheden zijn te vinden op suppleties 4 en 5, dit gebied werd ook al voor de suppleties gebruikt. Echter, ook suppletie 1 wordt de laatste jaren gebruikt voor foerageren. Twee uur later (4-2 uur voor laagwater) lijkt de verspreiding op het oostelijk deel van de plaat meer terug te keren naar die van voor de suppleties, waarbij het laatste (2024-2025) ook hoge dichtheden zijn te vinden in het zuidwesten van de plaat rond suppleties 4 en 5, dichtheden die niet gezien zijn voor de suppleties. Met laagwater worden bijna alle suppletie-gebieden nog steeds minder gebruikt.

De kanoetstrandloper gebruikt de Roggenplaat ook anders na aanleg van de suppleties (Figuur B3-10). Vanaf 2021 worden echter suppleties 4 en 5 wel weer gebruikt 6-4 uur voor laagwater. Tijdens de tweede telronde (4-2 uur voor laagwater) worden afhankelijk van het jaar bepaalde suppleties wel of niet gebruikt door kanoetstrandlopers (bijvoorbeeld suppleties 1, 4, 5 of 2). Tijdens de derde telronde (2-0 uur voor laagwater) worden de westelijk gelegen suppleties weer gebruikt voor foerageren maar de andere suppleties niet. In alle telperiodes lijken de plekken met hogere dichtheden wel nog lager te zijn dan voor suppleties. Ook het verspreidingsgebied lijkt minder groot na de suppleties, echter kan dit ook een bij-effect te zijn van het aantal jaren gebruikt voor de gemiddeldes per plaatje: het verspreidingsgebied van voor de suppleties bevat tellinggegevens van 3 jaar, terwijl de verspreidingsfiguren erna data van maar 2 of 1 (in het geval van 2024-2025) jaar bevatten. Meer jaar aan metingen vergroot de kans op het zien van een vogel op een bepaalde plek en vergroot hiermee dus ook het ogenschijnlijke verspreidingsgebied.

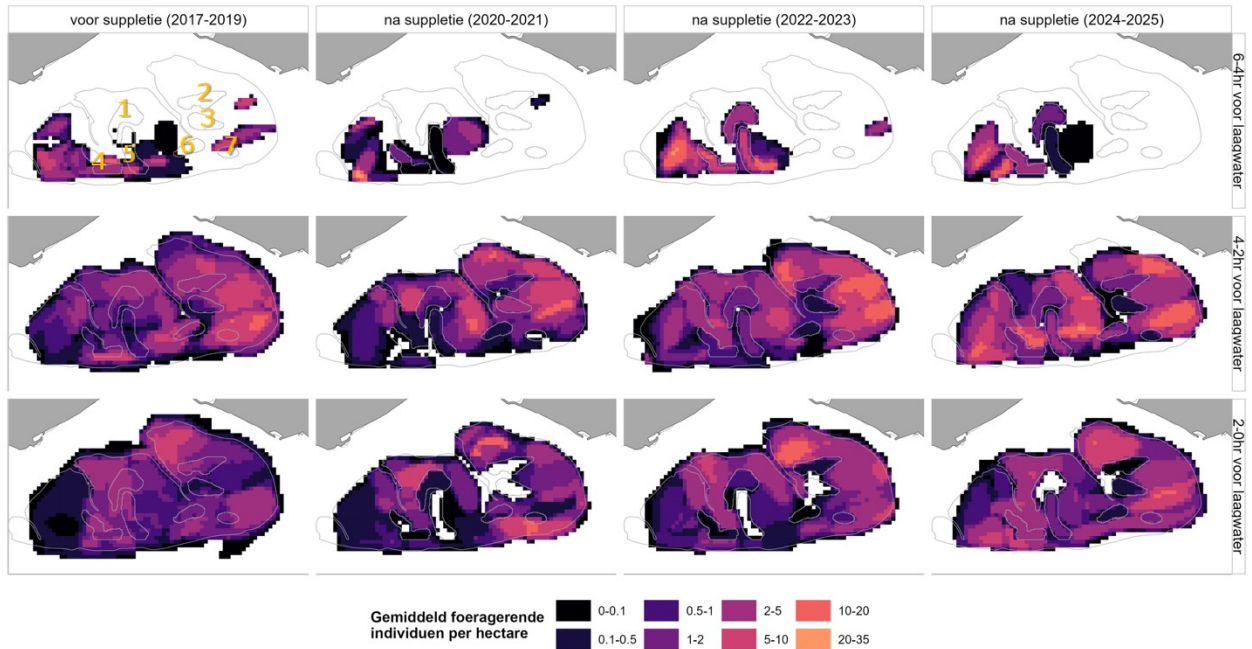
Scholeksters gebruiken net als een aantal andere soorten suppletie 4 en 5 en later ook 1 6-4 uur voor laagwater (Figuur B3-11). Tijdens de tweede telronde (4-2 uur voor laagwater) gebruiken scholeksters alle suppleties weer, met name suppletie 5. Het gebied ten oosten van suppletie 2 en 3 wordt de laatste jaren ook opvallend veel gebruikt. De verspreiding met laagwater (2-0 uur voor laagwater) lijkt weer erg op die van voor de suppleties. De suppletie-gebieden zelf tonen niet erg hoge dichtheden met uitzondering van suppletie 6, maar dit waren voor de suppleties ook niet de meest gebruikte plekken (met uitzondering van het gebied van suppletie 7).

Ook rosse grutto's gebruiken het gebied op en rond suppletie 4 en 5 tijdens de eerste telronde (6-4 uur voor laagwater), het laatste jaar lijkt dit vooral suppletie 4 te zijn (Figuur B3-12). Tijdens de tweede telronde (4-2 uur voor laagwater) worden alle suppleties weer gebruikt met uitzondering van suppletie 2 en 3. Met laagwater (2-0 uur voor laagwater) ziet het beeld er duidelijk anders uit. Er zijn dan hoge dichtheden te vinden langs de zuidkant van de plaat. De hogere dichtheden die te zien zijn op het noordelijk deel van de plaat zijn ook weer te zien in de periode 2024-2025.

De verspreiding van de wulp is 6-4 uur voor laagwater iets minder geconcentreerd dan voor de suppleties, suppletie 4 en 5 worden in toenemende mate gebruikt (Figuur B3-13). Verder valt op dat gedurende de tweede telling de suppleties weer in toenemende mate gebruikt worden, met name suppleties 1 en 5. Met laagwater (2-0 uur voor laagwater) ziet het beeld er redelijk stabiel uit. Suppletie-gebieden worden nog steeds iets minder gebruikt, maar suppletie 1 en 5 worden wel weer meer gebruikt. Het gebruik van het noordelijk deel van de plaat is over de tijd vrij stabiel gebleven.

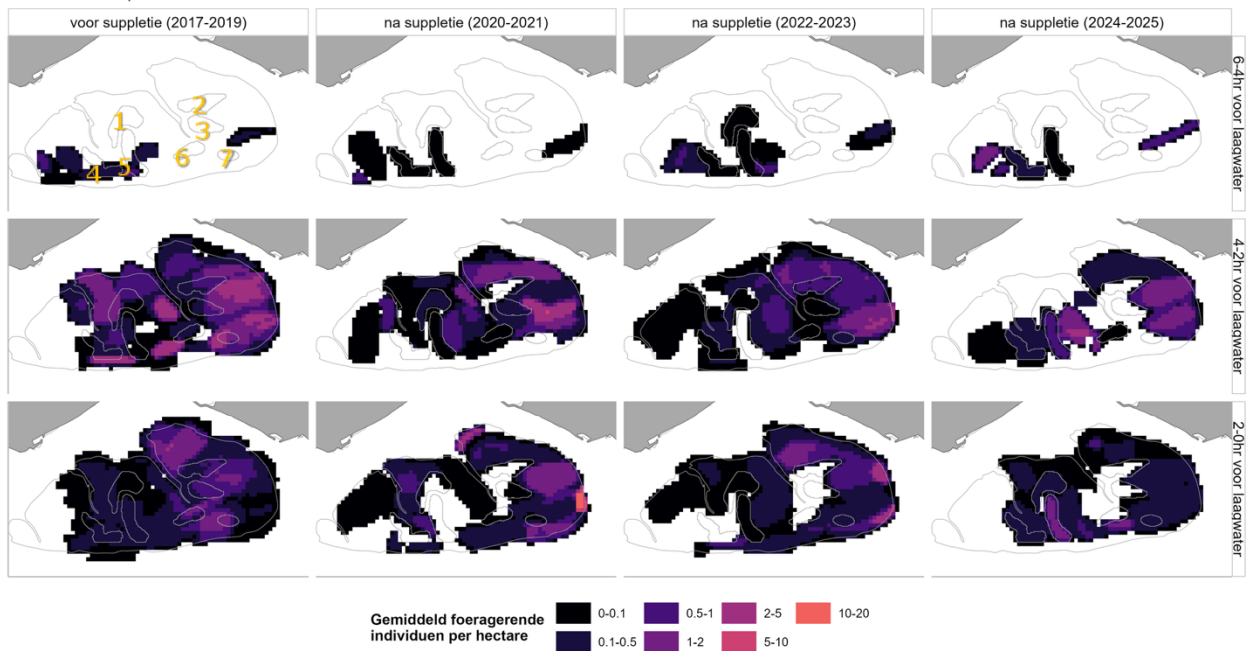
De zilverplevier gebruikt de suppleties 4 en 5 gedurende de eerste telronde (6-4 uur voor laagwater) (Figuur B3-14). Gedurende de daaropvolgende telling (4-2 uur voor laagwater) worden de suppleties over de jaren na aanleg steeds minder gemeden, met name suppleties 1, 4, 5 en 6 worden gebruikt. Met laagwater worden de meeste suppleties nog steeds minder gebruikt, maar met name op en rond suppleties 4 wordt wel veel gefoerageerd. Ook is er een opvallend hoge dichtheid op het zuidelijk deel van de plaat onder suppletie 6 in het laatste teljaar te zien.

Bonte Strandloper



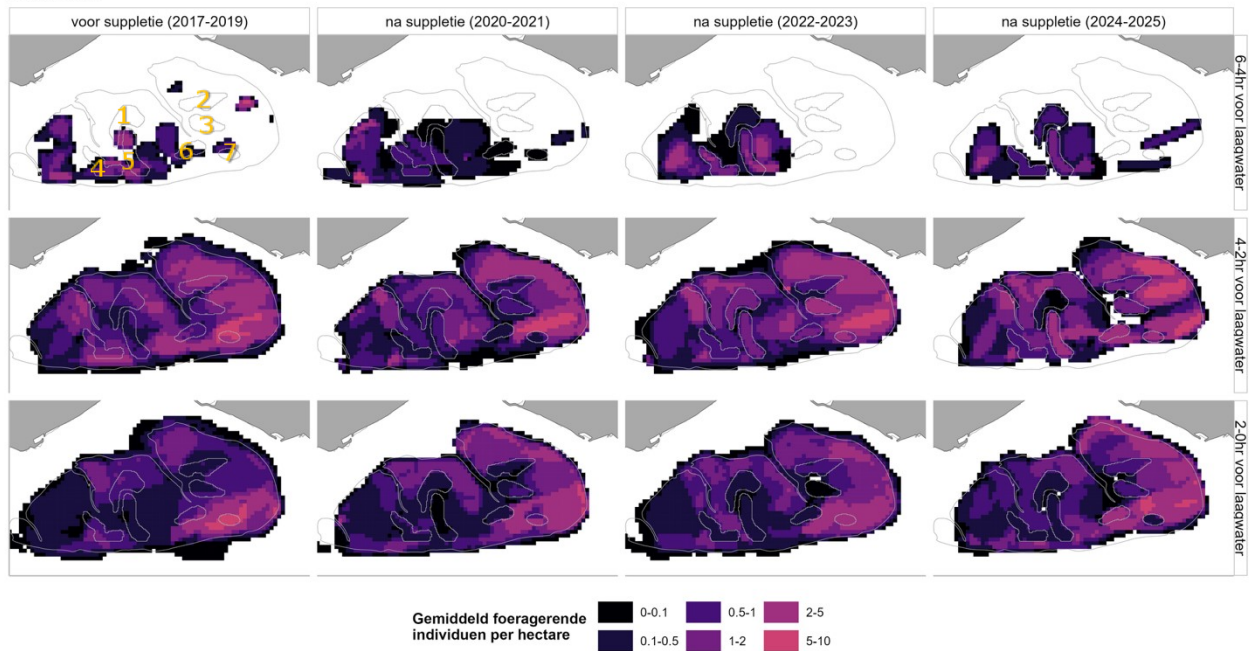
Figuur B3-9. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende bonte strandlopers op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Kanoetstrandloper



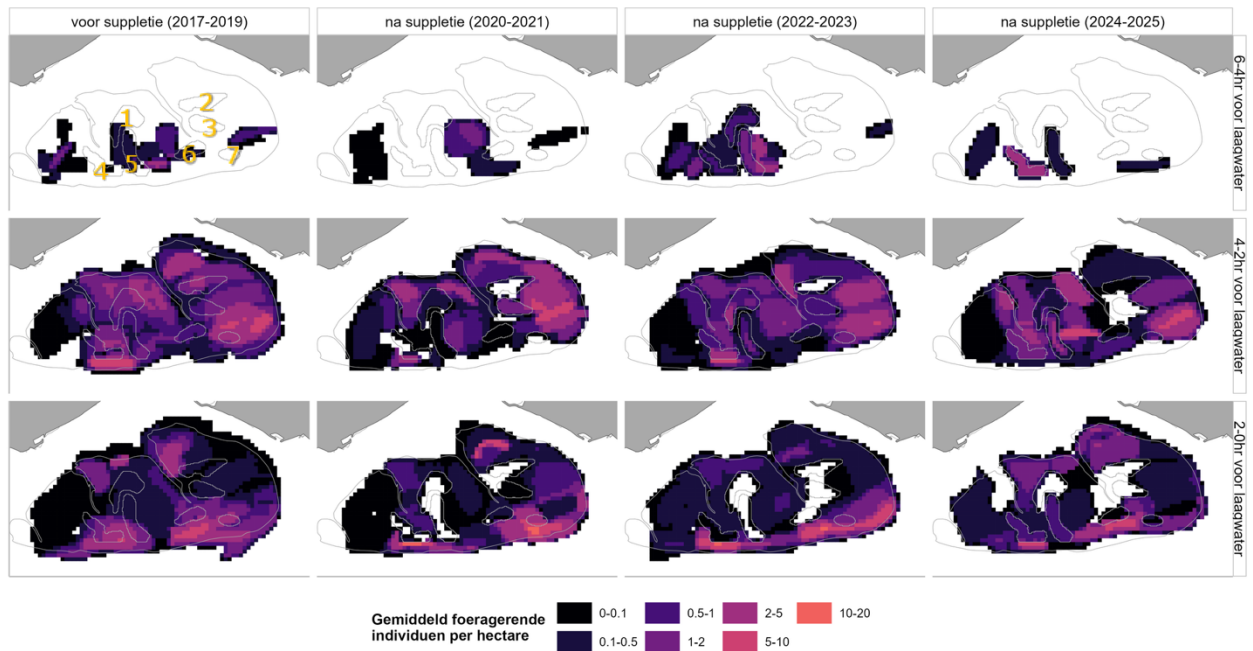
Figuur B3-10. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende kanoetstrandlopers op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Scholekster



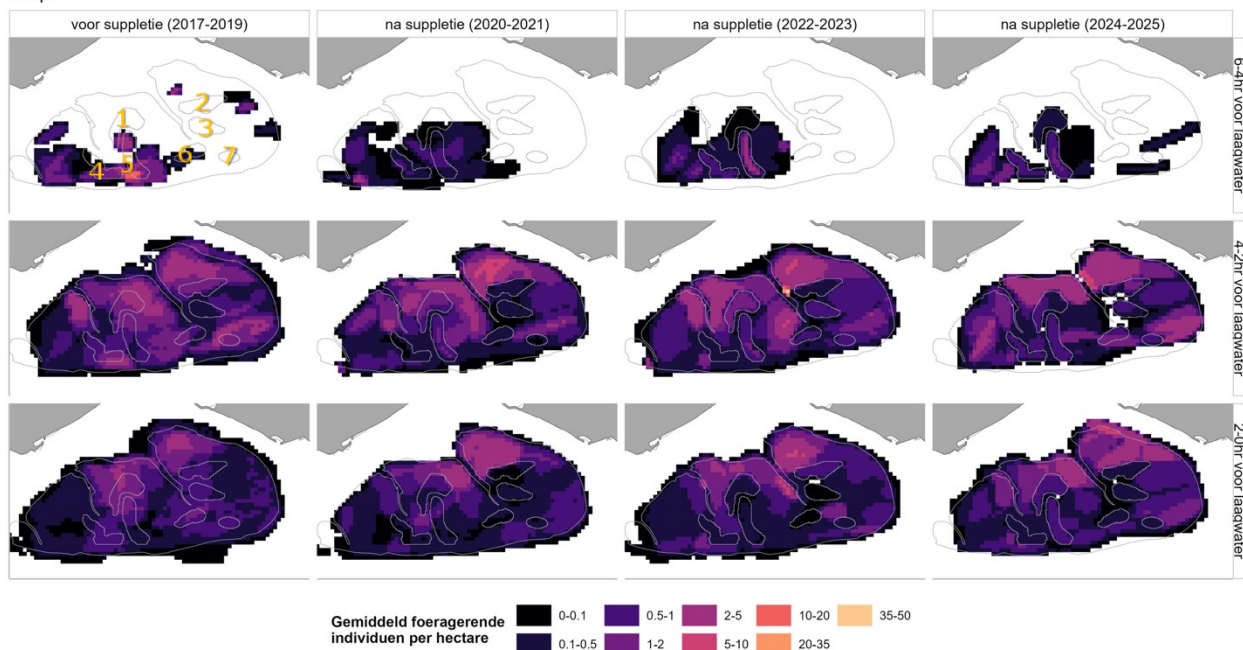
Figuur B3-11. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende scholeksters op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Rosse Grutto



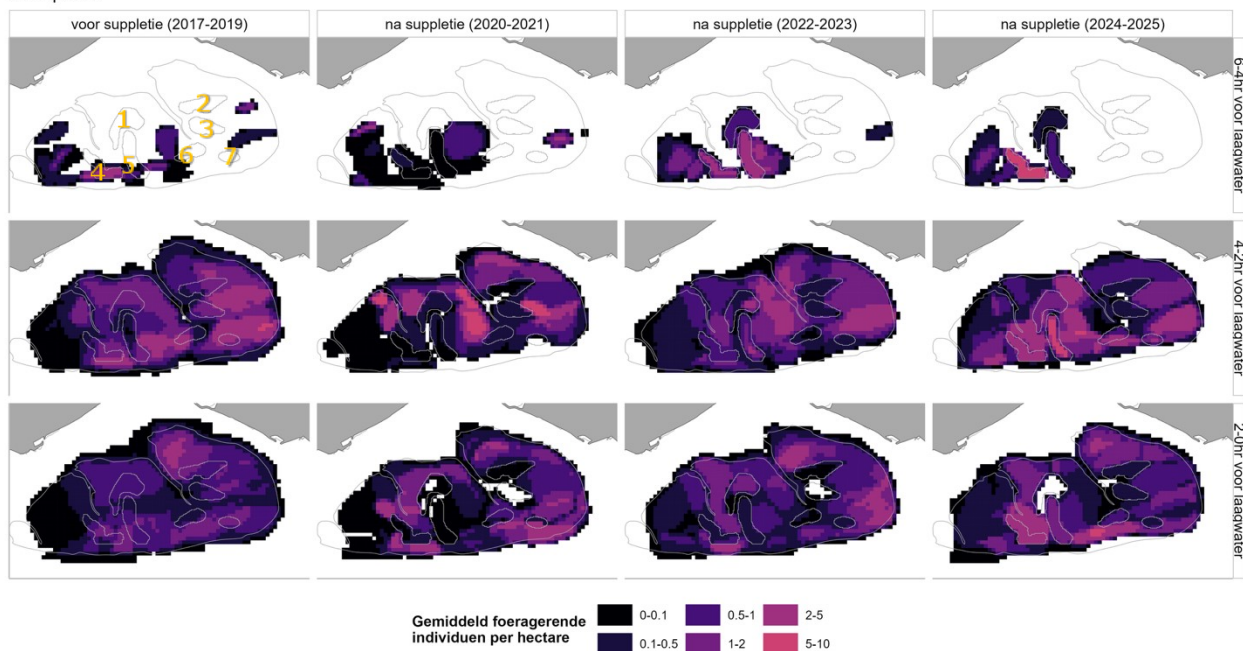
Figuur B3-12. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende rosse grutto's op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Wulp



Figuur B3-13. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende wulpen op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Zilverplevier



Figuur B3-14. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende zilverplevieren op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

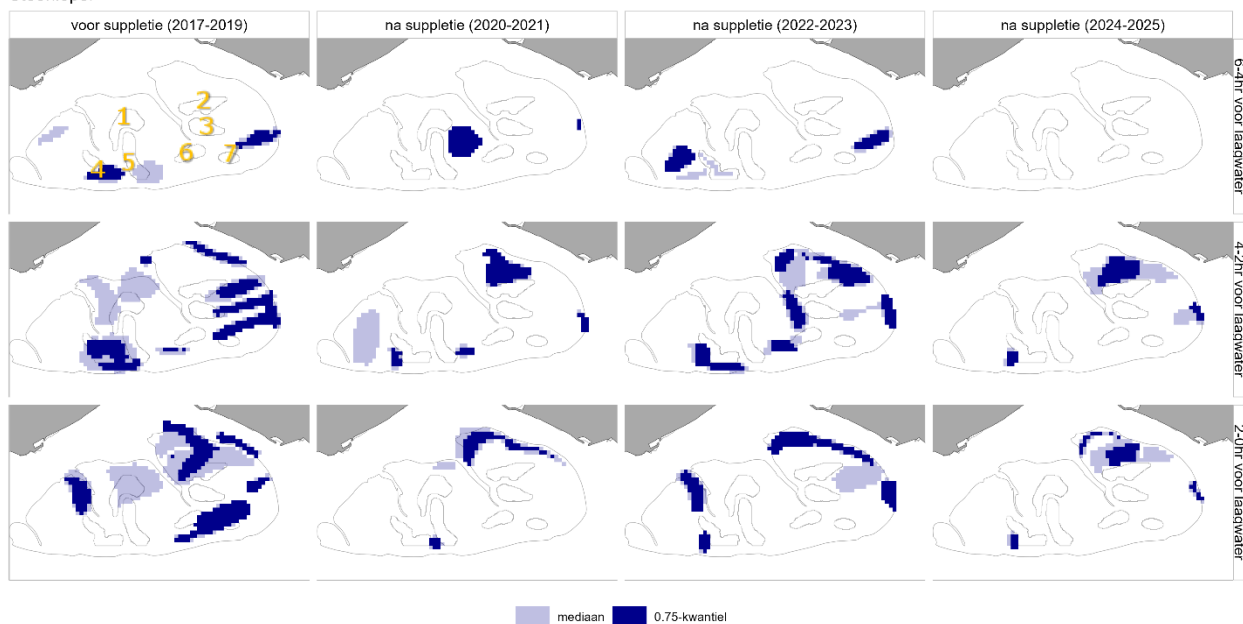
De steenloper leek voor de suppleties met name op de oostkant en op het gebied rond de suppleties 4 en 5 te foerageren. Na de suppleties zijn steenlopers vooral geobserveerd aan de noordoostkant van de Roggenplaat (Figuur B3-**15**).

De bontbekplevier is voor de suppleties met name gezien op de zuidoost kant van de Roggenplaat en vooral 4-0 uur voor laagwater (Figuur B3-**16**). Na de suppleties verandert dit patroon iets; de plevieren zijn iets meer aan de oostkant gezien.

De verspreiding van de bergeend is vrij sterk veranderd (Figuur B3-**17**). Voor de suppletie waren ze over een vrij groot deel te zien op de oostkant van de Roggenplaat tussen 4-2 uur voor laagwater en meer aan de west en zuidkant 2-0 uur voor laagwater. Na de suppletie is de verspreiding meer geconcentreerd op de noordwest kant van de plaat.

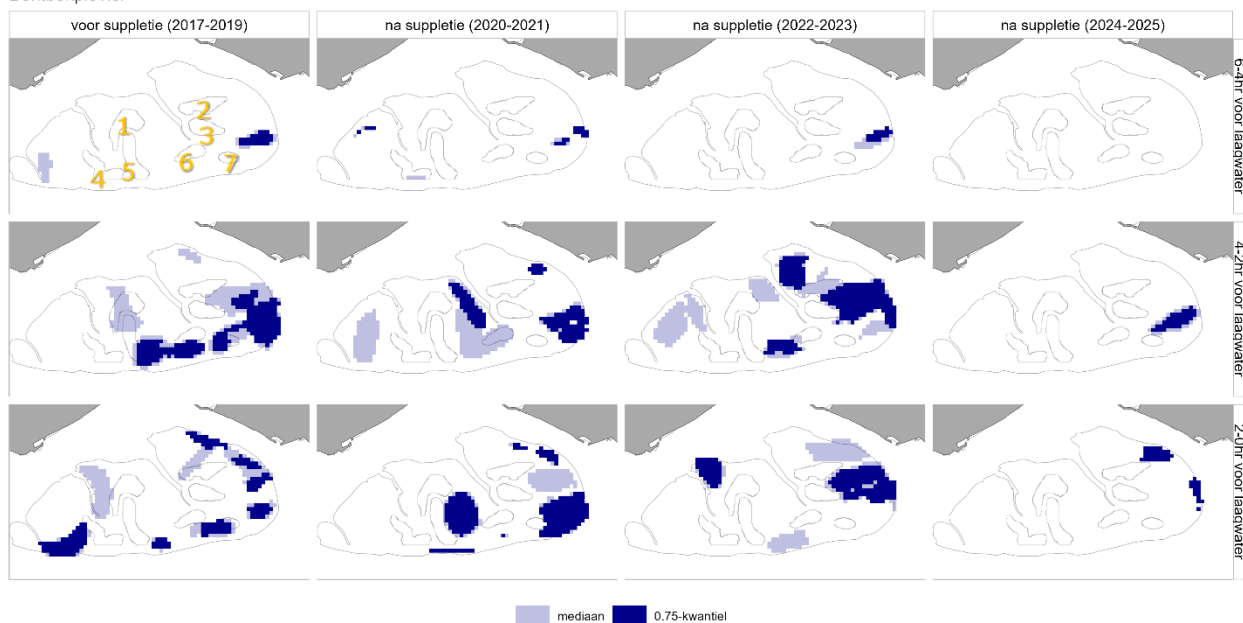
De verspreiding van de ruitersoorten zwarte ruit, groenpootruiter en tureluur komt sterk overeen met elkaar (Figuur B3-**18**, Figuur B3-**19**, Figuur B3-**20**). Allen zijn ze met name aan de noordoost kant van de Roggenplaat te vinden en in veel mindere mate op de west en zuidkant. Het gebied lijkt, fluctuaties tussen jaren daargelaten, niet sterk veranderd. Een opvallende observatie is wel de relatief hoge dichtheiden in 2022-2023 op suppletie 4 en 5.

Steenloper



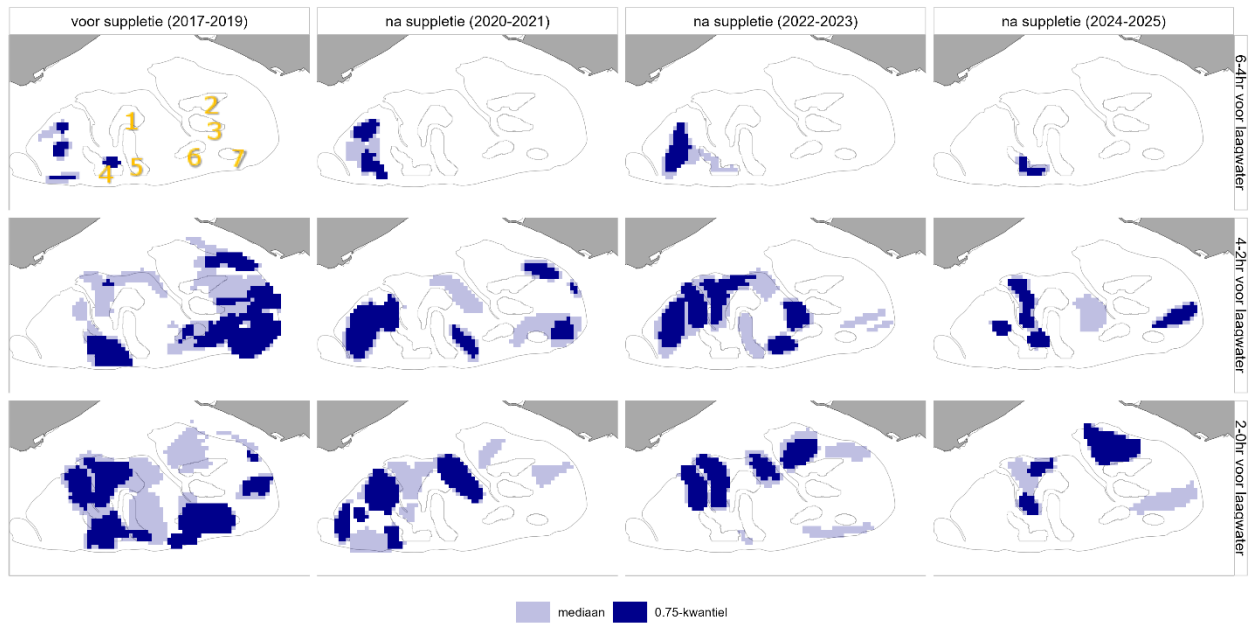
Figuur B3-15. Ruimtelijke verspreiding van foeragerende steenlopers op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De dichtheden groter dan het mediaan zijn aangegeven in lichtblauw en de dichtheden groter dan de 75% kwantiel in donkerblauw. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Bontbekplevier



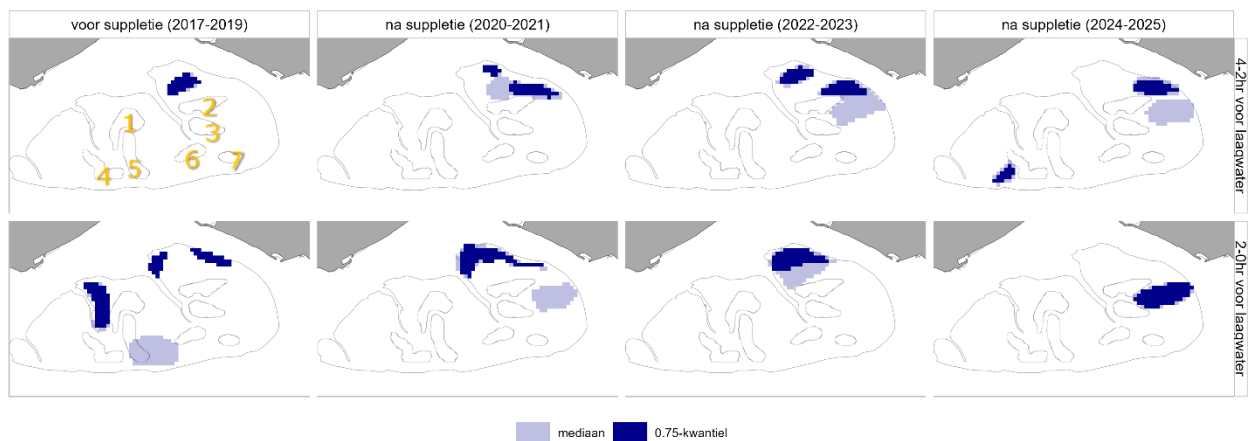
Figuur B3-16. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende bontbekplevier op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De dichtheden groter dan het mediaan zijn aangegeven in lichtblauw en de dichtheden groter dan de 75% kwantiel in donkerblauw. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Bergeend



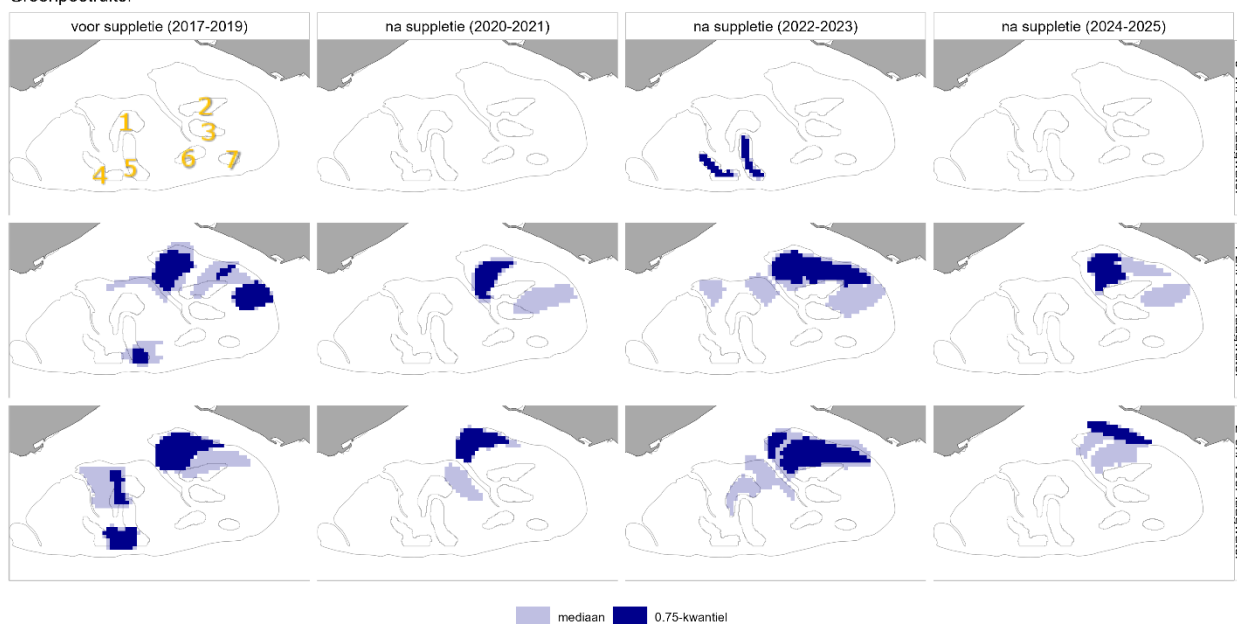
Figuur B3-17. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende bergeenden op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De dichtheden groter dan het mediaan zijn aangegeven in lichtblauw en de dichtheden groter dan de 75% kwantiel in donkerblauw. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Zwarte Ruiter



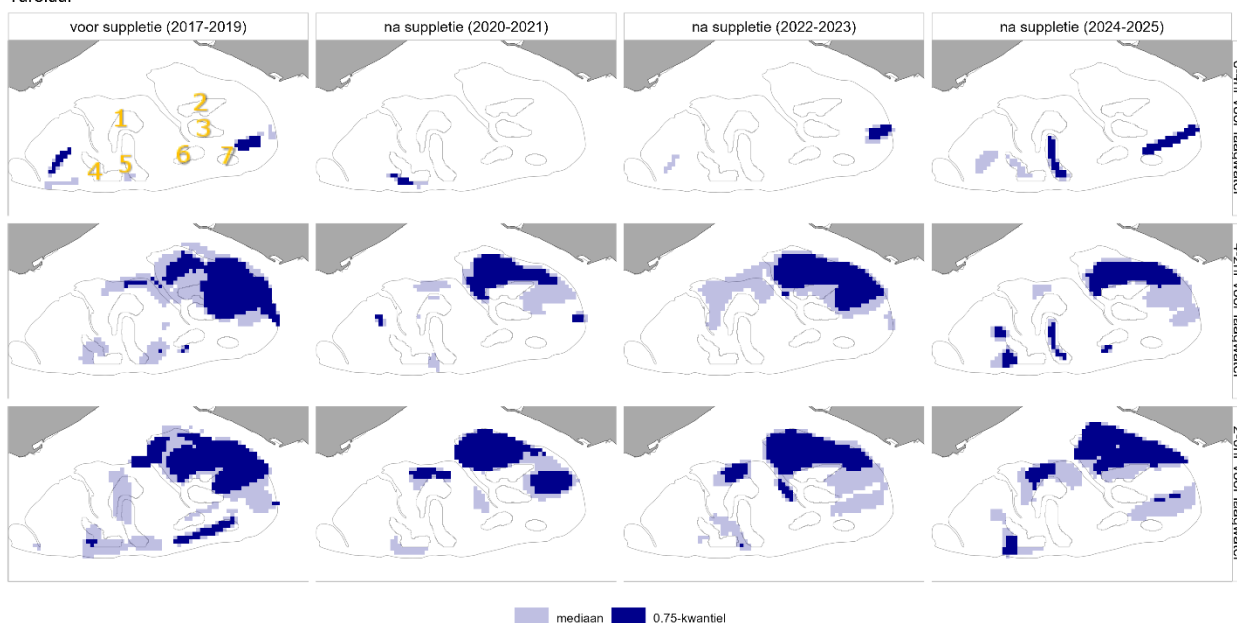
Figuur B3-18. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende zwarte ruiters op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De dichtheden groter dan het mediaan zijn aangegeven in lichtblauw en de dichtheden groter dan de 75% kwantiel in donkerblauw. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Groenpootruiter



Figuur B3-19. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende groenpootruiters op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De dichtheden groter dan het mediaan zijn aangegeven in lichtblauw en de dichtheden groter dan de 75% kwantiel in donkerblauw. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

Tureluur



Figuur B3-20. Ruimtelijke verspreiding van gemiddelde dichtheid foeragerende tureluurs op de Roggenplaat in de aangegeven periode. De dichtheden groter dan het mediaan zijn aangegeven in lichtblauw en de dichtheden groter dan de 75% kwantiel in donkerblauw. De grijze belijning binnen de plaat geeft aan waar de suppleties zijn aangelegd. Nummers van de suppleties zijn in de plot linksboven aangegeven.

B3.3.1. Kennisvraag 1. Verklarende variabelen in de verspreiding van vogels

Onderliggende kennisvraag vogels 1

Is de verspreiding van benthos-etende vogels gerelateerd aan factoren zoals droogvalduur, sedimentsamenstelling (vochtgehalte), voedselbeschikbaarheid?

Samenvattende beantwoording:

Verspreiding van steltlopers en bergeenden is gerelateerd aan verschillende omgevingsfactoren. In deze studie is een statistisch model gebruikt om de relatie tussen foerageertijd (uren per hectare) of foerageerdichtheid (aantal per hectare) te verklaren aan de hand van omgevingsfactoren dichtheid aan bodemdieren, droogvalduur, sedimentsamenstelling, bodemhelling en de afstand tot de waterlijn. Meer specifiek: in de meeste winters is er een positieve relatie tussen de dichtheid aan bodemdieren en foerageeruren per hectare. Deze relatie is het sterkst gedurende het tweede telmoment (4-2 uur voor laagwater). Vogels maken over het algemeen het meeste gebruik van de gebieden met een droogvalduur >20%, omdat de diepere delen maar zeer kort droog komen te liggen. Het gebruik van verschillende droogvalduurklassen door steltlopers wordt hoogstwaarschijnlijk deels verklaard door de terugtrekkende waterlijn; vogels hebben een duidelijke voorkeur voor plekken op de Roggenplaat die op dat moment ongeveer 0.25-0.5m boven de waterlijn liggen. Voor mediane korrelgrootte is er een minder duidelijke relatie te zien, maar lijkt er een piek te zijn in foerageeruren bij sedimenten met een mediane korrelgrootte van ongeveer 200 μm . De foerageeruren per hectare waren ook hoger bij een flauwe bodemhelling ($\sim 1/600$ m/m), waarbij vogels steilere delen (steiler dan 1/150 m/m) minder gebruiken.

Er zijn duidelijke verschillen tussen de meest voorkomende steltlopersoorten in hun voorkeur en relatie tot hun voedselbronnen op de Roggenplaat. Soorten zoals de scholekster en de wulp vertonen zo goed als elke winter een duidelijke positieve relatie met het voorkomen van hun specifieke prooidieren, terwijl dit voor andere steltlopersoorten minder duidelijk of niet in elk jaar te zien is. Consistent tussen de soorten is dat deze relatie afhankelijk is van het moment van het getij. Een relatie met voedsel is enkel te gezien later in het getij wanneer een ruimer deel van de Roggenplaat beschikbaar is om te foerageren, en de vogels ook daadwerkelijk een keuze hebben. Dit benadrukt het belang van tellen op meerdere momenten in het getij. Verschillen zijn er ook in de voorkeur voor bodemhelling en korrelgrootte. De wulp heeft een sterkere relatie met een specifieke bodemhelling dan de andere soorten. De zilverplevier gebruikt daarentegen een wat breder scala inclusief steilere delen. De kanoet lijkt een minder sterke voorkeur te hebben wat betreft bodemhelling. Bonte strandloper, rosse grutto, zilverplevier en kanoet zijn vaker te vinden op sedimenten met een mediane korrelgrootte van met name rond de 200 μm maar foerageren over het algemeen ook in hogere mate op plekken met een fijnere korrel. De scholekster lijkt minder kieskeurig te zijn en gebruikt ook delen met een wat grovere sedimenten. De wulp is juist te zien in hogere dichtheden met een grovere korrelgrootte. De soorten gebruiken ook een ander deel van de plaat wat betreft droogvalduur & de gerelateerde afstand van de waterlijn. De meeste soorten gebruiken de delen van de Roggenplaat met een droogvalduur van 20% of meer. De schelpdiereters zoals de scholekster en kanoet, gebruiken de wat hogere delen terwijl de wulp en in mindere mate de rosse grutto juist meer in de lager gelegen delen foerageren net als de delen die nog net onder water staan, waar zij met hun lange poten en snavel makkelijker gebruik van kunnen maken. De ruiters (groenpootruiter, zwarte ruiter en tureluur) wijken hier duidelijk af: zij hebben een voorkeur voor de lagere gelegen delen met een droogvalduur van 20% en de delen die nog net onder water staan. Wat betreft de waterlijn valt op dat vier soorten vaker op iets grotere afstand van de waterlijn te vinden zijn zoals de bonte strandloper, scholekster, kanoetstrandloper en zilverplevier. Met name de bonte strandloper en kanoet foerageren hier mogelijk in plassen die op de hogere delen blijven staan. Deze vogels tonen tijdens laagwater een piek op plekken die ongeveer 1 meter boven de waterlijn liggen. De rosse grutto en wulp zitten daarentegen juist vaker op plekken rond de waterlijn; de piek in foerageeruren zit voor beide soorten rond de nul. Ruiters foerageren vaker op plekken in de waterlijn.

De relatie van foerageertijd per hectare in uren en dichtheid met omgevingsfactoren zijn belangrijk om te bestuderen, met name de voorkeuren van de verschillende soorten. Deze kennis is van belang bij het ontwerp en het inschatten van de effecten van zandsuppleties. Het blijkt dat vooral de sedimentsamenstelling (mediane korrelgrootte) en droogvalduur een punt van aandacht zijn, omdat hier duidelijke verschillen tussen soorten naar voren komen en de sedimentsamenstelling van deze zandsuppleties afwijken van wat de sedimentsamenstelling op de plaat vóór aanleg van de suppleties was. Hierbij zijn soorten als kanoet, bonte strandloper, rosse grutto en zilverplevier kwetsbaar vanwege hun voorkeur voor fijner sediment. Wat betreft de variatie in droogvalduur zien we dat soorten als wulp, rosse grutto en de ruiters meer foerageren in de lagere delen van de plaat die slechts beperkt droogvallen of in de waterlijn, terwijl andere soorten zoals bonte strandloper en scholekster mogelijk meer baat kunnen hebben bij delen hoger op de plaat met langere droogvalduur.

De verspreiding van benthos-etende vogels is gerelateerd aan allerlei variabelen, zoals sedimentsamenstelling, droogvalduur en voedselkwaliteit (Bakker et al., 2021; Rappoldt et al., 2006; Zwarts, 2009). Echter, verschillen deze relaties tussen soorten en gebieden. Door de relaties tussen (a-)biotiek en vogels te bestuderen in de Oosterschelde, leren we waarom bepaalde gebieden belangrijk zijn voor vogels en waarom bepaalde gebieden minder gebruikt worden. In dit hoofdstuk tonen we de resultaten en interpretatie van een model-matige aanpak waarin we kijken naar de relatie tussen de verspreiding van vogels en (a-)biotische variabelen.

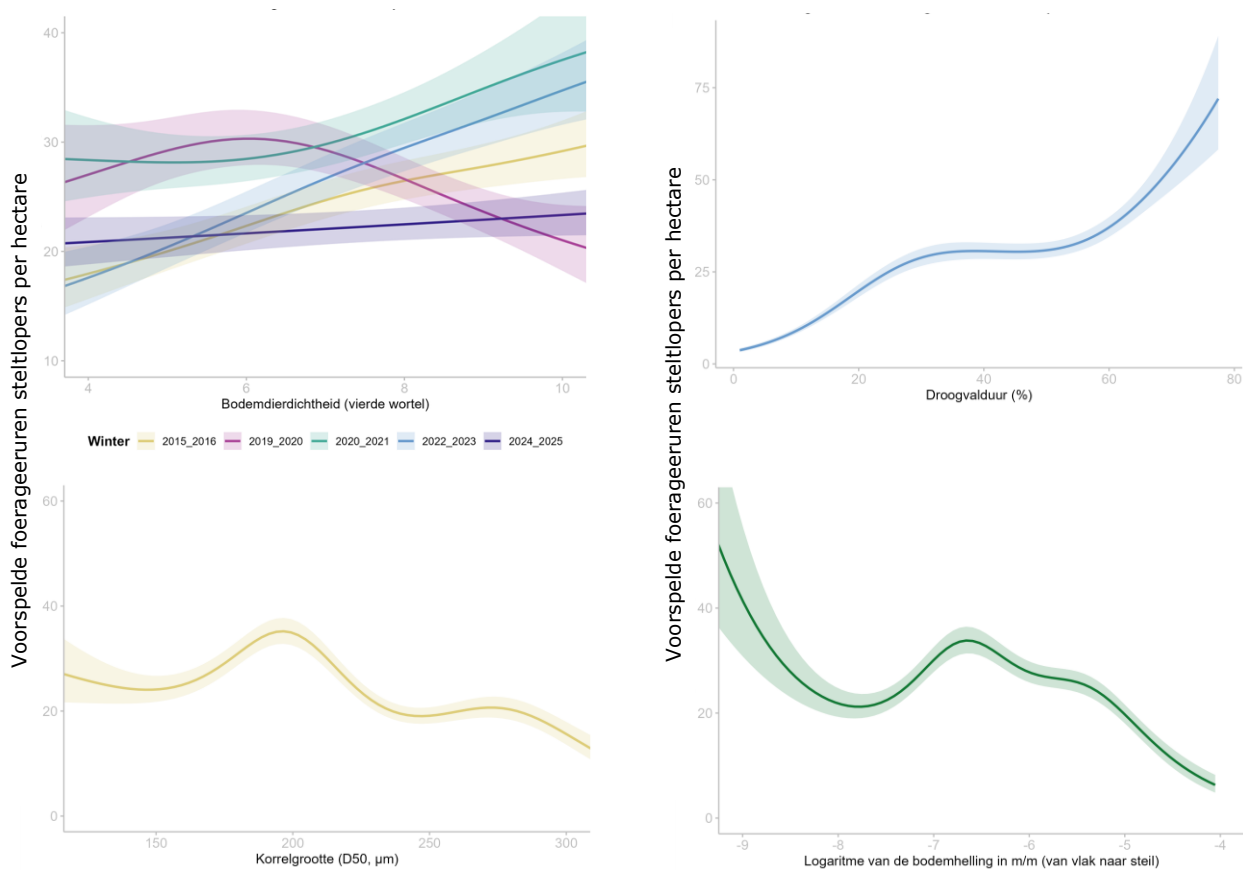
Voor de analyse tussen (a-)biotiek en foeragerende vogels voor de suppleties is een generalized additive model gefit met een negatieve binomiale verdeling. Er zijn een aantal modellen gebruikt om deze relaties in kaart te brengen. In dit deel van de analyse leggen we de focus op de analyse van foerageeruren per hectare in relatie tot variabelen en vullen dit soms aan met analyses waarbij dichtheid aan foeragerende vogels als responsvariabele is gebruikt omdat in deze modellen ook telmoment is meegenomen.

Zoals beschreven zijn de modellen uitgevoerd met telkens een andere responsvariabele (*Tabel B3-1*); steltlopers (inclusief bergeend), een aantal voedselgroepen (schelpeneters, wormeneters en ruiters), en een selectie aan soorten (bonte strandloper, kanoet, scholekster, rosse grutto, wulp en zilverplevier). Hieronder zullen in deze volgorde de meest opvallende resultaten worden besproken.

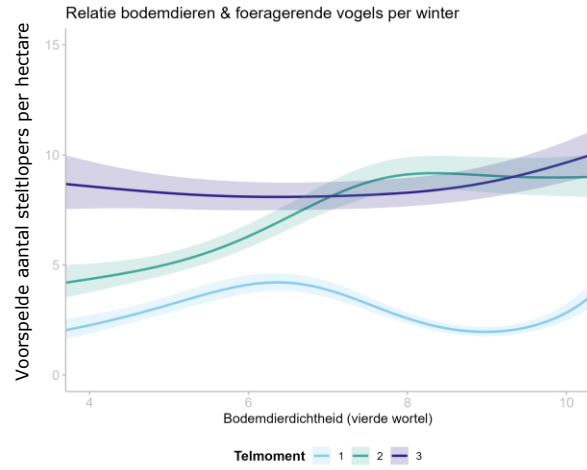
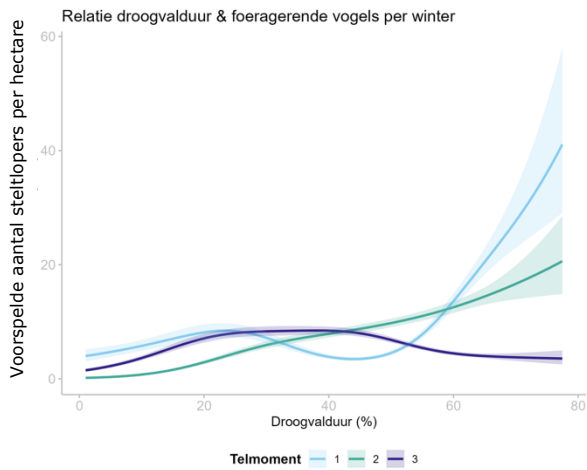
Steltlopers + bergeend

Het statistische model waarbij de foerageeruren zijn gebruikt als responsvariabele en smooth termen voor meerdere omgevingsvariabelen en een factorvariabele voor het jaar van de winter verklaarde 28.1% van de variatie in foerageeruren ($R^2 = 0.232$). Er was een significant verschil tussen de winters. Een post-hoc analyse met de Tukey HSD-methode werd uitgevoerd om paargewijze verschillen tussen de seizoenen te toetsen. Deze analyse toonde aan dat het gemiddelde aantal foerageeruren per hectare in de winter van 2020-2021 significant hoger was dan in de andere winters (alle $p < 0.001$), terwijl winter 2024-2025 significant lagere waarden vertoonde dan de meeste andere winters ($p < 0.01$). Tussen de winters 2019-2020 en 2022-2023 werd geen significant verschil gevonden ($p = 0.63$). Deze analyse toonde aan dat er significant minder foerageeruren per hectare waren in de laatste winter (2024-2025) ten opzichte van de andere jaren ($p < 0.05$). Hierbij moet worden opgemerkt dat in deze winter twee teldagen hebben plaatsgevonden waarbij het eerste telmoment (6-4 uur voor laagwater) niet of nauwelijks uitgevoerd kon worden vanwege zeer hoog water én gaat dit over de foerageeruren per hectare (een dichtheidsmaat) en niet over totale aantallen. De totale foerageeruren van steltlopers zijn namelijk niet veranderd (zie evaluatievraag), alhoewel 3 steltloper-soorten wél minder geteld zijn in het laatste teljaar. De winter van 2020-2021 had significant meer foerageeruren vergeleken met de winter van 2015-2016. De smooth-termen voor de dichtheid aan bodemdieren varieerden per winter en waren significant in alle winters behalve 2024-2025 ($p = 0.053$). Voor de winters 2015-2016, 2020-2021 en 2022-2023 was er een positieve relatie tussen foerageeruren en de dichtheid aan bodemdieren; hoe meer bodemdieren des te meer vogels (Figuur B3-21). Deze relatie was anders in 2019-2020, de winter van de suppleties, waarbij er bij hogere dichtheden juist een negatieve trend was. Dit is mogelijk te verklaren doordat de benthos-bemonstering nog voor de suppleties heeft plaatsgevonden. Opvallend genoeg was er in de winter van 2024-2025 geen relatie tussen foerageeruren en bodemdieren. De variabelen droogvalduur, korrelgrootte en bodemhelling hadden eveneens significante niet-lineaire effecten op het aantal foerageeruren ($p < 0.001$ voor alle drie de

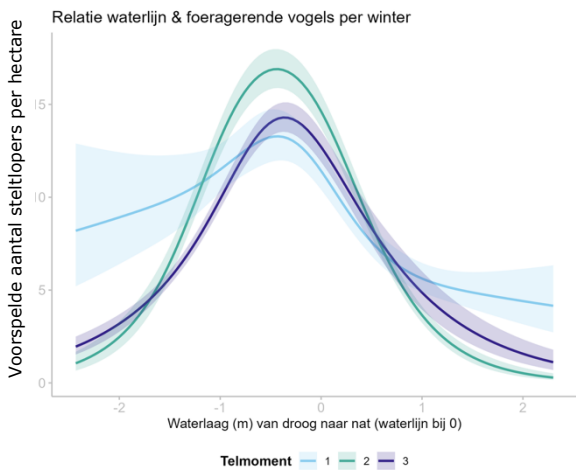
variabelen). Er waren meer foerageeruren in gebieden met een langere droogvalduur (>20%) (Figuur B3-21). Voor mediane korrelgrootte is er een minder duidelijke relatie te zien, maar lijkt er een piek te zijn in foerageeruren bij 200 μm (Figuur B3-21). De foerageeruren waren ook hoger bij een gemiddelde bodemhelling, waarbij vogels al te steile delen lijken te vermijden, en plattere delen juist opzoeken. Echter zijn de datapunten <-8 beperkt in deze dataset (Figuur B3-21). Uit andere modellen bleek dat de droogvalduur anders gebruikt werd door het getij heen (Figuur B3-22). Dit valt ook te verwachten, want de waterlijn trekt zich terug waardoor delen van de plaat die korter droogliggen vrij komen. Dit is te zien in de dichtheden aan vogels die zich over het getij naar lagere delen begeven. De delen van de plaat > 70% droogvalduur lijken erg populair. Echter is de dekking aan datapunten erg laag in deze delen. Ook de relatie met de dichtheid aan bodemdieren is afhankelijk van het telmoment (Figuur B3-22). We zien hier met name een sterke relatie tussen voedsel en vogels gedurende het tweede telmoment. Uit twee andere modellen bleek dat ook de waterlijn een belangrijke variabele is in de verklaring van foeragerende vogels. Beide modellen (model 3 & 4 \rightarrow zie *Tabel B3-1*) laten zien dat de meeste vogels een voorkeur hebben voor delen van de Roggenplaat die relatief dichtbij de waterlijn liggen (piek rond $\sim 0.5-0.25$ meter boven het water). De selectie op dit gebied op de Roggenplaat is het sterkst als er een groter deel van de plaat is drooggevallen (4-0 uur voor laagwater) (Figuur B3-23).



Figuur B3-21. Voorspelde foerageeruren steltlopers per hectare, berekend aan de hand van de modeluitkomsten, in relatie tot de variabelen gebruikt in het statistische model (model 1 uit Tabel B3-1).



Figuur B3-22. Voorspelde dichtheid aan steltlopers per telmoment (1= 6-4 uur voor laagwater, 2 = 4-2 uur voor laagwater, 3= 2-0 uur voor laagwater), berekend aan de hand van de modeluitkomsten (model 3 uit Tabel B3-1), in relatie tot droogvalduur en bodemdierdichtheid.



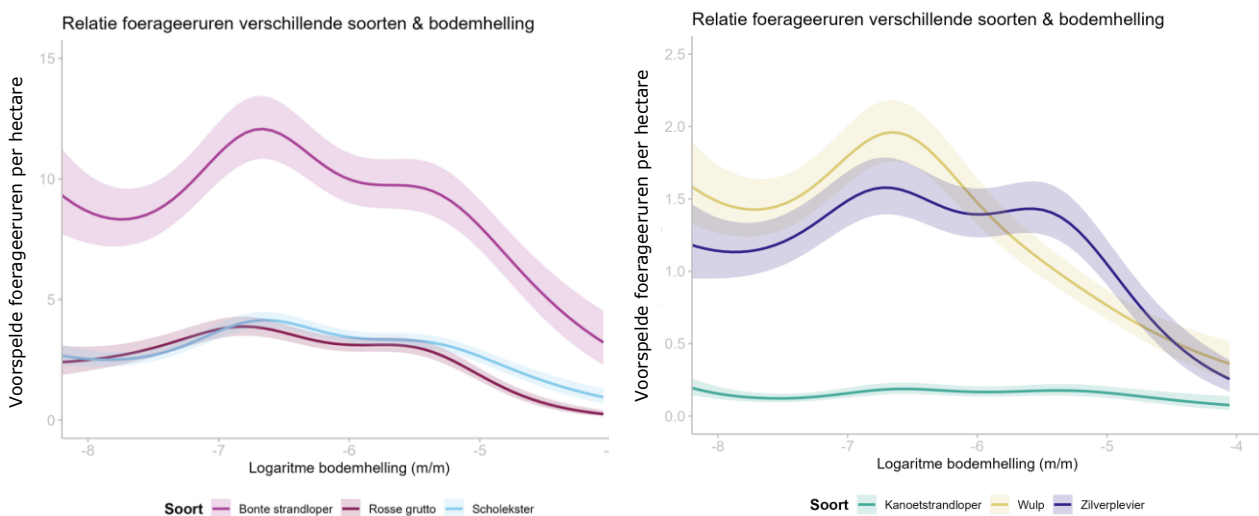
Figuur B3-23. Voorspelde dichtheid aan steltlopers per telmoment (1= 6-4 uur voor laagwater, 2 = 4-2 uur voor laagwater, 3= 2-0 uur voor laagwater), berekend aan de hand van de modeluitkomsten (model 4 uit Tabel B3-1), in relatie tot de waterlijn.

Verspreiding in relatie tot omgevingsfactoren voor bonte strandloper, kanoet, scholekster, rosse grutto, wulp en zilverplevier

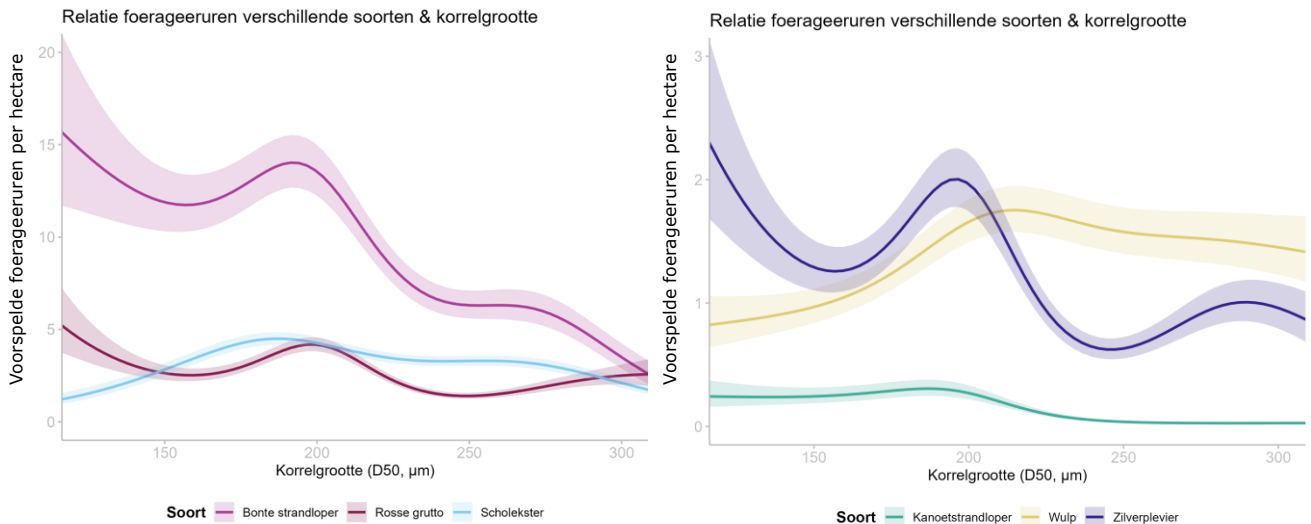
De verschillende soorten steltlopers hebben mogelijk voorkeur voor specifieke omgevingscondities die hun verspreiding kunnen bepalen. Voor alle soorten speelt bodemhelling een significante rol in hun verspreiding ($p < 2e-16$ ***). Foerageeruren zijn voor veel soorten hoger bij een flauwe helling ($\sim 1/600$ m/m). Echter zijn de datapunten met een waarde kleiner dan $1/3000$ m/m schaars in de dataset. Daarnaast lijken sommige soorten een scherpere piek te tonen dan anderen (Figuur B3-24). De wulp lijkt bijvoorbeeld een sterkere voorkeur (piek bij hellingshoek van $\sim 1/800$ m/m) te hebben dan de zilverplevier die voorkomt over een bredere range aan hellingshoeken ($1/150$ - $1/100$ m/m). Hetzelfde geldt voor de bonte strandloper, rosse grutto en scholekster (hoger voorkomen bij $1/150$ - $1/100$ m/m). De kanoet lijkt een minder sterke voorkeur te hebben, alhoewel de lagere aantallen van deze soort een rol kunnen spelen in de interpretatie.

De relatie met mediane korrelgrootte is ook significant voor elke soort ($p < 2e-16$ ***). Bij deze variabele zijn er duidelijke verschillen te zien tussen de soorten. Bonte strandloper, rosse grutto en zilverplevier lijken een hogere foerageertijd te hebben bij delen met een mediane korrelgrootte van rond de $200 \mu\text{m}$, maar zijn überhaupt iets meer te zien op plekken met een fijnere korrel. De scholekster lijkt minder kieskeurig te zijn. De wulp is juist te zien in hogere dichtheden met een grovere korrelgrootte en de kanoet heeft een hogere foerageertijd in gebieden met fijnere sedimenten (Figuur B3-25).

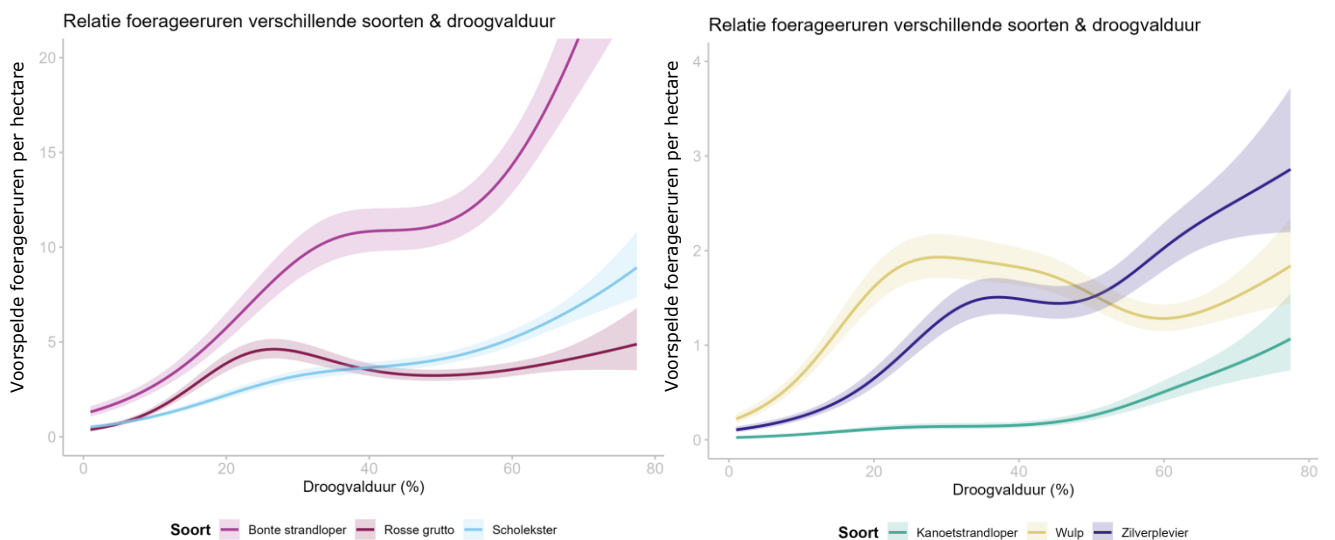
Ook in de variabele droogvalduur zien we verschil tussen de soorten. Deze variabele was wederom significant in alle soorten ($p < 2e-16$ ***). In sommige soorten is een hoge voorspelde foerageertijd te zien bij een hoge droogvalduur (delen die lang droogliggen), maar hierbij moet opgemerkt worden dat de data op hele hoge plekken beperkt is. Bovendien zijn er met name hoge aantallen op hogere delen van de plaat wanneer de rest van de plaat nog niet beschikbaar is. De meeste soorten gebruiken de delen van de Roggenplaat met een droogvalduur van 20% of meer (Figuur B3-26). Uitzonderingen zijn de schelpdiereters de scholekster en kanoet die de wat hogere delen lijken te gebruiken. De wulp en in mindere mate de rosse grutto lijken juist meer in de diepere delen te foerageren, waar zij met hun lange poten en snavel makkelijker gebruik van kunnen maken.



Figuur B3-24. Voorspelde foerageeruren per hectare, berekend aan de hand van de modeluitkomsten per soort, in relatie tot bodemhelling (m/m). Een kleine waarde van bodemhelling betekent een vlakke ondergrond, hoe groter hoe sterker de helling. De plots zijn gesorteerd op voorkomen van de soorten, de linker plot toont de soorten die talrijker zijn (bonte strandloper, rosse grutto en scholekster) en de rechter plot toont de soorten die iets minder talrijk zijn (kanoet, wulp en zilverplevier).



Figuur B3-25. Voorspelde foerageeruren per hectare, berekend aan de hand van de modeluitkomsten per soort, in relatie tot mediane korrelgrootte. De plots zijn gesorteerd op voorkomen van de soorten, de linker plot toont de soorten die talrijker zijn (bonte strandloper, rosse grutto en scholekster) en de rechter plot toont de soorten die iets minder talrijk zijn (kanoet, wulp en zilverplevier).



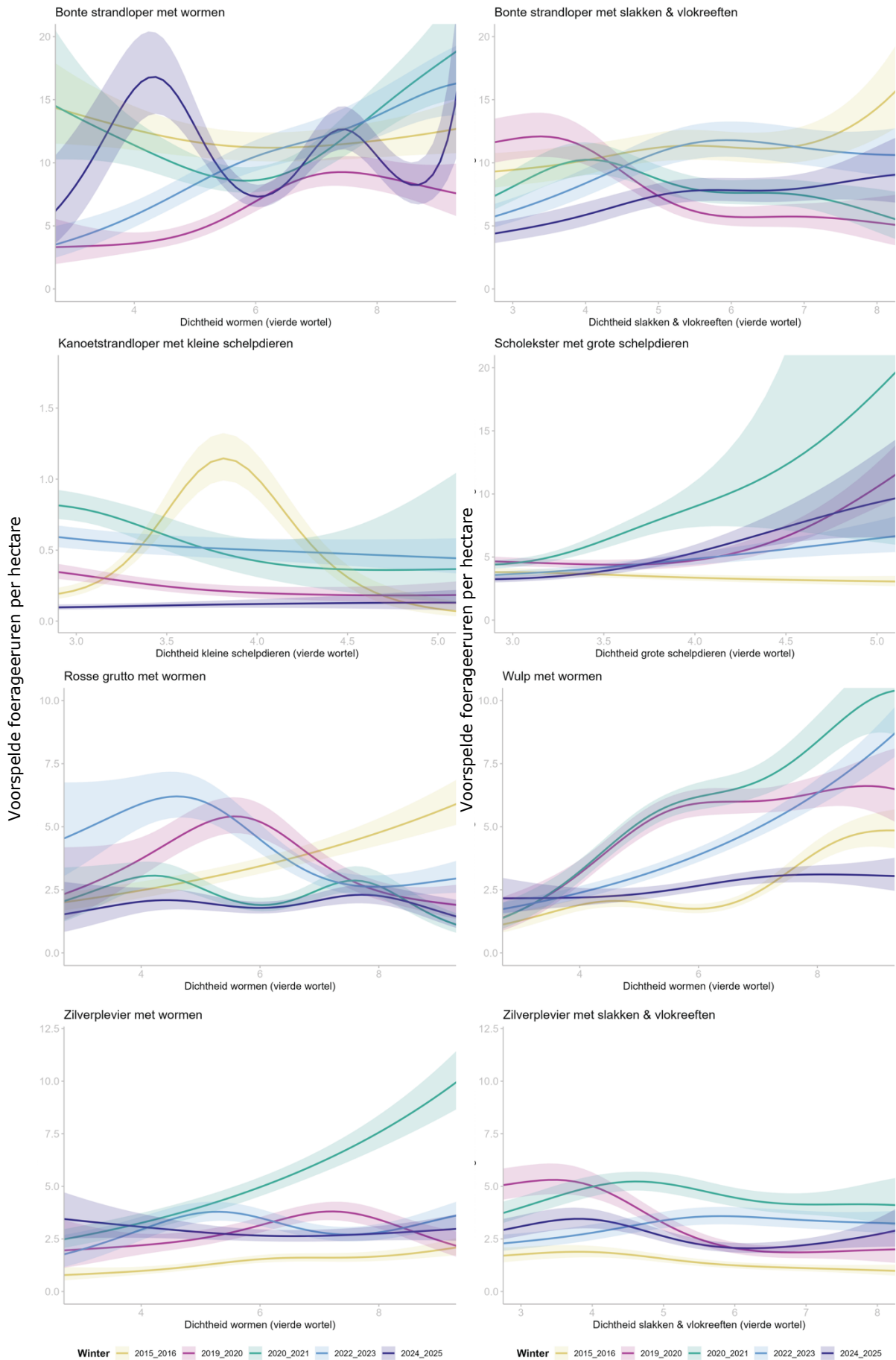
Figuur B3-26. Voorspelde foerageeruren per hectare, berekend aan de hand van de modeluitkomsten per soort, in relatie tot droogvalduur. De plots zijn gesorteerd op voorkomen van de soorten, de linker plot toont de soorten die talrijker zijn (bonte strandloper, rosse grutto en scholekster) en de rechter plot toont de soorten die iets minder talrijk zijn (kanoet, wulp en zilverplevier).

Voor de meeste soorten geldt dat een groter deel van de variantie werd verklaard door het model met specifieke voedselgroepen per soort, met uitzondering van de rosse grutto (*Tabel B3-4*). Voedsel was in alle modellen significant, maar de relatie tussen voedselbronnen en foerageertijd is niet bij alle soorten eenduidig (*Figuur B3-27*). Voor de scholekster en wulp vonden we een duidelijke positieve relatie tussen hun voedselbron en foerageeruren. Voor bonte strandloper lijken in de meeste jaren de wormdichtheid een grotere rol te spelen in de foerageeruren, met uitzondering van de winter van 2015-2016 en 2024-2025. In 2015-2016 was er juist een sterkere relatie met de dichtheid aan slakken en vlokreeftjes. Voor de kanoet lijkt de relatie tussen foerageeruren en kleine schelpdieren nagenoeg vlak met uitzondering van de winter van 2015-2016 waar een soort optimale dichtheid lijkt te zijn. Zo'n optimum lijkt er ook te zijn voor de rosse grutto voor 2 winters en is er enkel 1 winter een positieve relatie gevonden tussen wormdichtheid en foerageertijd. Ook bij de zilverplevier is enkel in de winter van 2020-2021 een duidelijk positieve relatie gevonden tussen wormdichtheid en foerageertijd in uren.

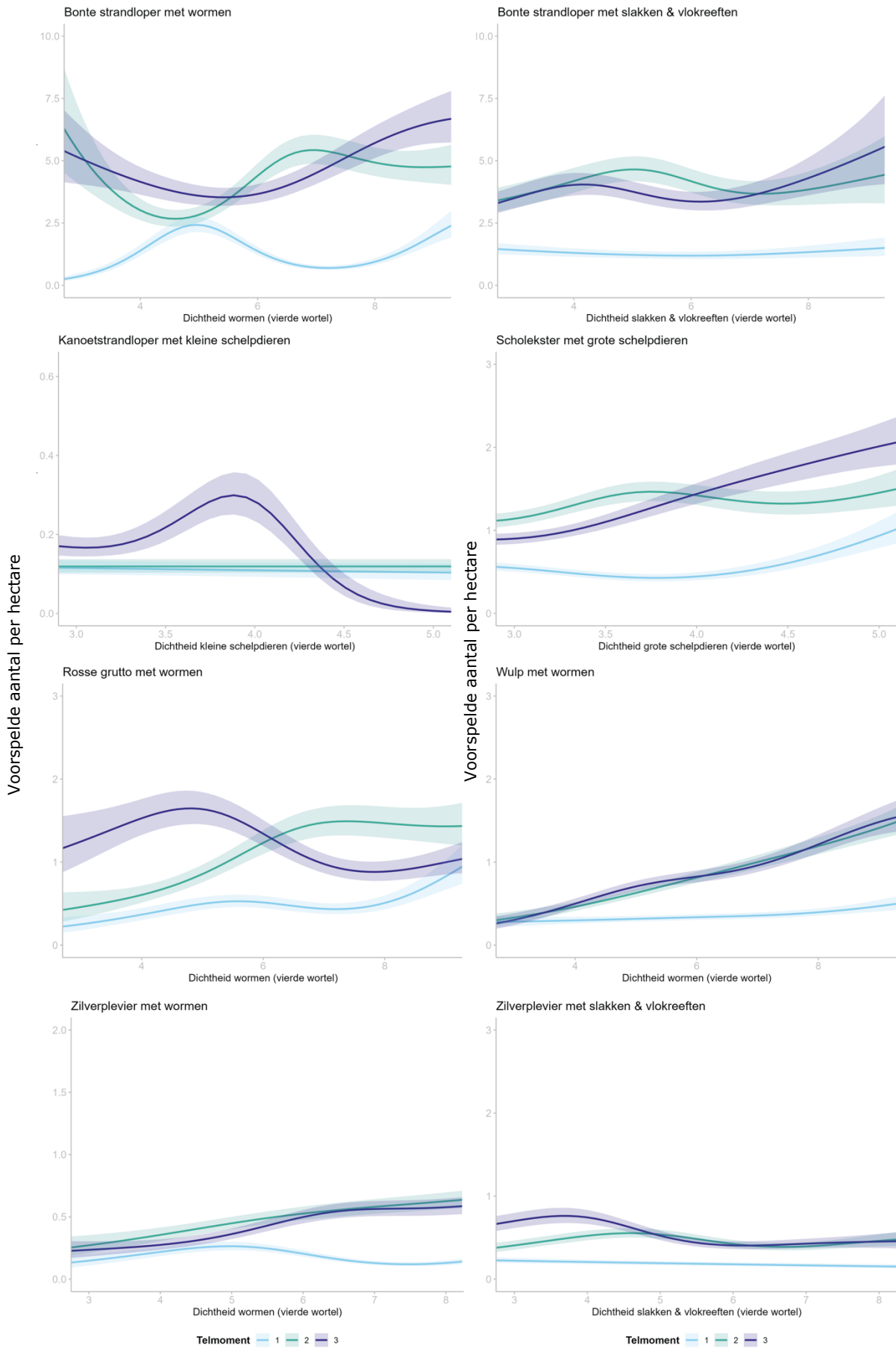
In de analyse van het totaal aantal steltlopers bleek dat er met name een sterke positieve relatie werd gevonden met voedsel en steltlopers in het tweede telmoment. Daarom maakten wij dezelfde plot, maar per telmoment (*Figuur B3-28*). Dit bleek ook het geval bij de meeste soorten het geval; bij veel soorten vinden we wanneer de resultaten worden opgesplitst in telmoment; voor veel soorten is er een (licht) positieve relatie met hun potentiële voedsel in het tweede en derde telmoment maar niet in het eerste telmoment wanneer nog weinig van de Roggenplaat droog ligt. Een duidelijke uitzondering is de kanoet, waarbij nog steeds geen positieve relatie is te vinden met kleine schelpdieren in het eerste en tweede telmoment (6-2 uur voor laagwater) maar er wel een piek is te zien in het derde telmoment bij een bepaalde dichtheid aan schelpdieren (*Figuur B3-28*).

Tabel B3-4. Modeluitkomsten per soort of soortgroep. Zie Tabel B3-1 voor de beschrijving van de verschillende modellen.

Soort	modeltype	Beschrijving	verklaarde variantie	R ²
Bonte strandloper	Model 1	Foerageeruren & droogvalduur	30,5%	0,196
	Model 2	Foerageeruren & waterlijn	33,1%	0,216
	Model 3	Dichtheid & droogvalduur	22,0%	0,146
	Model 4	Dichtheid & waterlijn	22,9%	0,161
Kanoetstrandloper	Model 1	Foerageeruren & droogvalduur	38,0%	0,215
	Model 2	Foerageeruren & waterlijn	33,1%	0,216
	Model 3	Dichtheid & droogvalduur	31,5%	0,197
	Model 4	Dichtheid & waterlijn	27,1%	0,148
Scholekster	Model 1	Foerageeruren & droogvalduur	31,5%	0,268
	Model 2	Foerageeruren & waterlijn	22,6%	0,205
	Model 3	Dichtheid & droogvalduur	19,7%	0,181
	Model 4	Dichtheid & waterlijn	14,5%	0,146
Rosse grutto	Model 1	Foerageeruren & droogvalduur	17,4%	0,138
	Model 2	Foerageeruren & waterlijn	15,4%	0,109
	Model 3	Dichtheid & droogvalduur	18,0%	0,099
	Model 4	Dichtheid & waterlijn	19,7%	0,064
Wulp	Model 1	Foerageeruren & droogvalduur	31,4%	0,247
	Model 2	Foerageeruren & waterlijn	27,1%	0,202
	Model 3	Dichtheid & droogvalduur	20,4%	0,176
	Model 4	Dichtheid & waterlijn	17,5%	0,169
Zilverplevier	Model 1	Foerageeruren & droogvalduur	38,2%	0,318
	Model 2	Foerageeruren & waterlijn	32,5%	0,277
	Model 3	Dichtheid & droogvalduur	27,1%	0,202
	Model 4	Dichtheid & waterlijn	25,7%	0,198
'Ruiters'	Model 1	Foerageeruren & droogvalduur	22,3%	0,291
	Model 2	Foerageeruren & waterlijn	22,9%	0,319
	Model 3	Dichtheid & droogvalduur	17,5%	0,209
	Model 4	Dichtheid & waterlijn	15,9%	0,204

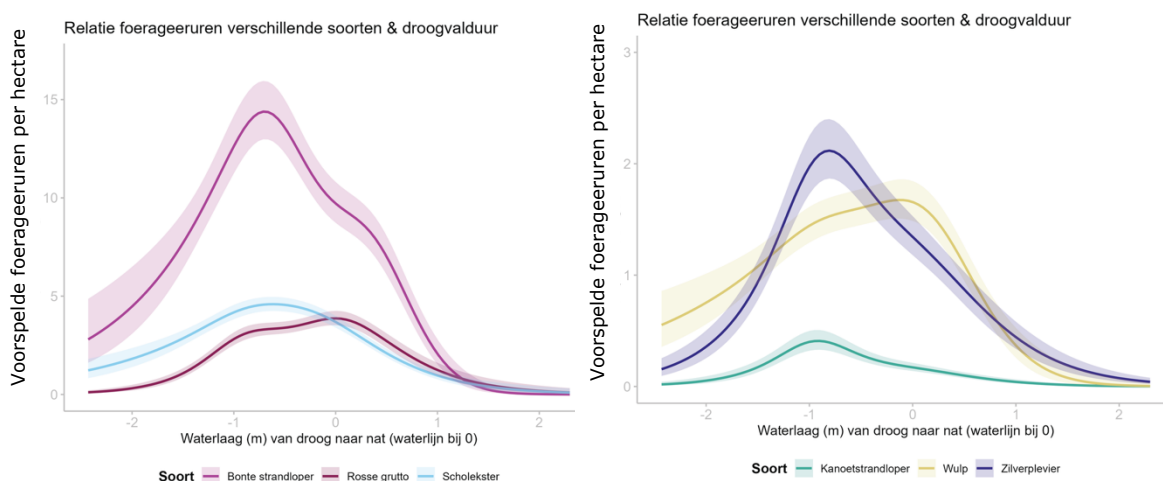


Figuur B3-27. Voorspelde foerageeruren per hectare, berekend aan de hand van de modeluitkomsten per soort, in relatie tot hun verwachte voedsel. Voor de bonte strandloper & zilverplevier zijn zowel wormen als slakken en vlokreeften gebruikt als potentiële voedselbron.



Figuur B3-28. Voorspelde dichtheid aan steltlopers per telmoment (1= 6-4 uur voor laagwater, 2 = 4-2 uur voor laagwater, 3= 2-0 uur voor laagwater), berekend aan de hand van de modeluitkomsten (model 3 uit Tabel B3-1), in relatie tot bodemdierdichtheid.

Ten slotte toonden alle soorten een duidelijke piek in foerageeruren ten opzichte van de waterlijn (*Figuur B3-29*). Wat opvalt is dat vier soorten vaker op grotere afstanden van de waterlijn te vinden zijn zoals de bonte strandloper, scholekster, kanoetstrandloper en zilverplevier. Deze vogels tonen een piek net boven de -1 m (dit betekent dat het deel van de Roggenplaat op dat moment rond de 1 meter boven de waterlijn ligt, de onzekerheid in de methode in ogenschouw nemend). Uit persoonlijke observaties van Deltamilieu Projecten blijkt wel dat de bonte strandlopers en kanoetstrandlopers vaak foerageren in plassen die blijven staan op de hogere delen van de plaat. De rosse grutto en wulp zitten daarentegen juist vaker op plekken rond de waterlijn; de piek in foerageeruren zit voor beide soorten rond de nul.



Figuur B3-29. Voorspelde foerageeruren per hectare per soort, berekend aan de hand van de modeluitkomsten (model 3 uit Tabel B3-1), in relatie tot de waterlijn.

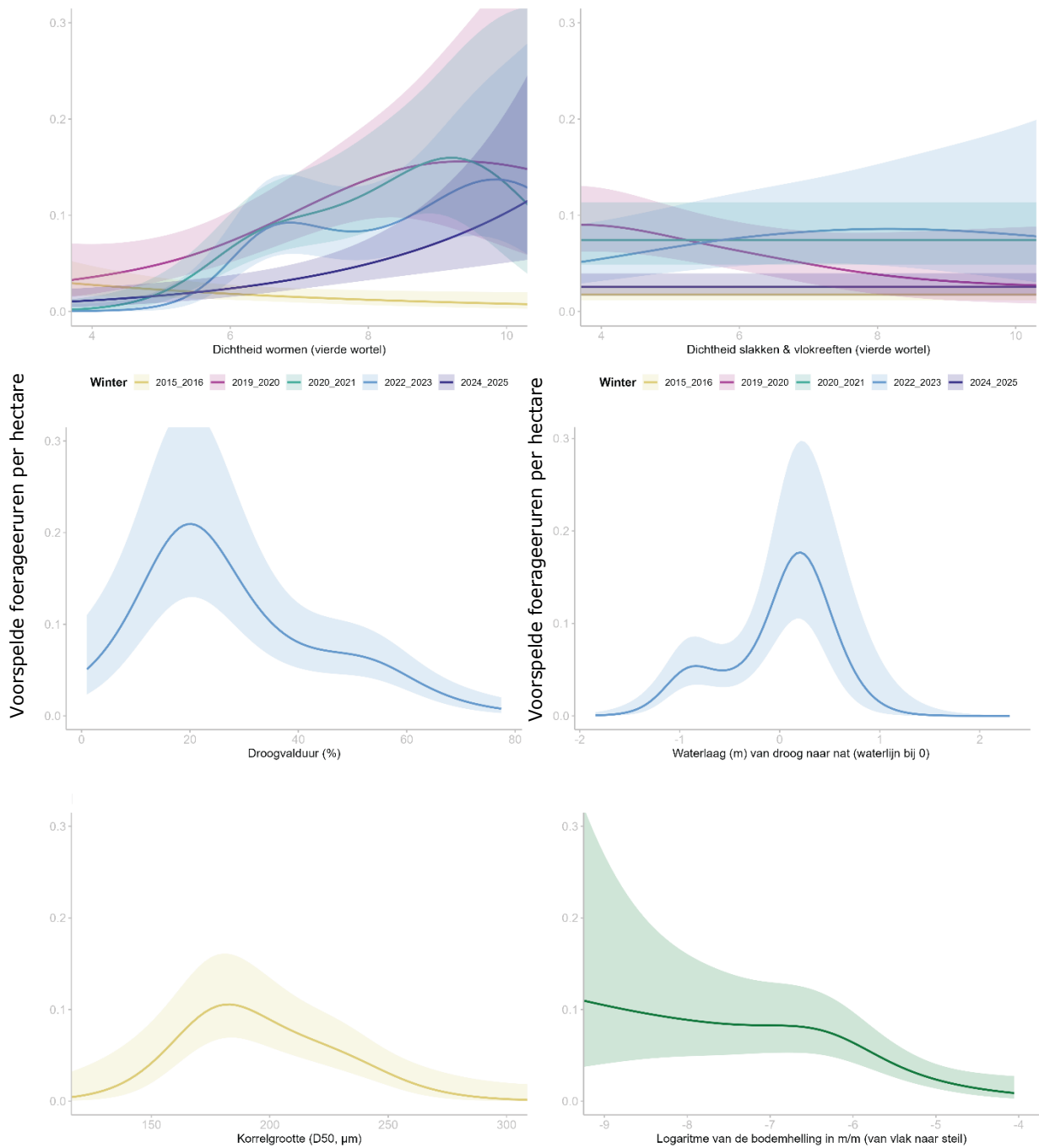
Verspreiding in relatie tot omgevingsfactoren voor ruiters: zwarte ruiters, groenpootruiter en tureluur

Het statistische model waarbij de foerageeruren van ruiters zijn gebruikt als responsvariabele en smooth termen voor meerdere omgevingsvariabelen en een factorvariabele voor het jaar van de winter toonde dat er een relatie is tussen verschillende factoren en foerageeruren van ruiters. De verklaarde variantie varieerde per model (zie *Tabel B3-4*). Er was een duidelijke positieve relatie tussen wormdichtheid en foerageeruren te zien, dit was significant in alle winters alhoewel er in de winter van 2015-2016 geen duidelijke relatie is gevonden. De relatie tussen foerageeruren en slakken & vlokreeften was enkel significant in de winters van 2019-2020 en 2022-2023 maar hier is een veel minder duidelijke relatie of geen relatie te zien (*Figuur B3-30*). De variabelen droogvalduur, korrelgrootte en bodemhelling hadden eveneens significante niet-lineaire effecten op het aantal foerageeruren ($p < 0.001$ voor alle drie de variabelen). De ruiters wijken af van de meeste andere vogelsoorten, foerageeruren zijn met name hoog rond een droogvalduur van 20%. Op de verspreidingskaarten is te zien dat bijvoorbeeld de zwarte ruiters nooit te zien is in de eerste telronde (*Figuur B3-18*) en ook de twee andere ruitersoorten zijn erg weinig waargenomen in de eerste telronde. Het kan zijn dat zij in deze periode op plekken zitten die moeilijk zijn waar te nemen (slenkjes en randen van geulen) of zij arriveren pas later in het getij op het moment dat habitat van hun voorkeur droog komt te liggen. In een ander model waarbij in plaats van droogvalduur de relatie tot de waterlijn is bekeken is te zien dat ruiters zich dicht bij de waterlijn of in een laagje water ophouden (*Figuur B3-30*). Hun relatie met korrelgrootte is meer vergelijkbaar met andere steltlopers en de piek aan foerageeruren ligt net iets onder de 200 μm . De foerageeruren waren iets hoger bij meer vlakke bodemhelling (*Figuur B3-30*).

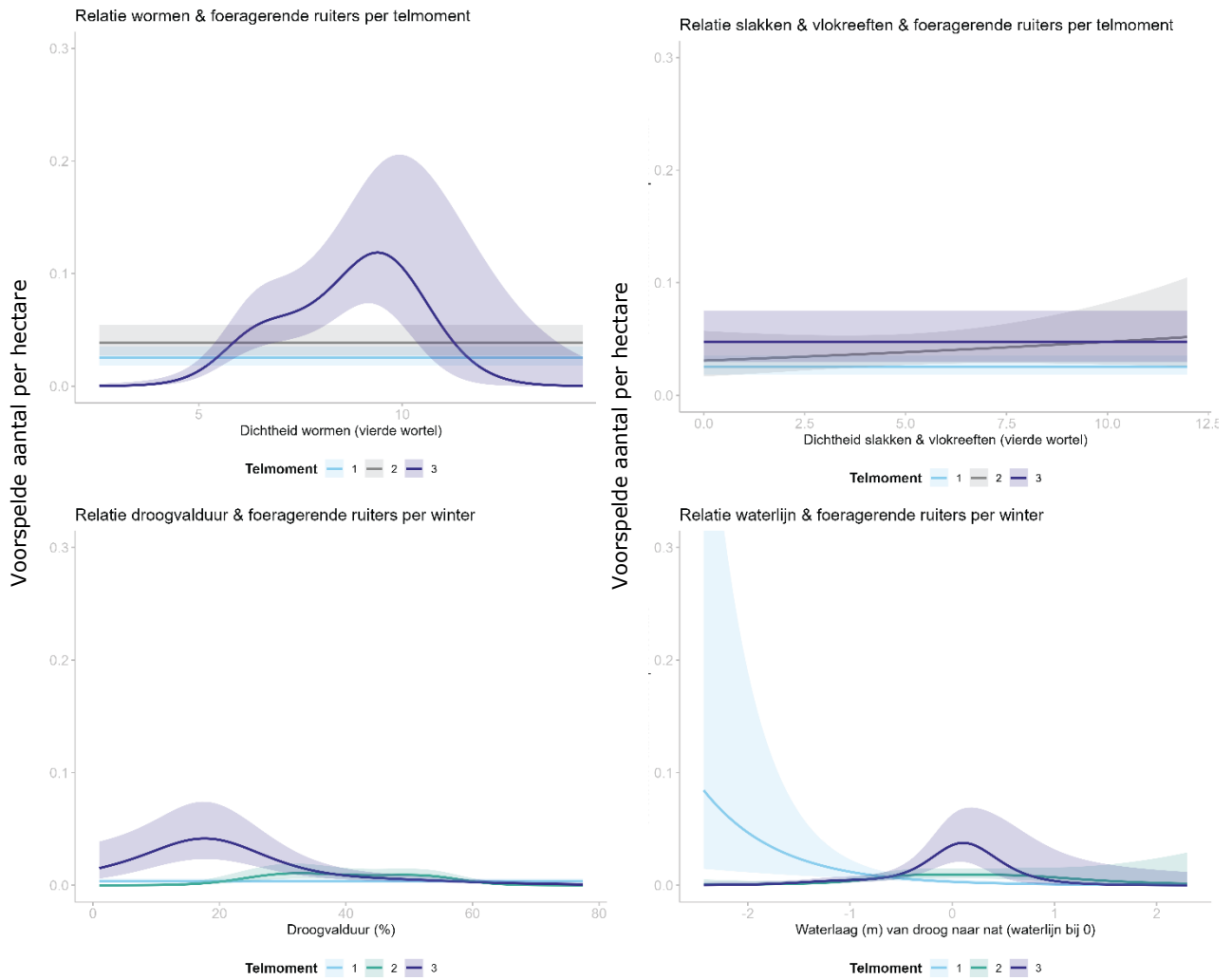
Uit het model waarbij dichtheid als responsvariabele werd gebruikt en telmoment als verklarende variabele bleek dat de relatie met voedsel afhankelijk is van het moment van tellen (

Figuur B3-34). Dit geldt alleen voor de relatie tussen dichtheid aan foeragerende ruiters en dichtheid aan wormen. We vinden enkel een duidelijke relatie tussen deze variabelen 2-0 uur voor laagwater. Uit deze modellen bleek dat ook droogvalduur anders gebruikt werd door het getij heen (

Figuur B3-34). Ook hier verschillen de ruiters sterk van andere soorten. Enkel in het laatste telmoment (2-0 uur voor laagwater) is er een duidelijke voorkeur voor een bepaalde droogvalduur. Dit geldt ook voor de relatie met dichtheid en waterlijn. Enkel in het laatste telmoment is er een duidelijke relatie waarbij ruiters de waterlijn en een laagje water opzoeken.



Figuur B3-30. Voorspelde foerageeruren per hectare van ruiters (zwarte ruiters, groenpootruiter en tureluur), berekend aan de hand van de modeluitkomsten, in relatie tot de variabelen gebruikt in het statistische model (model 1 uit Tabel B3-1).



Figuur B3-31. Voorspelde dichtheid aan ruiters per telmoment (1= 6-4 uur voor laagwater, 2 = 4-2 uur voor laagwater, 3= 2-0 uur voor laagwater), berekend aan de hand van de modeluitkomsten (model 3 en 4 uit Tabel B3-1, in relatie tot bodemdierdichtheid, droogvalduur en waterlijn).

B3.3.2. Kennisvraag 2: benutten van suppleties door vogels

Onderliggende kennisvraag vogels 2

Hoe worden de suppleties benut door benthos-etende vogels in vergelijking tot niet-gesuppleerde delen van de Roggenplaat?

Samenvattende beantwoording:

Zoals ook al duidelijk werd uit het ruimtelijk gebruik van de steltlopers, zijn de gesuppleerde delen direct na aanleg van de suppleties minder gebruikt, met name later in het getij (2-0 uur voor laagwater). Na enkele jaren nemen de totale tijd die vogels foerageren op de suppleties geleidelijk weer toe met name vanaf 2022, al blijven sommige suppleties achter zoals suppleties 1, 2 en 7 alhoewel aantallen fluctueren per jaar. Door de aanleg van de suppleties is de droogvalduur toegenomen, en daarom is een vergelijking met plekken op de Roggenplaats met vergelijkbare droogvalduur van belang. Deze vergelijking laat zien dat ook per droogvalduurklasse de totale foerageertijd weer toeneemt na aanleg op de gesuppleerde delen. De hogere gesuppleerde delen (60-70%) worden weer in vergelijkbare mate gebruikt in 2024, het gebruik van de lagere gesuppleerde delen (40-60%) neemt ook toe maar blijft nog steeds iets achter ten opzichte van niet gesuppleerde delen.

Wanneer specifiek wordt gekeken naar de winterdata en de zone tussen 40% en 70% droogvalduur en evenveel punten binnen en buiten gesuppleerde delen worden geselecteerd, blijft de totale foerageertijd op de gesuppleerde delen ook in deze analyse iets achter ten opzichte van de gesuppleerde delen. In deze analyse valt op dat de locaties die zijn gesuppleerd vóór aanleg al een lager gebruik door steltlopers en bergeend hadden in de winter. Dit verschil is verder opgelopen na de aanleg van de suppleties in de winter van 2020-2021 maar weer vergelijkbaar met voor aanleg van de suppleties in de winter van 2022-2023. De laatst gemeten winter (2024-2025) is de foerageertijd op gesuppleerde delen weer opvallend laag. De helft van de tellingen van de laatste winter vonden echter plaats bij relatief hoog water waardoor de Roggenplaat niet of nauwelijks droogviel gedurende 6-4 uur voor laagwater. De grotere verschillen in foerageertijd in deze winterperiode zijn mogelijk deels te verklaren doordat de suppleties vaker vroeg in het getij worden benut en minder laat in het getij, wat ook zichtbaar is op de verspreidingskaarten. Gezien de voorkeur van de meeste soorten voor fijner sediment zoals bijvoorbeeld bonte strandloper, kanoetstrandloper, rosse grutto en zilverplevier en het relatief grovere sediment op de suppleties (Bijlage 1), ligt het voor de hand de verklaring van het achterblijvende gebruik te zoeken in deze variabele. Desalniettemin is er een grote variatie in gebruik tussen suppleties, en was juist de foerageertijd in uren al vanaf 2022 weer hetzelfde als voor aanleg van de suppleties op twee suppleties met relatief grovere sedimenten (4 en 5). Deze suppleties liggen echter ook relatief hoog en worden veelvuldig gebruikt vroeg in de ebperiode. De precieze oorzaak van de verschillen hierin komen nog niet duidelijk uit deze analyse.

De totale foerageertijd in uren per suppletie lijkt voor veel suppleties min of meer hersteld ten opzichte van voor de suppleties (Figuur B3-32). Een uitzondering hier op zijn juist de dunnere suppleties 2 en 3. Aantallen op suppletie 7 en 4 schommelen het sterkst. De soortensamenstelling verschilt tussen de jaren, maar lijkt redelijk stabiel. Toch reageren de verschillende soorten verschillend op de suppleties.

Een gegeneraliseerd lineair gemengd model (GLMM) met een Tweedie-verdeling is uitgevoerd voor een selectie van soorten (bonte strandloper, kanoet, scholekster, rosse grutto, wulp, zilverplevier en tureluur) met enkel de gebieden die gesuppleerd zijn, voor en na de suppleties, om te analyseren of foerageertijd in uren veranderde tussen de jaren en tussen de suppletie-elementen. Ook is maand meegenomen als verklarende variabele. Voor alle soorten was jaar of de interactie tussen suppletie-element en jaar significant, behalve voor de wulp. Dit betekent dat de foerageertijd niet significant verschilde over de jaren vóór en ná suppleren voor de wulp. Voor soorten waarbij het effect van jaar of de interactie tussen jaar en suppletie significant was, is een posthoc toets uitgevoerd met behulp van pairwise vergelijkingen tussen jaren binnen suppleties. Hiervoor is de emmeans-functie gebruikt in combinatie met Tukey-correctie voor multiple testing, zodat kon worden vastgesteld tussen welke jaren de foerageertijd significant verschilde. Hieronder focussen we op de verschillen van de posthoc test tussen de jaren voor/tijdens de suppletie 2017,

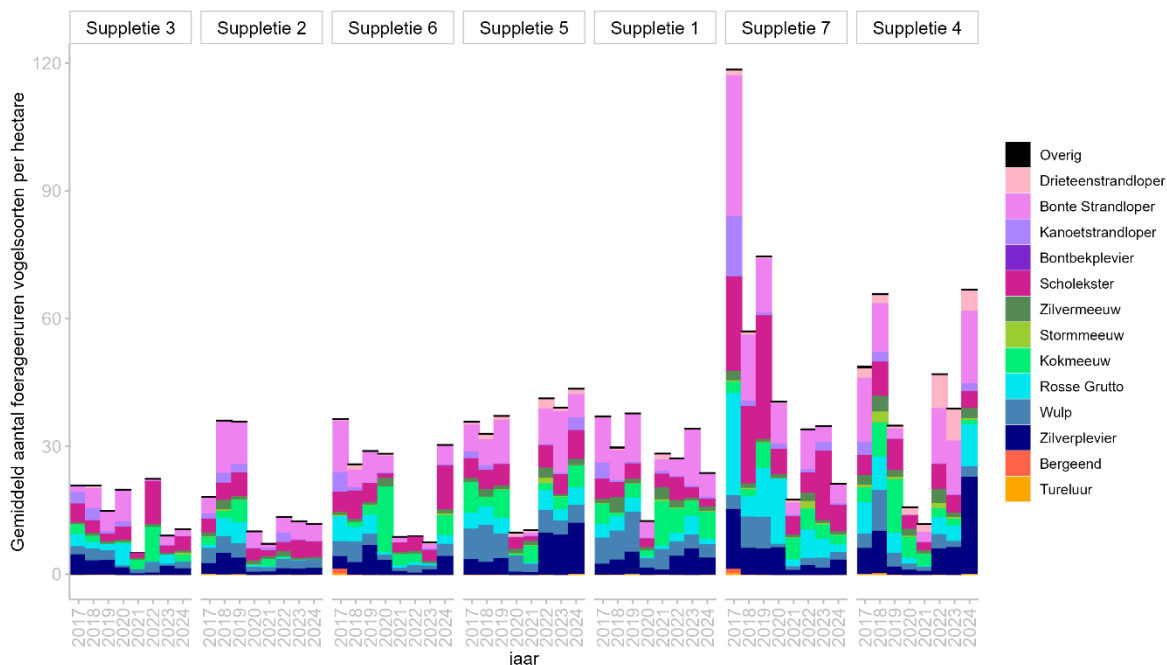
2018 en 2019 en de laatste twee jaar van meten 2023, 2024 omdat al bekend is dat het gebruik van suppleties lager was direct na suppleren.

Sommige soorten gebruiken de suppleties nog steeds een minder in de laatste 2 jaar (2023 en 2024) vergeleken met dezelfde plekken voor de suppleties (in 2017, 2018 of 2019) (Figuur B3-**33**). Dit geldt vooral voor de kanoet en rosse grutto, terwijl de tijd die de bonte strandloper en de wulp op de suppleties foerageert juist weer grotendeels gelijk blijft of juist significant hoger is. De significante afnames waren voor de kanoet lager voor suppletie 2 (2024 t.o.v. 2018), suppletie 3 (2023-2024 t.o.v. 2017 en 2018), suppletie 6 (2023 t.o.v. 2017), suppletie 7 (2024 t.o.v. 2017) en suppletie 4 (2023 t.o.v. 2017 en 2018), maar in 2024 was de foerageertijd significant hoger op deze suppletie vergeleken met 2019. Voor de rosse grutto was foerageertijd in uren lager op suppletie 2 (2024 t.o.v. 2018 en 2019 en 2023 t.o.v. 2019), 3 (2024 t.o.v. 2017 en 2018), 6 (2024 t.o.v. 2017) en 7 (2024 t.o.v. 2017) in 1 of meer jaren in 2023 of 2024. Verder was foerageertijd in uren lager voor de bonte strandloper op suppletie 7 (2023 en 2024 t.o.v. 2017), voor de zilverplevier op suppletie 6 (2023 t.o.v. 2017) en 7 (2023 t.o.v. 2017) en voor de tureluur op suppletie 3 (2024 t.o.v. 2019). Voor de andere jaar-combinaties en suppleties was geen significant verschil gevonden óf was er een significant positief verschil. Dit laatste gold voor de bonte strandloper op suppletie 1 (2023 t.o.v. 2017, 2018 en 2019) en 4 (2024 t.o.v. 2019), voor de kanoet op suppletie 4 (2024 t.o.v. 2019) voor de zilverplevier op suppletie 4 (2024 t.o.v. 2019).

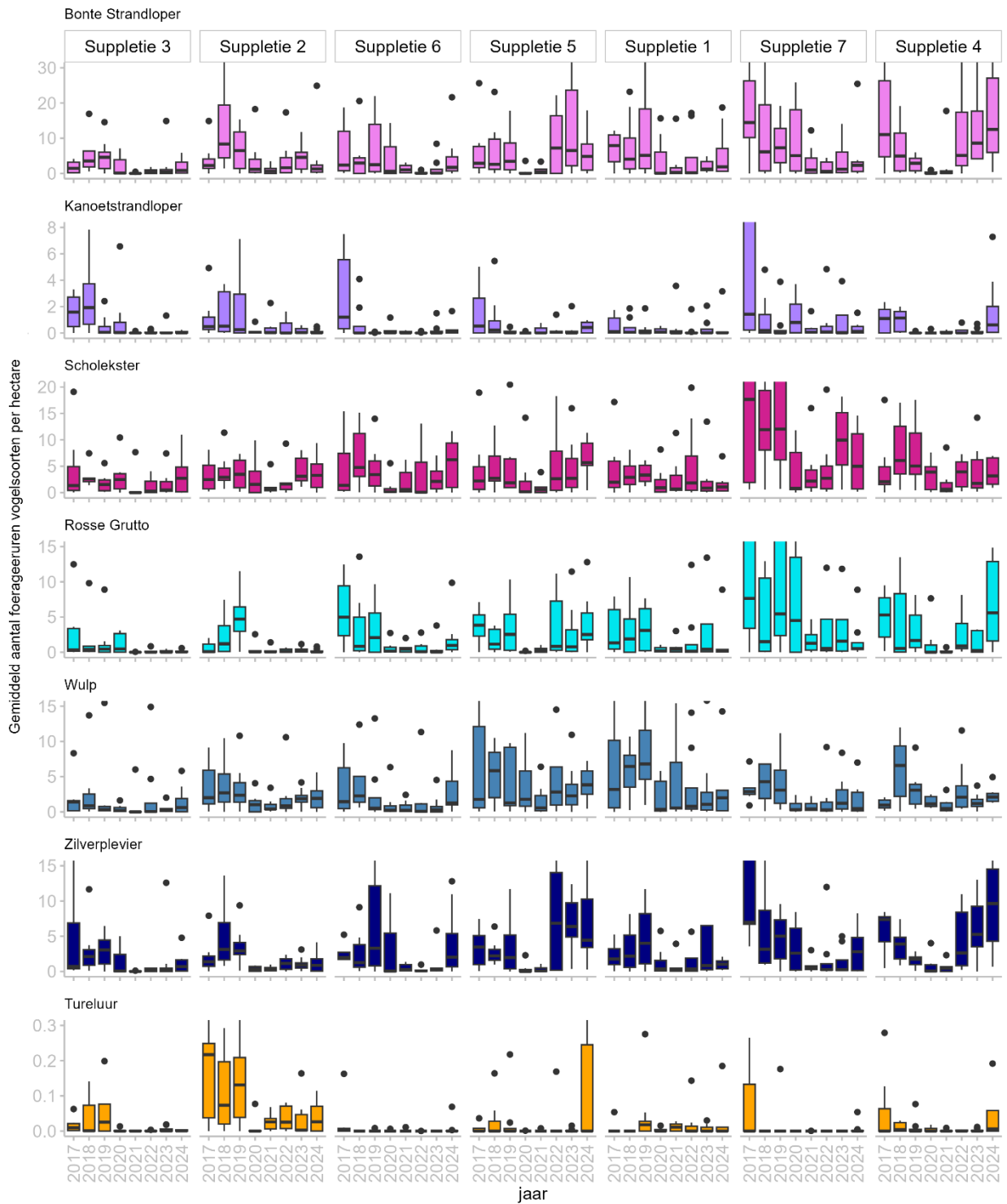
Wanneer de suppleties als geheel worden bekeken per droogvalduurklasse per jaar in stapjes van 10%, is er een zelfde soort patroon te zien vergeleken met de suppleties afzonderlijk (

Figuur B3-34). Voor deze vergelijking werd een lineair gemengd model (LMM) gebruikt om de invloed van suppleren, jaar en droogvalduurcategorie op de log-getransformeerde foerageertijd in uren te onderzoeken. Het model bevatte alle interacties tussen deze drie verklarende variabelen, en controleerde daarnaast voor maandelijkse variatie. Verder is een random intercept toegevoegd voor de ruimtelijke positie om rekening te houden met herhaalde metingen binnen dezelfde locaties. Met een posthoc test (gebruikmakend van het r-pakket emmeans) is vervolgens gekeken voor elk jaar en droogvalduurcategorie of de foerageertijd verschilde binnen en buiten de gesuppleerde delen. De p-waarden zijn gecorrigeerd met de **Bonferroni**-methode. De resultaten tonen dat er een duidelijker verschil in foerageertijd is te zien in de jaren vlak na de suppletie; 2020-2021 die niet te zien is voor de suppletie in 2019. In 2022 is de foerageertijd in de droogvalduurklasse van 60-70% weer vergelijkbaar met de niet gesuppleerde delen. Pas in 2024 is de foerageertijd in uren ook weer hoger in de gesuppleerde delen in de droogvalduurklassen 40-50% en 50-60%, maar nog steeds significant onder die van buiten de suppleties. In deze figuur zijn alle punten per jaar gebruikt, met uitzondering van de ene afwijkende meting in juni. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat er meer dan dubbel zoveel punten zijn meegenomen buiten de suppleties vergeleken met binnen de suppleties en alle maanden zijn samengenomen.

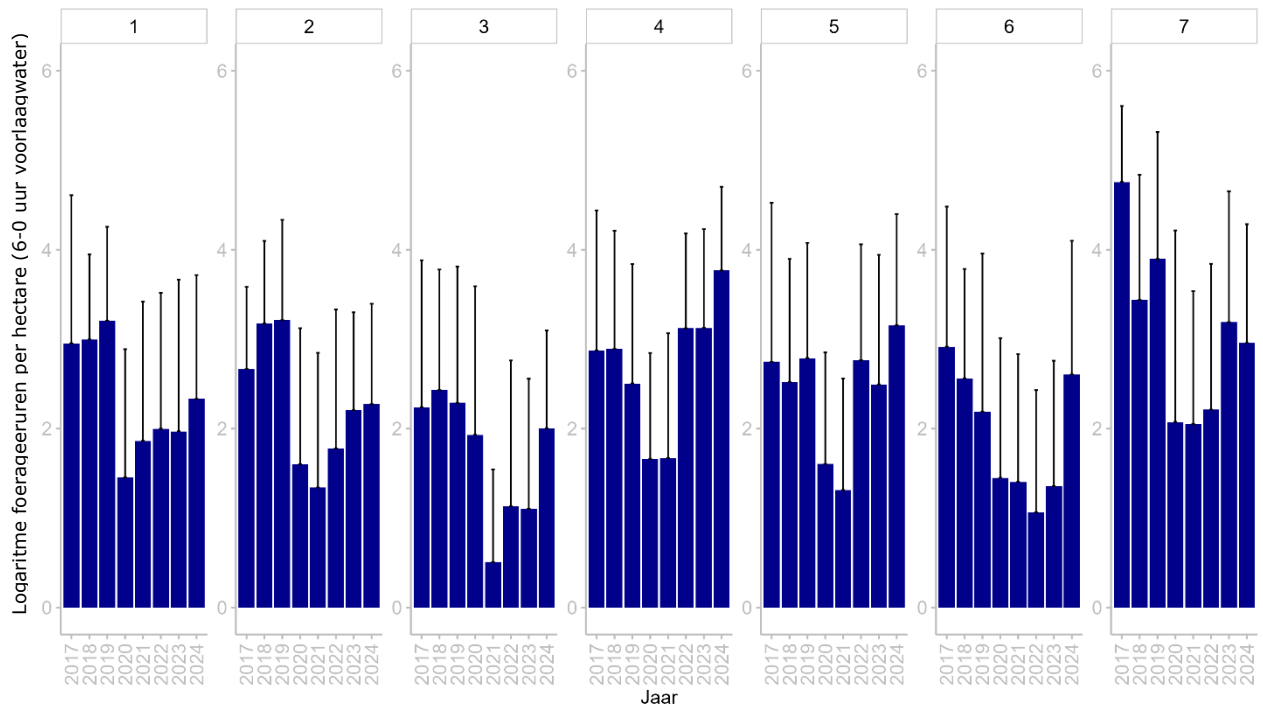
Om de verschillen binnen suppleties over de tijd te analyseren, werd een lineair model uitgevoerd om de invloed van suppletie-element en jaar op de log-getransformeerde foerageertijd in uren van alle steltlopers en bergeend te onderzoeken. Het model bevatte een interactie tussen suppletie-element en jaar en controleerde daarnaast voor maandelijkse variatie. Met een posthoc test (gebruikmakend van het r-pakket emmeans) is vervolgens gekeken voor elk jaar en droogvalduurcategorie of de foerageertijd verschilde binnen en buiten de gesuppleerde delen. De p-waarden zijn gecorrigeerd met de Bonferroni-methode. De resultaten tonen dat foerageertijd varieert over de jaren. Om de resultaten overzichtelijk te houden, zijn alleen de verschillen in foerageertijd in 2023 en 2024 met de andere jaren getoond. Uit de analyse bleek dat sommige suppleties nog niet terug zijn op gebruik voor aanleg van de suppleties: dit zijn suppletie 1 en 2. Sommige suppleties tonen een wisselend beeld, dit zijn suppleties 3 en 7. Deze suppleties hebben soms wel en soms niet een gelijk gebruik door vogels in 2023 of 2024 vergeleken met voor aanleg. Al deze 4 suppleties laten echter wel herstel zien, waarbij de jaren net na aanleg van de suppleties lagere foerageertijd laten zien dan in 2023 of 2024 of allebei. Sommige suppleties hebben een gelijke of zelfs hoger gebruik vergeleken met voor aanleg. Dit zijn suppleties 4, 5 en voor een deel 6 (Figuur B3-35, Tabel B3-5).



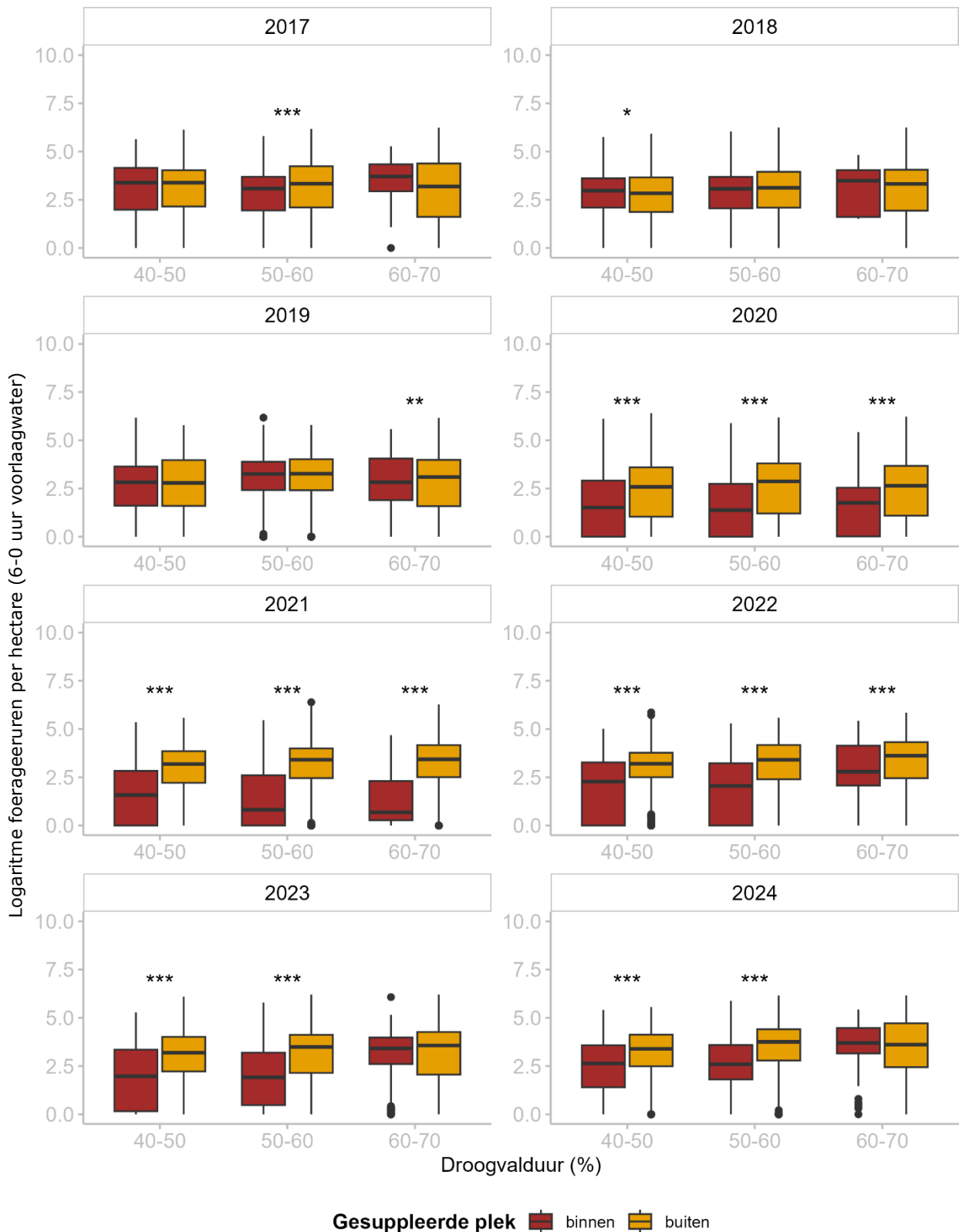
Figuur B3-32. Gemiddeld aantal foerageeruren per hectare van benthosetende soorten op de verschillende suppleties, geordend van de dunste naar de dikste suppletie. De suppleties vonden plaats aan het einde van 2019.



Figuur B3-33. Foerageeruren per hectare (6-0 uur voor laagwater) van een selectie soorten op de verschillende suppleties, geordend van de dunste naar de dikste suppletie. De suppleties vonden plaats aan het einde van 2019.



Figuur B3-34. Logaritme foerageeruren per hectare (6-0 uur voor laagwater) van steltlopers en bergeend in relatie tot droogvalduur in categorieën, bekeken voor plekken die gesuppleerd zijn en niet gesuppleerd zijn. Droogvalduur <40% en >70% zijn weggelaten omdat er daar in heel beperkte mate suppleties liggen. De ene meting in juni is weggelaten uit dit figuur. De ene meting in januari 2025 is samengevoegd met 2024. De y-as is aangepast zodat de figuur leesbaar is; er zijn erg veel uitschieters. Significante verschillen tussen gesuppleerde delen en niet gesuppleerde delen binnen een droogvalduurklasse en jaar zijn aangegeven met 1, 2 of 3 asterisken (p -waarde van <0.05, <0.01 of <0.001 respectievelijk).



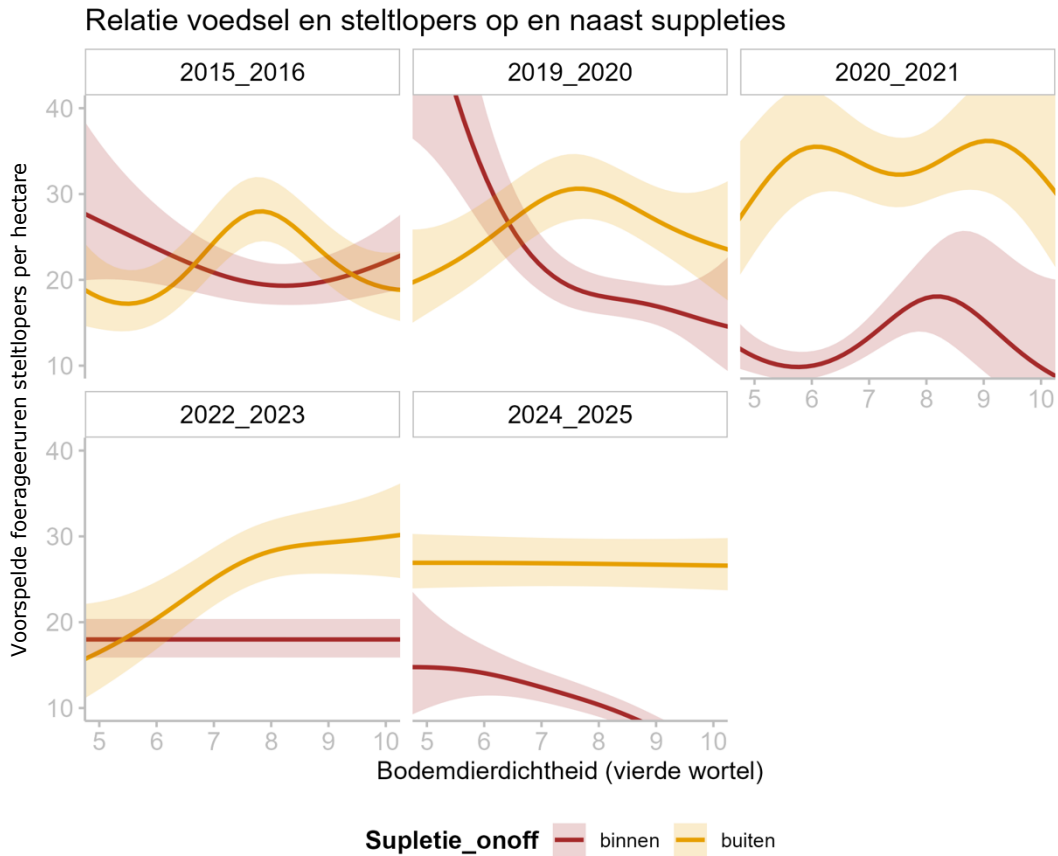
Figuur B3-35. Logaritme foerageeruren per hectare (6-0 uur voor laagwater) van steltlopers per hectare (steltlopers en bergeend) in relatie tot droogvalduur in categorieën, bekeken voor plekken die gesuppleerd zijn en niet gesuppleerd zijn. Droogvalduur <40% en >70% zijn weggelaten omdat er daar in heel beperkte mate suppleties liggen. De ene meting in juni is weggelaten uit dit figuur. De ene meting in januari 2025 is samengevoegd met 2024. De y-as is aangepast zodat de figuur leesbaar is; er zijn erg veel uitschieters. Significante verschillen tussen gesuppleerde delen en niet gesuppleerde delen binnen een droogvalduurklasse en jaar zijn aangegeven met 1, 2 of 3 asterisken (p-waarde van <0.05, <0.01 of <0.001 respectievelijk).

Tabel B3-5. Posthoc modeluitkomsten waarbij de foerageeruren van steltlopers over de jaren per suppletie-element werden vergeleken. Deze tabel toont enkel de statistische verschillen tussen de jaren met jaar 2023 en 2024. In de rode kolom zijn de jaren aangegeven met een significant hogere foerageertijd vergeleken met 2023 of 2024, in de groene kolom de jaren met een significant lagere foerageertijd en in de grijze kolom de jaren die niet significant verschilden vergeleken met 2023 of 2024. De jaren voor/tijdens de suppletie staan dikgedrukt.

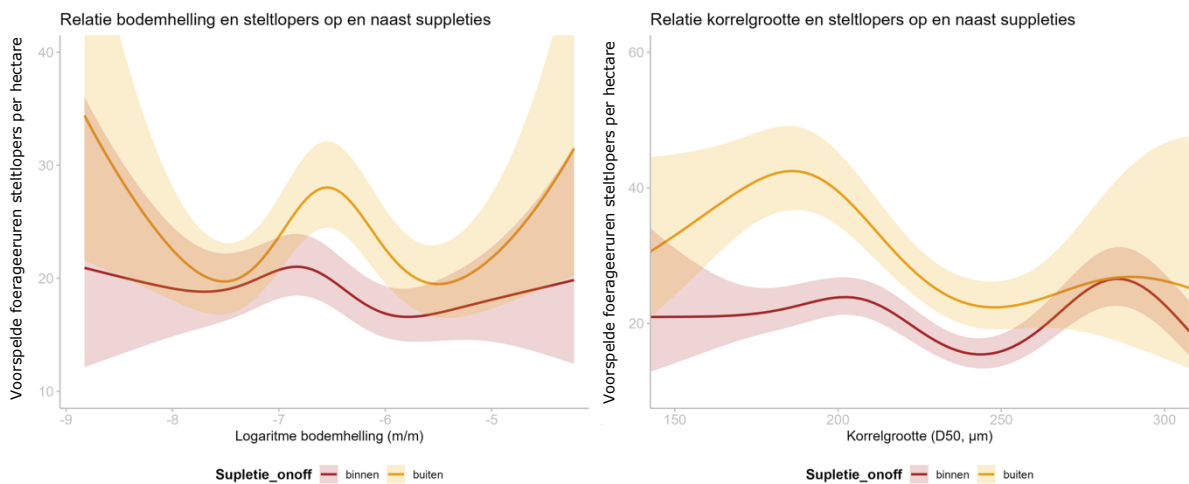
Suppletie-element	Jaar	Jaren met significant hogere foerageertijd	Jaren met significant lagere foerageertijd	Jaren met geen significant verschil
1	2023	2017, 2018, 2019 , 2024	2020	2021, 2022, 2024
	2024	2017, 2018, 2019	2020, 2021, 2023	
2	2023	2017, 2018, 2019	2020, 2021, 2022	2024
	2024	2017, 2018, 2019	2020, 2021, 2022	2023
3	2023	2017, 2018, 2019 , 2020, 2024	2021	2022
	2024	2018	2021, 2022, 2023	2017, 2019 , 2020
4	2023	2024	2019 , 2020, 2021	2017, 2018 , 2022
	2024		2017, 2018, 2019 , 2020, 2021, 2022, 2023	
5	2023	2017 , 2024	2020, 2021	2018, 2019, 2022
	2024		2017, 2018, 2019 , 2020, 2021, 2022, 2023	
6	2023	2017, 2018, 2019 , 2024		2020, 2021, 2022
	2024		2019 , 2020, 2021, 2022, 2023	2017, 2018
7	2023	2017, 2019	2020, 2021, 2022	2018, 2024
	2024	2017, 2019	2020, 2021, 2022	2018, 2023

Om te onderzoeken of de relatie met omgevingsvariabelen op de suppletie anders is dan naast de suppleties, is er ook een statistische analyse uitgevoerd met een selectie van de data waarbij enkel droogvalduurklassen 40-60% werden gebruikt en een selectie van de punten buiten de suppleties met vergelijkbare droogvalduur (zie methode, ook voor de gebruikte modellen). Het model waarbij de foerageertijd werd gerelateerd aan bodemdierdichtheid, bodemhelling, mediane korrelgrootte en de interactie van winter met op of naast de suppleties verklaarde 30% van variantie ($R^2 = 0,244$). De relatie met voedsel verschilt binnen en buiten de suppleties en is significant verschillend in alle winters behalve 2025-2026 (Figuur B3-36). Alhoewel er voor de geselecteerde punten buiten de suppleties enkel in de winters van 2015-2016, 2020-2021 en 2022-2023 een positieve relatie is gevonden tussen bodemdierdichtheid en foerageertijd, zien we op de suppleties enkel een positieve relatie in de winter van 2020-2021 en in de winter van 2019-2020 zelfs een negatieve relatie. Dit kan komen doordat de bodemdierbemonstering voor de suppleties plaatsvonden en de tellingen tijdens en na. De bodemhelling verschilt ook tussen de plekken binnen en buiten de suppleties, waarbij er binnen de suppleties geen significante relatie werd gevonden en buiten wel (Figuur B3-37). De geselecteerde punten buiten de suppleties tonen dezelfde relatie met bodemhelling als in de analyse met alle punten, terwijl er voor de punten op de suppleties geen relatie is gevonden. De relatie met korrelgrootte is voor beide groepen speelt deze variabele een significante rol en ze verschillen ook significant van elkaar (Figuur B3-37). Echter, komt de vorm van de curve wel min of meer overeen tussen de groepen. Wel is er een tweede piek te zien binnen de suppletie bij een hogere korrelgrootte. Hier moet wel worden opgemerkt dat de korrelgrootte op de suppleties een andere range heeft: binnen de suppleties loopt die tot ruim over de 300 μm terwijl er buiten de suppleties enkel waardes van $<275 \mu\text{m}$ zijn gevonden. Wat opvalt aan de modeluitkomsten is dat de foerageertijd per hectare op de suppleties lager is dan daarbuiten, alhoewel dit verschil al aanwezig was voor de suppleties (Figuur B3-38). Dit grote verschil is niet te zien wanneer alle punten binnen een droogvalduurklasse zijn gebruikt met alle meetmaanden samen zoals hierboven is gedaan (

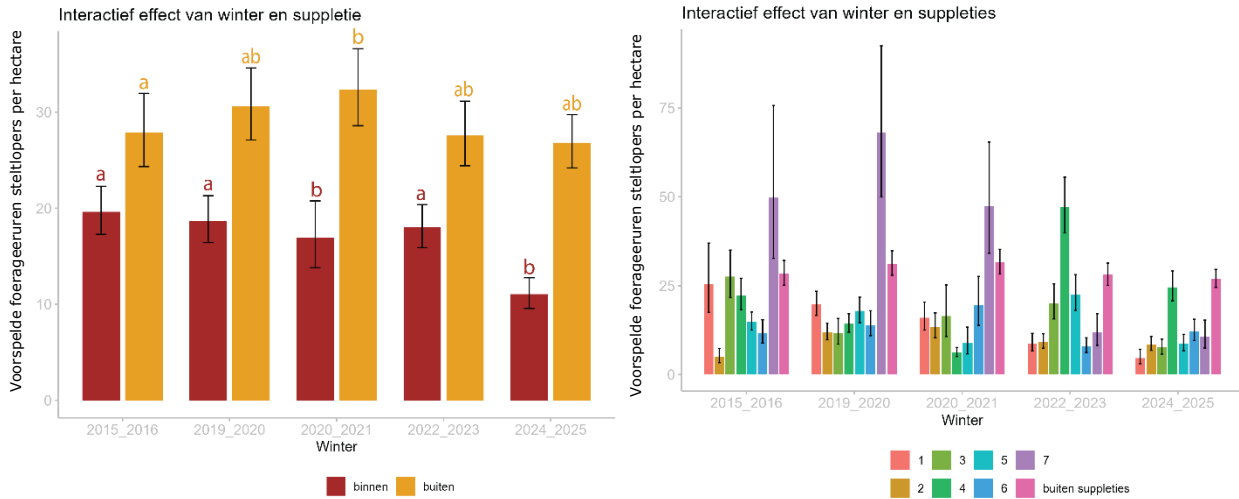
Figuur B3-34). Te zien is dat in de geanalyseerde winters de foerageertijd lager is op de suppleties, het verschil lijkt groter te worden na de suppleties en in de winter van 2022-2023 weer iets kleiner te worden. Echter is de laatste winter het verschil weer groter. Dit jaar heeft wel de minste observaties (4) waarvan 2 met extreem hoog water gedurende het eerste telmoment (6-4 uur voor laagwater). Wanneer er gekeken wordt naar de gesuppleerde delen apart, is te zien dat ook voor de suppleties een aantal suppletie-elementen een lage foerageertijd hadden in de winter. Suppletie 1, 3 en 5 hadden vergelijkbaar gebruik met de plekken buiten de suppleties. Suppletie 7 laat grote fluctuaties zien (grote standaarddeviatie). De foerageertijd varieert maar de foerageertijd per hectare op suppletie-elementen 3,4 en 5 is vaak vergelijkbaar met dat buiten de suppleties. In de laatste winter is er echter maar 1 suppletie op hetzelfde niveau. Hierbij moet gezegd worden dat binnen deze winter twee teldagen bevatte waarbij de eerste telperiode (6-4 uur voor laagwater) mist en de telling van januari 2025 maar weinig geteld is (hoogwater). De uitkomst laat wel zien dat de suppleties met name gebruikt worden in die eerste telperiode.



Figuur B3-36. Voorspelde foerageeruren steltlopers per hectare (6-0 uur voor laagwater), berekend aan de hand van de modeluitkomsten, in relatie tot de dichtheid aan bodemdieren en op de plek binnen of buiten de suppleties ligt, geplot per winter.



Figuur B3-37. Voorspelde foerageeruren steltlopers per hectare (6-0 uur voor laagwater), berekend aan de hand van de modeluitkomsten, in relatie tot de bodemhelling en korrelgrootte en op de plek binnen of buiten de suppleties ligt.



Figuur B3-38. Voorspelde foerageeruren steltlopers per hectare (6-0 uur voor laagwater), berekend aan de hand van de modeluitkomsten, per winter en op de plek binnen of buiten de suppleties ligt. Links alle gesuppleerde delen binnen de selectie samen en rechts per suppletie-element. In de linker afbeelding zijn ook de resultaten van de posthoc test getoond waarbij is gefocust op de verschillen in foerageertijd tussen de winters binnen de groepen, dus niet hoe foerageertijd tussen de gesuppleerde delen of niet gesuppleerde delen verschilt binnen winters. De suppleties vonden plaats in het najaar van 2019 en vallen dus binnen de winter van 2019-2020.

Bijlage 4 De ontwikkeling van de zeehondenpopulatie op de Roggenplaat tussen 2018 en 2022

B4.1 Opbouw hoofdstuk

Dit hoofdstuk presenteert de tellingen van zeehonden die sinds 2018 zijn uitgevoerd op de Roggenplaat in het kader van de MWTL maandelijkse (vliegtuig)zeehondentellingen en maakt de vergelijking met overige tellingen uitgevoerd in de Oosterschelde. Het doel van dit hoofdstuk is om antwoord te geven aan onderstaande evaluatie vraag

Evaluatievragen:

- 1.-Hoe ontwikkelt de zeehondenpopulatie zich op de Roggenplaat sinds 2018 op de Roggenplaat (in vergelijking met de Oosterschelde populatie)

B4.2 Methodologie

Om te onderzoeken hoe de zeehondenpopulatie zich op de Roggenplaat ontwikkelt t.o.v. de trends in de gehele Oosterschelde en Delta is gebruik gemaakt van MWTL maandelijkse vliegtuig-zeehondentellingen (opgenomen in het biologisch monitoring programma van de Zoute Rijkswateren) vanaf 2015, zie Walles et al. (2021b).

De zeehondentellingen op de Roggenplaat bestaat uit zes locaties (Middengeul, Westgeul, Oliegeul, Oude oliegeul, Roggenplaat West, Roggenplaat Oost). Omdat een groot aantal tellingen ontbreken voor de laatste vier locaties, zijn slechts de tellingen uit de Middengeul en Westgeul meegenomen voor deze analyse. Om de tellingen van de Roggenplaat (Middengeul en Westgeul) te vergelijken met de rest van de Oosterschelde zijn de volgende zes tellocaties geselecteerd waarvan voldoende tellingen beschikbaar zijn voor vergelijking: Galgeplaat, Neeltje Jans, Neeltje Jansplaat, Stormvloedkering zeezijde, Werkeiland Neeltje Jans en Yerseke Noordergaatje.

B4.3 Evaluatie ontwikkeling zeehondenpopulatie

In deze paragraaf staat onderstaande evaluatievraag centraal.

Evaluatievraag zeehonden 1

Hoe ontwikkelt de zeehondenpopulatie zich op de Roggenplaat sinds 2018 (in vergelijking met de Oosterschelde populatie)?

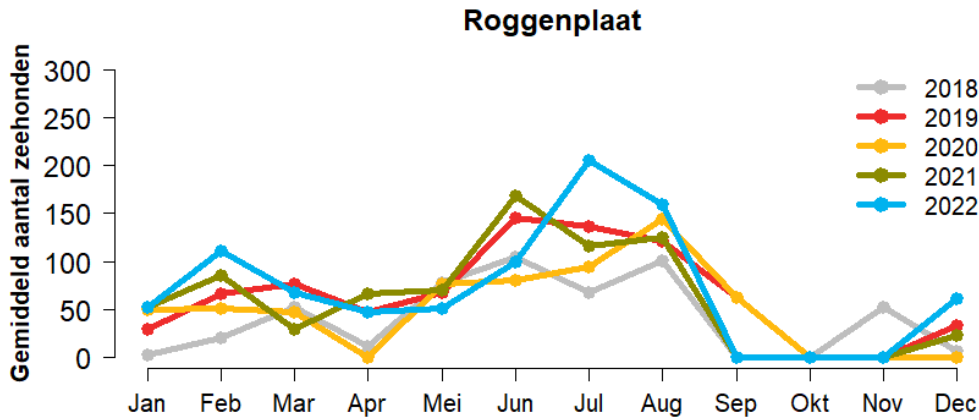
Samenvattende beantwoording:

Zeehonden tonen een duidelijke seizoenvariatie aan met hogere aantallen op de Roggenplaat tussen juni en augustus. Er is geen duidelijke jaarlijkse trend gevonden in de hoogte van deze zomerwaarden mogelijk in verband te brengen met de aanleg van de suppleties. De verschillen tussen de Roggenplaat en de rest van de Oosterschelde op basis van maandelijkse dan wel jaarlijkse gemiddelden in zeehonden aantallen zijn niet significant verschillend.

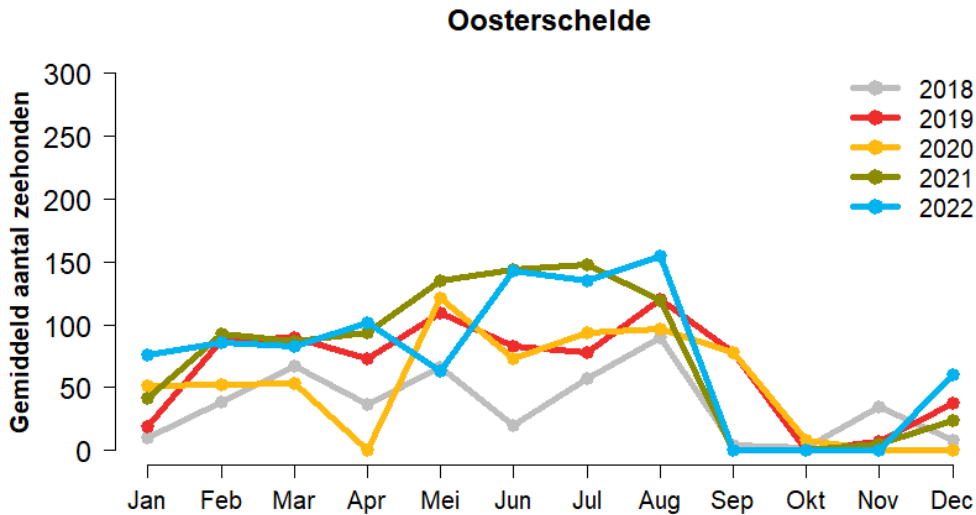
Op de Roggenplaat zoals in de rest van de Oosterschelde bestaat de zeehondengemeenschap vooral uit gewone zeehond waarbij de grijze zeehond, af en toe wordt waargenomen op de Galgeplaat. Daardoor zijn onderstaande resultaten exclusief gebaseerd op de tellingen van gewone zeehonden.

De tellingen tonen een duidelijke seizoenvariatie aan met hogere aantallen zeehonden op de Roggenplaat tussen juni en augustus (Figuur B4-1). Er is geen duidelijke jaarlijkse trend in het maandelijkse gemiddelde aantal zeehonden geteld op de Roggenplaat.

De zomerpiek in aantal zeehond is minder geaccentueerd (vlakker) in de Oosterschelde dan op de Roggenplaat (Figuur B4-2) maar de verschillen tussen de Roggenplaat en de Oosterschelde op basis van maandelijkse dan wel jaarlijkse gemiddelden zijn niet significant verschillend.



Figuur B4-1. Trend van het gemiddeld aantal zeehonden per maand op de Roggenplaat tussen 2018 en 2022. De waarden zijn gebaseerd op maandelijkse tellingen.



Figuur B4-2. Trend van het gemiddeld aantal zeehonden per maand in de Oosterschelde over de periode 2018 tot en met 2022. De waarden zijn gebaseerd op maandelijkse tellingen.

Bijlage 5 Effect van het 'primen' op de herkolonisationsnelheid van een suppletie

Onderliggende kennisvraag voedselbeschikbaarheid voor vogels 3

Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie met een levende bodemdiergemeenschap?

Samenvattende beantwoording:

Kennisvraag 3.1: Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie met gebiedseigen sediment en een (gedeeltelijk) levende bodemdiergemeenschap ('priming')?

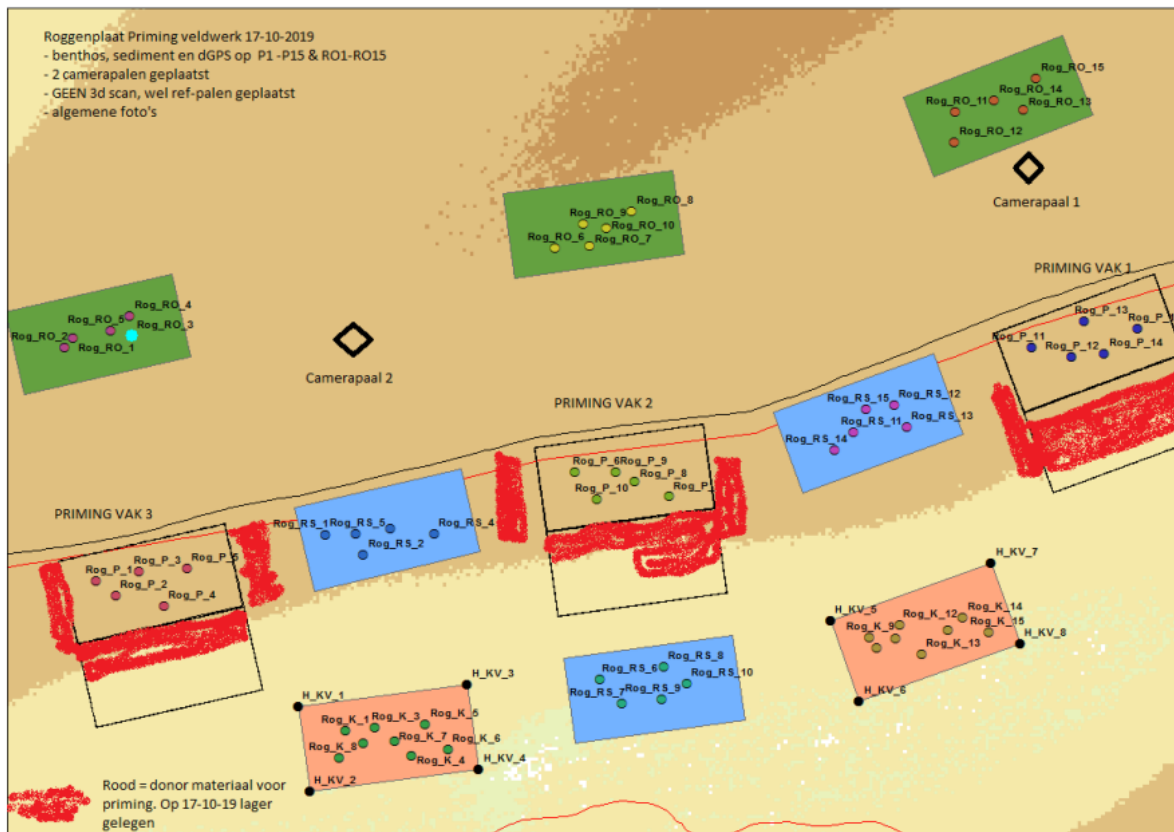
Priming met sediment afkomstig van de Roggenplaat zelf (inclusief aangetast en verstoord bodemleven) versnelt de herkolonisatie. Een jaar na aanleg zijn de soortendichtheden hoger op de geprimeerde locaties dan op suppleties zonder priming (zie Figuur B5-2). Het aanbrengen van gebiedseigen sediment tijdens het primen leidt bovendien tot fijner sediment, wat een waarschijnlijk een positief effect heeft gehad op het herstel van de bodemdiergemeenschap.

Kennisvraag 3.2: Kan de herkolonisationsnelheid van een suppletie bevorderd worden door het 'primen' van de suppletie met het transplanteren van kokkels ('kokkelpriming')?

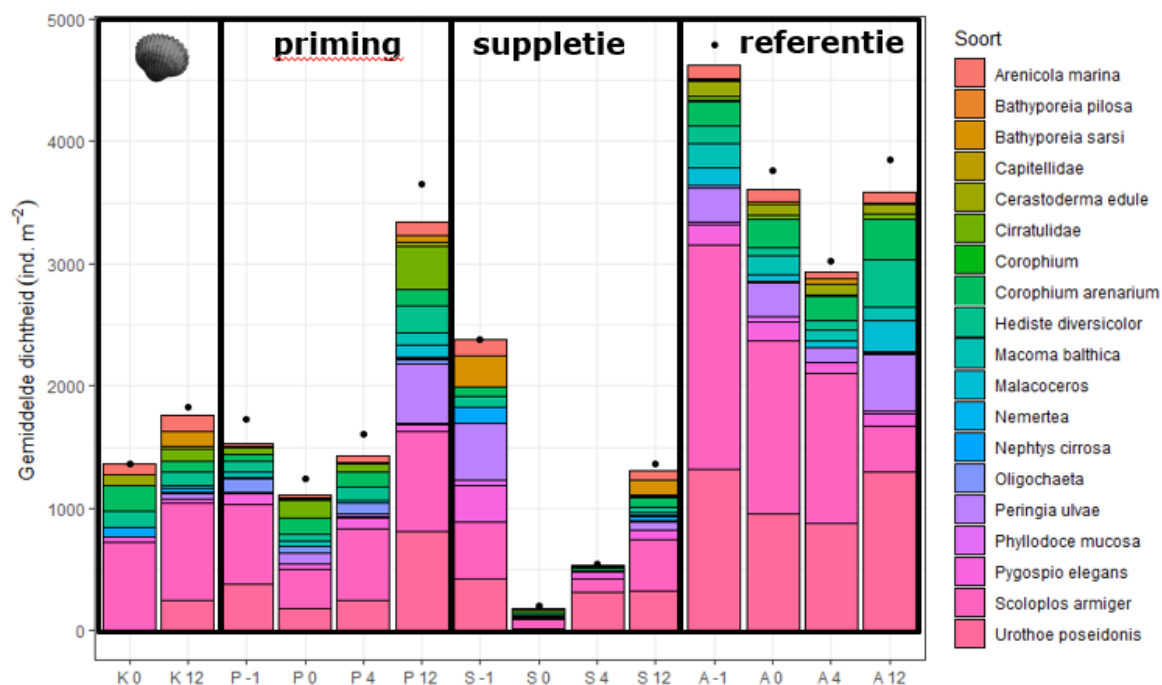
Kokkelpriming resulteert direct na aanleg, net als priming met eigen sediment, in hogere dichtheden en een grotere diversiteit dan op de 'kale' suppletie. Echter een jaar later na aanleg is het verschil tussen kokkelpriming en de suppletie zonder priming echter zeer beperkt (Figuur B5-2). Kokkelpriming lijkt daarmee geen geschikte manier van priming.

In totaal werden elf vakken van 50x100 m afgebakend: acht op suppletie S2 en drie erbuiten (Figuur B5-1). Op de suppletie zijn drie vakken 'geprimeerd' met gebiedseigen sediment (inclusief bodemleven) (P), twee vakken geprimeerd doormiddel van het uitstrooien van kokkels (K) en drie vakken hebben als controle geen priming ondergaan (S).

De drie vakken buiten (100 m ten noorden) de suppletie (A) dienen als referentie t.o.v. de suppletie met of zonder priming. Het bodemleven is een maand vooraf en vervolgens een week, 4 maanden, 7 maanden en een jaar na aanleg van de suppletie bemonsterd. Een volledige beschrijving van de werkzaamheden en bemonsteringsmethoden is weergegeven in Walles et al. (2021b).



Figuur B5-1. Overzicht bemonstering priming bij het suppletie element S2. Zwartomlijnde vakken geven priming vak 1, 2 en 3 weer met per vak 5 monsterlocaties. Groene en blauwe vakken zijn referentievakken buiten de suppletie (groen) en op de suppletie (blauw) met in elk vak 5 monsterlocaties. In de roze vakken zijn kokkels aangebracht op het gesuppleerde sediment afkomstig uit de winplaats. Hier bevinden zich 8 monsterlocaties per vak. De rode gebieden geven aan waar het materiaal voor de priming met gebiedseigen materiaal afkomstig van was (uit Walles et al., 2021b).



Figuur B5-2. Gemiddelde dichtheid van dominante bodemdieren soorten (op basis van vier monsters per tijdstip) in de vier behandelingen Kokkels (K), Priming (P), Suppletie (S) en Referentie (A) op verschillende tijdstippen in maanden ten opzichte van de suppletie aanleg: -1, 0, 4 en 12 maanden: P-1, een maand vóór de aanleg en P0, P4, P12 een week, 4 maanden en 12 maanden na de aanleg in de priming vakken.

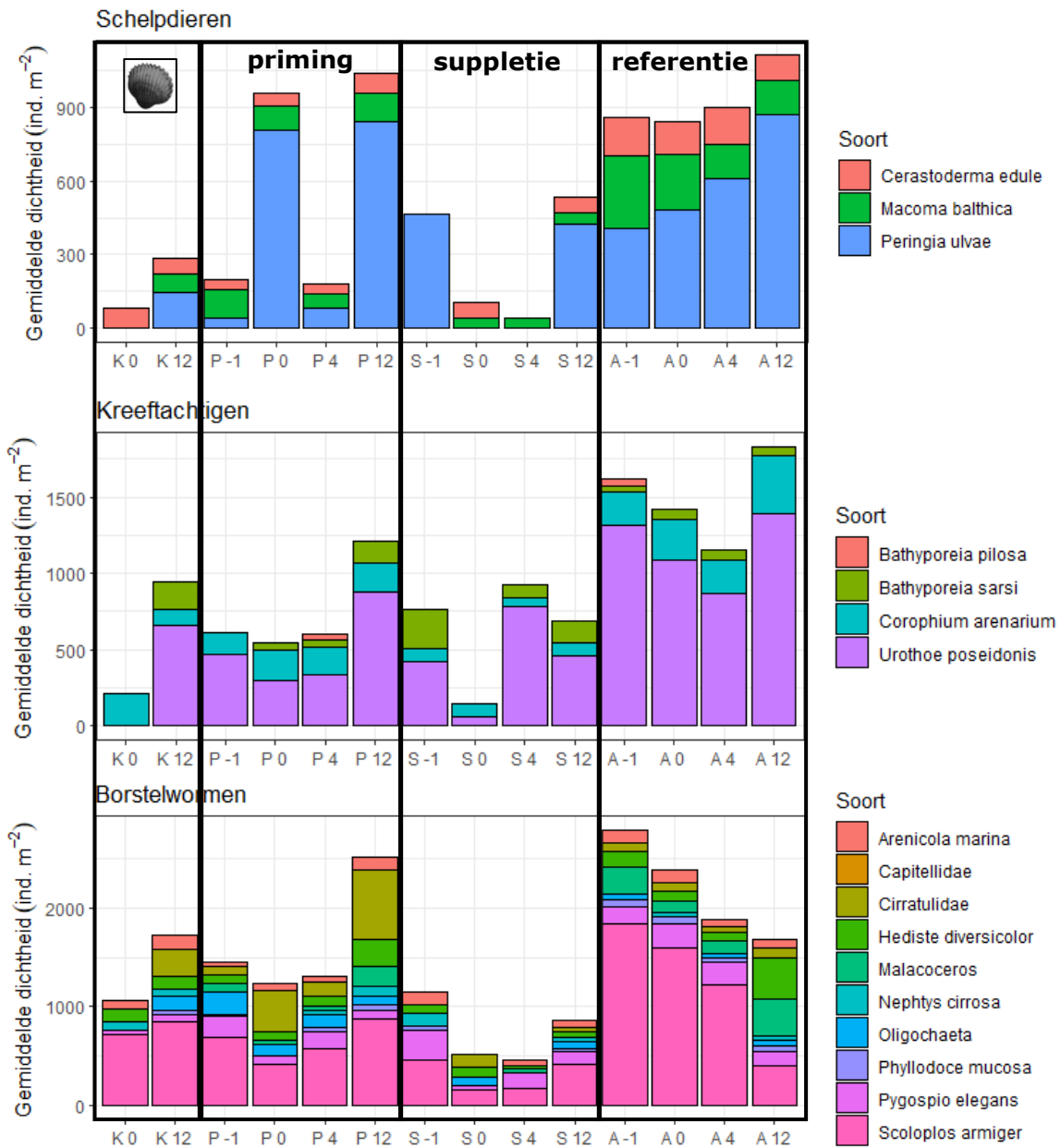
Voor vrijwel alle groepen nemen borstelwormen het grootste aandeel van de benthos dichtheden in beslag (Figuur B5-2). De 'priming' en 'suppletie' gebieden tonen een maand vóór de aanleg (P-1 en S-1) beduidend lagere dichtheden dan de 'referentie' gebied wat vragen roept over de geschiktheid van de referentie. Na het uitvoeren van de suppletie (tussen T_{-1} en T_0) nemen de dichtheden van alle soorten enorm af op de kale suppletie (S). Pas na 12 maanden is er weer een geleidelijke toename in de bodemdieren dichtheid te zien. Het aanbrengen van gebiedseigen sediment inclusief bodemleven (primen) of van kokkels op het gesuppleerde sediment voorkomt de sterke afname in bodemdieren dichtheden zoals waargenomen op de kale suppletie (Figuur B5-2). Al hoewel dit wel goed te begrijpen is voor de priming, is dit zeker onverwacht voor de kokkelbehandeling. Immers, zoals verwoord in de memo van Boskalis (Wallis et al, 2021b), er zijn alleen kokkels uitgestrooid op de kale gesuppleerde bodem na aanleg van het suppletie element 2. In ieder geval liggen de bodemdierendichtheden een jaar na de aanleg duidelijk hoger op de geprimeerde vakken dan op de kale suppletie of de kokkel behandeling. Het aanbrengen van sediment tijdens de priming zorgt ook voor het fijner worden van het sediment wat, naast het inenten met organismen een positief effect kan hebben op het herstel van de bodemdierengemeenschap. Bij de priming met gebiedseigen sediment is een jaar na aanleg de bodemdierendichtheid toegenomen tot dezelfde orde-grootte in vergelijking tot de referentievakken buiten de suppletie.

De grafieken van dichtheden in de bodemdiersoorten gegroepeerd per taxonomische klassen in Figuur B5-3 laat het toe om de respons van de individuele soorten op de behandelingen beter te volgen. De referentielocaties laten grote veranderingen in dichtheid zien die vooral veroorzaakt zijn door een afname van twee soorten de wapenworm, nl. *Scoloplos armiger* over de hele periode (-1 tot 12 maanden t.o.v. de aanleg) en het vlokreeftje *Urothoe poseidonis* tussen t_{-1} en t_4 (Figuur B5-3). Vervolgens neemt de dichtheid van het vlokreeftje weer toe tussen t_4 en t_{12} zoals die van de zeeduizendpoot (*Hediste diversicolor*). Het wadslakje *Peringia ulvia* neemt juist toe over de hele periode in de referentievakken.

Veel soorten, waaronder het wadslakje *Peringia ulvae*, het kniksprietkreeftje *Bathyporeia* en de wadpier *Arenicola marina* zijn compleet verdwenen na de aanleg (tussen T_{-1} en T_0) op de suppletie (S) worden weer waargenomen een jaar na de aanleg (T_{12} , Figuur B5-3). De dichtheid van het vlokreeftje *Urothoe poseidonis* is vier maanden na de aanleg toegenomen en komt dan zelfs in hogere aantallen voor dan voor de aanleg. Tussen 4 en 12 maanden na de aanleg neemt het aantal soorten op de suppletie weer toe met het grootste aandeel aan de benthos dichtheid vertegenwoordigd door het wadslakje (*Peringia ulvae*), het vlokreeftje (*Urothoe poseidonis*) en de wapenworm *Scoloplos armiger*.

Op de vakken met de kokkelbehandeling, zit de wapenworm *Scoloplos armiger*, reeds aanwezig op T_0 , twaalf maanden later (T_{12}) grofweg in dezelfde dichtheid (Figuur B5-3). Overigens ligt de aanwezigheid van de wapenworm in dezelfde orde-grootte dan bij de andere behandelingen. Naast de wapenworm bestaat de bodemdieren gemeenschap op de kokkelpriming vakken twaalf maand na de aanleg voornamelijk uit het vlokreeftje *Urothoe poseidonis*, het wadslakje (*Peringia ulvae*) en natuurlijk de kokkel (*Cerastoderma edule*). Net na de priming (T_0) blijkt een groot hoeveelheid aan wadslakjes (*Peringia ulvae*) aanwezig te zijn op de suppletie (Figuur B5-3). Vier maanden later zijn de dichtheden teruggekeerd op het niveau waargenomen een maand voor de aanleg. Een jaar na de aanleg zit de dichtheid van de wadslakjes wel op een gelijk niveau als de referentievakken. De hoge dichtheden waargenomen op de geprimeerde vakken een jaar naar de aanleg zijn vooral te danken, naast het wadslakje, aan de wapenworm *Scoloplos armiger* en het vlokreeftje *Urothoe poseidonis*, samen met kniksprietkreeftjes (*Bathyporeia*) een een drietal borstelwormsoorten, nonnetjes (*Macoma balthica*) en kokkels (*Cerastoderma edule*) (Figuur B5-3).

Priming met gebiedseigen sediment komt dus naar voren als een doeltreffende en haalbare methode in vergelijking met het inzaaien van kokkels op suppletie-elementen. Onderzoeksresultaten wijzen op aanzienlijke positieve effecten op de ecologische ontwikkeling door priming, waarbij de toplaag van het suppletiegebied wordt voorbehandeld met lokaal sediment. Deze aanpak lijkt niet alleen effectiever, maar ook praktisch eenvoudiger dan het inzaaien van kokkels. De voordelen van priming, zoals de stimulering van natuurlijke processen en de aanwezigheid van inheems sediment, kunnen de lokale biodiversiteit en ecologische veerkracht ten goede komen. Dit benadrukt het potentieel van priming als een duurzame en praktische strategie voor natuurherstel op suppletiegebieden, waarbij de complexiteit en uitdagingen van kokkelinzaai mogelijk kunnen worden omzeild.



Figuur B5-3. Gemiddelde dichtheid van dominante soorten schelpdieren, kreeftachtigen en borstelwormen (op basis van vier monsters per tijdstip) in de vier behandelingen Kokkels (K), Priming (P), Suppletie (S) en Referentie (A) op verschillende tijdstippen in maanden ten opzichte van de suppletie aanleg: -1, 0, 4 en 12 maanden.

Bijlage 6 Inzicht in de veranderingen van het dagelijkse bodemniveau van een intergetijdenzandplaat na een suppletie

Deze bijlage is een Nederlandse bewerking van het een wetenschappelijk manuscript, momenteel in revisie, met de titel:

Grandjean, T.J., van Belzen, J., van der Wal, D., de Vet, L., de Smit, J.C., Walles, B., Zhou, Z., van Dalen, J., & T.J. Bouma (in revisie). Drivers of changes in daily bed-level of an intertidal sandflat after nourishment.

Samenvatting

Door de wereldwijde zeespiegelstijging en afnemende sedimentbeschikbaarheid komen intergetijdengebieden steeds meer onder druk te staan. Daarom worden sedimentbeheermaatregelen, zoals suppleties, steeds vaker toegepast om deze ecologisch waardevolle habitats te behouden. Bewijs over hun directe invloed op fysische processen is echter nog beperkt. Deze studie onderzoekt de veranderingen in het dagelijkse bodemniveau van een gesuppleerde intergetijdenzandplaat en haar omgeving. De veranderingen in het dagelijkse bodemniveau werden gemeten met zelfstandige, hoog-resolutie Surface Elevation Dynamic (SED)-sensoren. De resultaten tonen aan dat de gesuppleerde gebieden geen significant verschillende veranderingen in het dagelijkse bodemniveau vertoonden ten opzichte van de aangrenzende controlegebieden. Dit suggereert dat grootschalige suppleties geen substantiële kortetermijnverstoringen veroorzaken in de fysische processen die de morfologie van intergetijdenzandplaten bepalen. Aangezien geen verschil werd vastgesteld, biedt deze studie unieke inzichten in de fysische drijvers van dagelijkse bodemniveauperanderingen, gebaseerd op drie jaar continue metingen. Met name bleek dat de windrichting een significante invloed heeft op veranderingen in het dagelijkse bodemniveau over de gehele zandplaat, terwijl windsnelheid een ruimtelijk variabele invloed uitoefent die groter is dan het effect van spring- en doodtijcycli. Uiteindelijk wordt de zandplaatvorm bepaald door de interactie tussen wind- en getijkrachten, waarbij wind de dagelijkse veranderingen aanstuurt en het getij de langetermijnontwikkeling van het bodemniveaubepaalt. Samenvattend toont dit onderzoek aan dat grootschalige suppleties niet noodzakelijk leiden tot detecteerbare veranderingen in de fysische processen achter dagelijkse bodemniveauperanderingen. De studie draagt bij aan beter onderbouwde natuur- en kustbeheerstrategieën en biedt waardevolle inzichten, gebaseerd op langdurige veldmetingen, in de belangrijkste processen die de morfologische ontwikkeling van zandplaten sturen.

B6.1 Inleiding

In de context van mondiale veranderingen heeft de kwetsbaarheid van onbegroeide wadplaten toenemende aandacht gekregen vanwege hun cruciale rol in kustecosystemen (Grandjean et al., 2024; Murray et al., 2019; Shi et al., 2018). Deze wijdverspreide kustecosystemen, die rijk zijn aan diverse gemeenschappen van benthische ongewervelden (Costanza et al., 1997), dienen als essentiële foerageer- en trekroutes voor talrijke vogelsoorten (Mu & Wilcove, 2020). Onbegroeide wadplaten functioneren als natuurlijke buffers door golfenergie te dempen en spelen daardoor een belangrijke rol in de bescherming van aangrenzende kwelders en mangroven tegen fysieke schade. Dit is van groot belang om kustgemeenschappen te helpen zich aan te passen aan de gevolgen van klimaatverandering en zeespiegelstijging (Bouma et al., 2016; Hu, Borsje, et al., 2021; van Bijsterveldt et al., 2020, 2023). Er bestaan echter zorgen dat onbegroeide wadplaten kwetsbaar zijn voor veranderingen in het milieu, zoals zeespiegelstijging (Giosan et al., 2014; Passeri et al., 2015), een afnemend sedimentaanbod (Dunn & Minderhoud, 2022; Yang et al., 2011) en menselijke activiteiten, waaronder baggeren (van Dijk et al., 2021). Het behoud van deze wadplaten is uitdagend vanwege hun dynamische morfologie, die wordt beïnvloed door getijden, golven, sedimenteigenschappen,

sedimentaanvoer en ecologische processen (de Vet et al., 2018; Friedrichs, 2012; Grandjean et al., 2024; Hu, Wang, et al., 2015; Le Hir et al., 2000).

Internationaal worden het behoud en het herstel van intergetijdengebieden ondersteund door verdragen zoals de Ramsar Conventie en door Europese beleidskaders, waaronder de Vogel- en Habitatrichtlijnen. Hoewel de nadruk vaak ligt op begroeide wadplaten, zoals kwelders en mangroven, vanwege hun belang voor kustbescherming en ecologische duurzaamheid (van Bijsterveldt et al., 2020; Willemsen et al., 2022), groeit het besef dat ook het behoud van onbegroeide wadplaten noodzakelijk is (Grandjean et al., 2024; Murray et al., 2019). In reactie daarop worden verschillende sedimentbeheerstrategieën ontworpen en toegepast (Waltham et al., 2020), waaronder sedimentaanvullingen (Solanki et al., 2023; van der Werf et al., 2015, 2019), de aanleg van harde kuststructuren zoals strandhoofden, golfbrekers of kunstmatige riffen (Grandjean et al., 2023; van Rijn, 2011; Wiesebron et al., 2024; Yuan et al., 2022), sedimentafleidingen (Xu et al., 2019) en het storten van sediment in geulen (Baptist et al., 2019; van der Wal et al., 2011), telkens aangepast aan de lokale omstandigheden. Wereldwijd worden dergelijke ingrepen doorgaans uitgevoerd met het oog op kustbescherming, maar er bestaan ook voorbeelden waarbij het doel is om ecologisch waardevolle habitats voor infaunale soorten te vergroten, en daarmee foerageergebieden voor vogels te creëren of te verbeteren (Bolam, 2011; French, 2006; van der Wal et al., 2011; Wiesebron et al., 2024). Met name sedimentsuppleties die expliciet zijn ontworpen om erosie van intergetijdenplaten tegen te gaan en vogelhabitats te verbeteren, zijn zeldzaam (van der Werf et al., 2015). Na een pilotproject op de Galgenplaat, gericht op het versterken van vogelhabitats, werd de eerste monitoringscampagne gestart om hydrodynamische, morfologische en ecologische veranderingen te evalueren (van der Werf et al., 2015). Ondanks deze inspanningen blijft directe kennis over de kortetermijndynamiek van fysische processen en hun invloed op specifieke benthische gemeenschappen beperkt. Inzicht in deze dynamiek is essentieel, omdat zij de aanwezigheid van bepaalde, voor vogels belangrijke benthische gemeenschappen kunnen sturen. Dit geldt met name voor korte- en langetermijnveranderingen in het bodemniveau, die nader onderzoek vereisen.

Eerdere studies hebben aangetoond dat de aanwezigheid van macrobenthische gemeenschappen op intergetijdenplaten samenhangt met variabelen zoals mediane korrelgrootte, zoutgehalte, microfytobenthische biomassa, overstromingsfrequentie en golfblootstelling (Compton et al., 2013; Ysebaert et al., 2003). Tegelijkertijd benadrukken recente onderzoeken het belang van dagelijkse veranderingen in het bodemniveau voor de biota (Bouma et al., 2001; Shi et al., 2021; Zhou et al., 2024). De omvang en frequentie van deze veranderingen hebben een aanzienlijke invloed op benthische gemeenschappen, aangezien de variatie in het bodemniveau bepalend is voor de omstandigheden waarmee soorten dagelijks moeten omgaan (Bolam, 2011; Hinchey et al., 2006; Nambu et al., 2012; Shi et al., 2021; van der Wal et al., 2017; Wiesebron et al., 2022). Zo vertonen wormen, die mobieler zijn dan tweekleppigen (Queirós et al., 2013), een andere mate van kwetsbaarheid voor dagelijkse bodemveranderingen (Zhou et al., 2024). Hoewel stormgebeurtenissen en de overschrijding van reguliere omstandigheden de abundantie van macrobenthos beïnvloeden (de Vet et al., 2020; Shi et al., 2021), zorgt de beperkte mobiliteit van grotendeels sedentair benthos ervoor dat veranderingen in het dagelijkse bodemniveau op langere termijn leiden tot aanpassingen in de soortensamenstelling, afhankelijk van hun mobiliteit (Zhou et al., 2024). Dit onderstreept het belang van inzicht in dagelijkse bodemveranderingen, niet alleen tijdens extreme gebeurtenissen, maar ook onder normale, dagelijkse omstandigheden. Daarom is het begrijpen van veranderingen in het dagelijkse bodemniveau en de sturende factoren daarvan na een suppletie, evenals het vergelijken van deze veranderingen tussen suppletie- en controlegebieden, essentieel om vast te stellen of de suppletie de omstandigheden voor benthische soorten beïnvloedt.

In deze studie is ons doel het effect van sedimentaanvullingen op veranderingen in het dagelijkse bodemniveau van een intergetijdenplaat te evalueren. We richten ons daarbij op mogelijke verschillen in omvang, frequentie en drijvende krachten van dagelijkse bodemveranderingen tussen het aangevulde en het aangrenzende controlegebied. Door middel van sensorgebaseerde monitoring van het dagelijkse bodemniveau over een periode van drie jaar en de toepassing van empirische statistische methoden, zoals de Surface Elevation Dynamics (SED)-tijdsreeksanalyse en de Morphodynamic Signature (MDS)-benadering, beoogt dit onderzoek inzicht te verkrijgen in de processen en variaties van het bodemniveau tussen suppletie- en controlelocaties. De gekozen methoden leveren gegevens met een hoge temporele resolutie, die cruciaal zijn om de fjnschalige temporele variabiliteit te begrijpen die het functioneren van een wadplaat

beïnvloedt. Uiteindelijk is dit inzicht van groot belang om een belangrijke indicator te kunnen beoordelen voor de geschiktheid van habitats voor benthische gemeenschappen, en daarmee het potentiële succes van sedimentaanvullingen voor het verbeteren van de foerageercapaciteit op een specifieke locatie te bepalen.

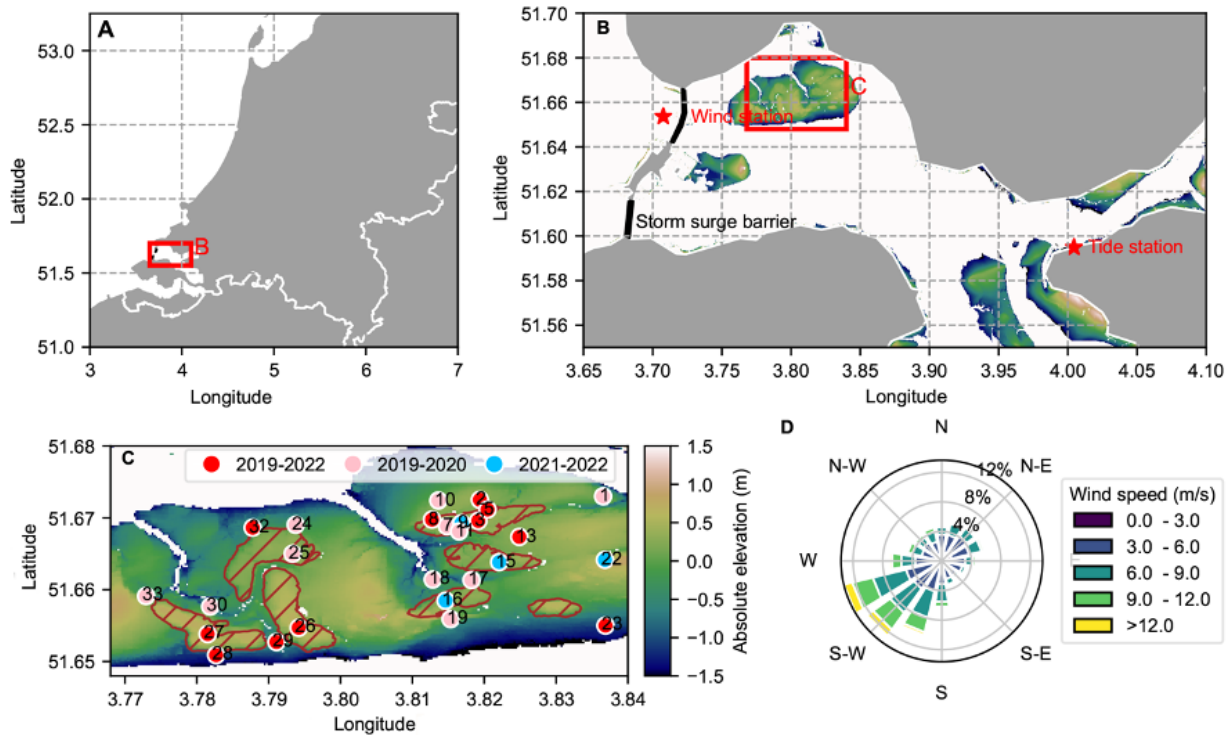
B6.2 Methoden

B6.2.1. Studiegebied

De Oosterschelde, gelegen in het zuidwesten van Nederland, vormt een getijdenbekken dat sterk is beïnvloed door menselijke ingrepen. De in 1986 voltooide Oosterscheldekering (zie Figuur B6-1B) maakt deel uit van het omvangrijke Deltawerken-kustverdedigingssysteem en wordt gesloten tijdens extreem hoogwater. Deze ingreep, in combinatie met het afsluiten van de bovenstroomse takken, heeft geleid tot een aanzienlijke vermindering van de getijdenstromingssnelheid in het voormalige estuarium. Hierdoor nam het sedimenttransport naar de intergetijdengebieden in de Oosterschelde af (Smaal & Nienhuis, 1992), wat resulteerde in golfgeïnduceerde erosie. Dit proces heeft geleid tot een netto-effect van zowel erosie als afvlakking van de platen (de Vet et al., 2017), een afname in de diversiteit en omvang van benthische gemeenschappen, en veranderingen in de soortensamenstelling (Cozzoli et al., 2017). Gezamenlijk hebben deze ontwikkelingen geleid tot een afnemende foerageercapaciteit voor talrijke steltlopersoorten (van der Werf et al., 2019).

Om deze achteruitgang tegen te gaan, hebben de Nederlandse autoriteiten projecten met sedimentaanvullingen geïnitieerd om de degradatie van intergetijdengebieden in de Oosterschelde te beperken (van der Werf et al., 2015, 2019). Een pilotproject op de Galgenplaat in 2008 leverde empirisch bewijs dat sedimentaanvullingen effectief kunnen zijn om negatieve ecologische effecten van erosie tegen te gaan (van der Werf et al., 2015). Daarnaast werd in 2019 een grootschalige suppletie uitgevoerd op de Roggenplaat, waarbij 1,13 miljoen m³ sediment werd aangebracht (van der Werf et al., 2019; Walles et al., 2021). Voor 1986 was de Roggenplaat een aangroeiende plaat, maar na de bouw van de stormvloedkering erodeerde zij met een gemiddelde snelheid van 0,5 cm per jaar (Louters et al., 1998; De Ronde et al., 2013). Deze erosie leidde tot een afname van het areaal met 50% blootstellingstijd, van 751 naar 615 hectare tussen 1990 en 2013, waardoor de foerageergebieden voor steltlopers werden aangetast.

Op de Roggenplaat werden daarom zeven afzonderlijke suppleties aangelegd, met een minimale hoogte na uitvoering variërend van 0,3 m +NAP (Amsterdams Peil) voor de vier noordelijkste en 0,7 m +NAP voor de drie zuidelijkste suppleties (rode polygonen in Figuur B6-1C; Walles et al., 2021). Deze hoogten zijn ontworpen om de foerageerfunctie gedurende ten minste 25 jaar te behouden, rekening houdend met de negatieve ontwikkeling van het bodemniveau in de Oosterschelde (van der Werf et al., 2019). Het sediment dat is gebruikt voor de suppletie had een grovere mediane korrelgrootte (250–350 µm) dan het sediment in de niet-gesuppleerde gebieden (175–225 µm). De Roggenplaat is blootgesteld aan overheersende zuidwestelijke wind- en golfcondities (Figuur B6-1D), met een gemiddelde golfhoogte van circa 20 cm en golfperiodes van ongeveer 3 seconden, oplopend tot 1–1,5 m tijdens stormen. De plaat kent een semi-dagelijks getijdenregime met een gemiddeld getijverschil van circa 2,5 meter tijdens een spring-doodtijcyclus, met maximale variaties van 10 cm tussen locaties en zonder significante verschillen in hoogwatertijd of getijvorm (de Vet et al., 2017; 2018).



Figuur B6-1. (A) Overzicht van de ligging van de Oosterschelde in Nederland, (B) positie van de Roggenplaat, (C) plaatsing van SED-sensoren op de Roggenplaatsuppletie, (D) windroses voor de periode 2012–2022. In (C) geven de kleurgecodeerde stippen de operationele fasen van de sensoren weer: rood voor de volledige onderzoeksperiode, roze voor het eerste jaar na de suppletie (2019–2020) en blauw voor de monitoringsfase van 2021–2022. De bruine polygonen met diagonale arcering geven de gesuppleerde gebieden aan, met op de achtergrond het digitale hoogtebestand van 2020, afgeleid van LiDAR-metingen van Rijkswaterstaat. De X- en Y-assen tonen de coördinaten in het WGS'84-coördinatensysteem, terwijl de absolute hoogten zijn uitgedrukt ten opzichte van NAP (ongeveer gemiddeld zeeniveau).

B6.2.2. Monitoring van dagelijkse bodemhoogtedynamiek

Om het effect van sedimentaanvullingen op het dagelijkse bodemniveau en daarmee de indirecte invloed op benthische gemeenschappen te beoordelen, is binnen één tot twee maanden na de suppletie gebruikgemaakt van een hoogwaardige, kostenefficiënte en autonome Surface Elevation Dynamic (SED)-sensor, ontwikkeld door het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ). Na de suppletie werden deze SED-sensoren geplaatst op 33 locaties verspreid over de Roggenplaat, waarvan tien specifiek op de gesuppleerde gebieden, om een uitgebreid ruimtelijk dekkend gegevensbestand te verzamelen (Figuur B6-1). De sensoren zijn strategisch geplaatst om rekening te houden met de morfologische diversiteit van de plaat, waaronder de dynamische zuidflank, de toppen van de suppleties en de smalle zones tussen de suppleties. Deze opzet biedt inzicht in mogelijke verschillen tussen gesuppleerde en niet-gesuppleerde gebieden, en helpt tevens de belangrijkste sturende factoren van dagelijkse bodemveranderingen op de plaat te identificeren. Dergelijke langdurige, gedetailleerde metingen op deze ruimtelijke schaal zijn uniek en verschaffen een nieuw inzicht in de processen die de plaatdynamiek bepalen, wat tot op heden niet eerder over een meerjarige periode is vastgelegd.

De SED-sensoren bestaan in twee versies, die elk een verschillende meetmethode toepassen om het bodemniveau te volgen: optisch (Hu, Lenting, et al., 2015; Willemsen et al., 2018) of akoestisch (Willemsen et al., 2022). Beide typen sensoren die op de Roggenplaat zijn ingezet, vertoonden een vergelijkbare nauwkeurigheid van ± 2 mm (Willemsen et al., 2022). De optische sensoren werken op basis van lichtintensiteit tijdens laagwater overdag, waarbij 200 lichtgevoelige cellen een bereik van 400 mm bestrijken en elk uur een meting uitvoeren (Hu, Lenting, et al., 2015). Het onderscheid tussen cellen die wel en geen daglicht ontvangen, geeft de relatieve positie van het bodemniveau aan (Willemsen et al., 2018). De optische sensoren werden in het sediment geplaatst. Rond enkele sensoren trad lichte uitspoeling op; om dit

te corrigeren werd de ruwe data gecorrigeerd voor erosie-effecten bij de bepaling van het werkelijke bodemniveau (Willemsen et al., 2018).

De akoestische sensoren meten de afstand tussen de bodem en het instrument door het echo-sigitaal van een akoestische puls te interpreteren, waarbij metingen elke 30 minuten worden uitgevoerd wanneer de sensor volledig onder water staat (Willemsen et al., 2022). Deze sensoren werden ongeveer 20 cm boven de bodem bevestigd, op circa 30 cm afstand van een paal, waarbij geen uitspoeling werd waargenomen. Niet alle sensoren functioneerden echter zoals bedoeld, door bijvoorbeeld verlies, batterijstoringen, lekkage of biofouling. Dit vormde echter geen belemmering voor de analyse, aangezien de focus lag op veranderingen en sturende factoren van dagelijkse bodemhoogte, in plaats van op langdurige relatieve trends. Voor het begrijpen van deze dynamiek is continue data over de gehele periode na de suppletie niet strikt noodzakelijk (Grandjean et al., 2023).

Volgens de nabewerkingsprotocollen voor optische (Willemsen et al., 2018) en akoestische (Willemsen et al., 2022) SED-sensoren werden de ruwe signalen omgezet naar tijdreeksen van relatieve bodemhoogte. De gemeten waarden werden vervolgens geaggregeerd door de mediaan van het dagelijkse relatieve bodemniveau (z ; *Tabel B6-1*) te berekenen, zodat beide sensortypen met elkaar konden worden vergeleken. Aangezien optische sensoren enkel overdag tijdens emersie meten en akoestische sensoren enkel tijdens inundatie, werd standaardisatie bereikt door de gegevens te vereenvoudigen tot een vergelijkbare tijdsresolutie.

Om het effect van de suppletie in de tijd te analyseren, werden de resultaten in dit artikel opgesplitst in twee perioden: het eerste jaar na de suppletie (2019–2020), waarin de grootste veranderingen verwacht worden tijdens de stabilisatie van het sediment, en de daaropvolgende twee jaar (2021–2022), waarin eventuele afname of stabilisatie van deze dynamiek zichtbaar wordt.

Tabel B6-1. Overzicht van de SED metrics en statistische testen toegepast binnen de studie.

Abbreviation	Metric name	Unit	Category	Description	Implication of values
z	Relative bed-level	mm	Quantification	Represents the height of the bed-level, referenced to the first measured elevation for the location.	Positive values indicate accretion compared to the start; negative values suggest erosion compared to the start.
δz	Change in daily bed-level	mm	Quantification	Measures the change in daily bed-level (z), indicating sediment accretion or erosion.	Positive values mean sediment accretion at the given day; negative values indicate erosion.
ACF	Autocorrelation length	days	Temporal analysis	Measures the time over which relative bed-levels (z) at a location are correlated to each other.	Longer lags imply more gradual changes in daily bed-level over time; shorter lags suggest frequent fluctuations in the relative bed-level.
SED _t	SED return period exponent	-	Frequency analysis	Quantifies how the magnitude and timing of changes in the daily bed-level (δz) contribute to the frequency of these events, reflecting the recurrence interval.	Higher values indicate less frequent substantial changes in the daily bed-level; lower values suggest more frequent large magnitude change in the daily bed-level.
Moran's I	Spatial Autocorrelation	-	Spatial analysis	A method to assess the spatial dependency of ACF, SED _t , and MDS, indicating the degree to which the values are clustered or dispersed in space.	Values close to +1 indicate clustering; values close to -1 indicate dispersion between locations.
MDS	Morphodynamic Signature	-	Driver analysis	Quantifies the influence of environmental drivers (e.g., wind, tide) on changes in daily bed-level (δz).	Values > 1 signify influence by extreme conditions like storms or spring tides; values < 1 suggest influence by calm conditions.
CCA	Canonical Correlation Analysis	-	Multivariate analysis	A method that quantifies the statistical relationships between relative bed-level (z) and the change in daily bed-level (δz) with environmental drivers and conditions.	Strong correlations indicate significant relationships; weak correlations suggest limited interaction.
GLM	Generalised Linear Model	-	Statistical modelling	A statistical model for estimating the relationships between the change in daily bed-level (δz) and environmental explanatory variables.	Coefficients with high absolute value indicate strong predictor impact; low value suggests weak impact.

B6.2.3. Stabiliteit van het bodemniveau

De autocorrelatiefunctie (ACF) wordt gebruikt als maat voor de kortetermijnstabiliteit van het relatieve bodemniveau op elke sensorlocatie (*Tabel B6-1*). Door te analyseren hoe relatieve bodemhoogten in de tijdreeks zich tot elkaar verhouden bij verschillende tijdsvertragingen, verschaft de ACF inzicht in de temporele stabiliteit van het bodemniveau (Grandjean et al., 2023). De ACF wordt berekend door temporele

autocorrelatie toe te passen, waarbij de tijdsvertraging tussen opeenvolgende dagelijkse metingen stapsgewijs wordt vergroot tot maximaal de helft van de totale duur van de metingen ($n/2$):

$$ACF(t_{lag}) = \frac{\sum_{i=1}^{N-t_{lag}} (z_i - \bar{z})(z_{i+t_{lag}} - \bar{z})}{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2}$$

In deze vergelijking staat t_{lag} voor de tijdsvertraging (in dagen), z_i voor de relatieve bodemhoogte op tijdstip i , en $z_{(i+t_{lag})}$ voor de relatieve bodemhoogte na een tijdsvertraging van t_{lag} dagen. \bar{z} is het gemiddelde van alle z_i -waarden in de tijdreeks en N is het totale aantal metingen.

De correlatielengte, gedefinieerd als de tijdsvertraging waarbij de ACF daalt tot of onder $1/e$ (met e als de grondslag van de natuurlijke logaritme), dient als een indicator voor de temporele stabiliteit van het wad. Een langere correlatielengte duidt op een stabiel getijdenmilieu, gekenmerkt door trage en voorspelbare veranderingen in het bodemniveau, wat over het algemeen gunstig is voor benthische gemeenschappen. Een kortere correlatielengte wijst daarentegen op een dynamischer systeem met frequente en plotselinge bodemveranderingen.

Om de nauwkeurigheid te waarborgen, werd de ACF voor elke afzonderlijke tijdreeks berekend, waarbij rekening werd gehouden met eventuele hoogteveranderingen die het gevolg waren van vervanging van instrumenten. Normalisatie van de gegevens werd niet toegepast, aangezien dit geen invloed heeft op de tijdsvertragingen binnen de autocorrelatiefunctie, die enkel temporele intervallen weergeven. De gegevens van de verschillende locaties bevonden zich op een vergelijkbare schaal, waardoor een zinvolle vergelijking van correlatielengten tussen locaties mogelijk was.

B6.2.4. Veranderingen in het dagelijkse bodemniveau

Om de effecten van sedimentaanvullingen op het bodemniveau te begrijpen, zijn veranderingen in het dagelijkse bodemniveau (δz ; *Tabel B6-1*) berekend. Deze variaties zijn afgeleid uit de relatieve bodemhoogtegegevens (z) door het verschil te bepalen tussen opeenvolgende dagen:

$$\delta z_i = z_{i+1} - z_i$$

Hier vertegenwoordigt de verschilvector (δz_i) de verandering in bodemhoogte van dag i naar dag $i+1$, waarbij $z_{(i+1)}$ de relatieve bodemhoogte op dag $i+1$ en z_i die op dag i weergeeft. Deze methode maakt het mogelijk om dagelijkse veranderingen in het bodemniveau te kwantificeren, waarbij positieve waarden van δ duiden op sedimentatie (ophoging) en negatieve waarden op erosie. Het onderscheid tussen sedimentatie en erosie is van belang, omdat beide processen plaatsvinden onder verschillende omgevingscondities en uiteenlopende gevolgen hebben voor de stabiliteit en structuur van het bodemoppervlak.

Daarnaast is gebruikgemaakt van de SED-returnperiod exponent (SED_{rt}) om de frequentie te bepalen waarmee veranderingen van een bepaalde omvang in het bodemniveau optreden (*Tabel B6-1*; Grandjean et al., 2023). Deze maat is essentieel voor het beoordelen van de kans dat dagelijkse bodemveranderingen drempelwaarden overschrijden die kritisch zijn voor de vestiging van benthische gemeenschappen (van Belzen et al., 2022). De dimensieloze SED_{rt} vormt een samenvattende maat die de totale dynamiek van het dagelijkse bodemniveau in één enkele waarde weergeeft.

Voor de berekening van SED_{rt} zijn de verschilvectoren (δz) voor sedimentatie en erosie afzonderlijk geordend in aflopende volgorde, waarbij elke meting een opeenvolgend rangnummer krijgt, beginnend bij 1. Vervolgens is de overschrijdingsfrequentie (F) bepaald, die weergeeft hoe vaak veranderingen van een bepaalde omvang voorkomen:

$$F(\delta z_i < \delta z_r) = \frac{r}{l + 1}$$

In deze vergelijking is δz_i de verandering in bodemhoogte op dag i , δz_r de verandering met rangnummer r (in aflopende volgorde), en l het totale aantal waarnemingen in de verschilvector (δz) voor respectievelijk sedimentatie of erosie. Elke meting in de rangorde krijgt een uniek volgnummer, ook als

meerdere waarden dezelfde omvang hebben. De inverse van de overschrijdingsfrequentie (F) geeft de terugkeertijd (T_r) van een bepaalde verandering in bodemniveau weer:

$$T_r(\delta_i) = \frac{1}{F(\delta_i < \delta_r)}$$

De analyse van Grandjean (2023) is verder verfijnd door toepassing van een Weighted Least Squares-regressiemodel om een robuustere relatie te leggen tussen de exponentiële functie van de terugkeertijd (T_r) en de omvang van de bodemverandering (δz):

$$T_r = (SED_{rt})^{\delta z}$$

Hierbij wordt T_r uitgedrukt in dagen en δz in millimeters (mm). De dimensieloze coëfficiënt SED_{rt} karakteriseert de dynamiek van een locatie: hogere waarden wijzen op locaties met geringere dagelijkse dynamiek, terwijl lagere waarden duiden op gebieden met frequentere en grotere dagelijkse veranderingen in het bodemniveau.

B6.2.5. Invloed van omgevingsfactoren op veranderingen in het dagelijkse bodemniveau

Om de invloed van omgevingsfactoren op veranderingen in het dagelijkse bodemniveau te beoordelen, is gebruikgemaakt van de empirische analysemethode Morphodynamic Signature (MDS; *Tabel B6-1*; Grandjean et al., 2023). Deze benadering richtte zich op twee essentiële omgevingsvariabelen: wind (MDS_{wind}) en getij (MDS_{tide}). Hiermee kon worden bepaald hoe het bodemniveau reageert op deze factoren, wat inzicht geeft in de omstandigheden waaronder veranderingen in de relatieve bodemhoogte het meest waarschijnlijk optreden.

Allereerst werd de dataset met dagelijkse veranderingen in bodemniveau (δz) gesynchroniseerd met dagelijkse metingen van windsnelheid en getijamplitude. De dagelijkse gemiddelde windsnelheid werd geregistreerd op het dichtstbijzijnde meetstation van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) te Schaar (Figuur B6-1B). Tegelijkertijd werden de maximale astronomische getijverschillen per dag afgeleid uit de waterstandsmetingen van het dichtstbijzijnde en meest relevante Rijkswaterstaatspeilstation bij Stavenisse (Figuur B6-1B). Het gebruik van de maximale astronomische getijverschillen als maat voor de totale getijrange is gerechtvaardigd vanwege de hoge voorspelbaarheid en de sterke correlatie met de omgevingskrachten die veranderingen in het dagelijkse bodemniveau beïnvloeden (Bouma et al., 2005).

Conform Grandjean et al. (2023) werden de gekoppelde SED-gegevens en omgevingsvariabelen vervolgens in oplopende volgorde gerangschikt voor elke variabele. Deze reeksen werden opgedeeld in vijftig gelijke intervallen, variërend van de minimale tot de maximale waarden van de wind- of getijvariabelen. Vijftig intervallen vormen een balans tussen detail en statistische betrouwbaarheid, zodat kleinschalige variaties in het dagelijkse bodemniveau nauwkeurig kunnen worden vastgelegd zonder de robuustheid van de analyse te verminderen.

Binnen elk interval werd het aantal dagen (M) bepaald waarop een specifieke omgevingsconditie werd overschreden, genormaliseerd ten opzichte van de totale lengte van de dataset (d), om de fractie (f) te berekenen:

$$f = \frac{M}{d}$$

De fractie f varieert van 0 (laagste omgevingsconditie) tot 1 (hoogste omgevingsconditie). Vervolgens werd de cumulatieve sedimentatie of erosie voor elke omgevingsconditie genormaliseerd ten opzichte van de totale sedimentatie of erosie, wat resulteerde in de fractie van de dagelijkse bodemveranderingen (f_δ) per interval. De relatie tussen f en f_δ werd vervolgens gemodelleerd met een machtsfunctie, waarmee de constanten MDS_{wind} en MDS_{tide} werden bepaald. Deze constanten kwantificeren de gevoeligheid van dagelijkse bodemveranderingen voor omgevingscondities:

$$f_\delta = f^{MDS_{wind}}$$

Een MDS-waarde dicht bij 1 duidt erop dat de veranderingen in het dagelijkse bodemniveau grotendeels onafhankelijk zijn van omgevingsfactoren, zoals weersomstandigheden of getijvariaties. Dit betekent bijvoorbeeld dat dezelfde mate van bodemverandering kan optreden bij zowel hoge als lage windsnelheden, wat wijst op een systeem waarin sedimentbeweging en bodemverandering niet direct worden gestuurd door de intensiteit van externe krachten. Een MDS-waarde kleiner dan 1 geeft aan dat veranderingen in het bodemniveau vooral plaatsvinden onder rustige omstandigheden, zoals zwakke wind of doodtij. In dergelijke periodes van geringe omgevingsactiviteit hebben veranderingen in het bodemniveau dus een sterker effect, wat wijst op een directe relatie tussen lage externe krachten en bodemaanpassing. Daarentegen wijst een MDS-waarde groter dan 1 op een situatie waarin veranderingen in het bodemniveau voornamelijk worden gedreven door stormen of springtijcondities. Dit betekent dat sterke omgevingskrachten, zoals hoge windsnelheden en grote getijverschillen, een substantiële invloed hebben op sedimenttransport en bodemveranderingen. Het is belangrijk op te merken dat MDS-waarden niet de omvang van de bodemveranderingen kwantificeren, maar de relatieve invloed van omgevingsprocessen beschrijven die verantwoordelijk zijn voor veranderingen in het bodemniveau op een specifieke locatie.

B6.2.6. Statistische analyses

Na het bepalen van de frequentie (SED_{rt}) en de omgevingsfactoren (MDS) werd onderzocht hoe deze variabelen ruimtelijk zijn verdeeld en of sedimentaanvullingen leiden tot meetbare verschillen ten opzichte van aangrenzende, niet-gesuppleerde gebieden. Eerst werd ruimtelijke autocorrelatie geanalyseerd met de Moran's I-test (*Tabel B6-1*). Deze test beoordeelt de ruimtelijke samenhang van de variabelen ACF, SED_{rt} , MDS_{wind} en MDS_{tide} .

Voor de Moran's I-analyse werd een ruimtelijke gewichtenmatrix opgesteld op basis van de vijf dichtstbijzijnde buurpunten. Deze matrix werd rijgestandaardiseerd, zodat de invloed van elke locatie gelijk wordt gewogen en de bijdragen van alle burens worden genormaliseerd. De rijstandaardisatie zorgt ervoor dat de som van de gewichten in elke rij gelijk is aan één, waardoor de invloed van de ruimtelijke context per locatie vergelijkbaar wordt en geen enkele locatie de analyse onevenredig beïnvloedt. Op deze manier konden ruimtelijke patronen en afhankelijkheden worden vastgesteld op basis van fysieke nabijheid, onafhankelijk van het feit of de meetpunten zich binnen of buiten de suppletiegebieden bevonden.

Voor datasets zonder significante ruimtelijke autocorrelatie werden vervolgens statistische toetsen uitgevoerd om verschillen tussen gesuppleerde en niet-gesuppleerde gebieden te evalueren en de effecten van sedimentbeheer te kwantificeren. Hierbij werd gezocht naar significante verschillen in de waarden van ACF, SED_{rt} , MDS_{wind} en MDS_{tide} tussen sensoren in gesuppleerde en niet-gesuppleerde zones. De vergelijkingen omvatten zowel het eerste jaar na de suppletie (2019–2020) als de daaropvolgende twee jaren (2021–2022).

De statistische analyse begon met de Shapiro–Wilk-test om de normaliteit van de verdelingen van de indices tussen perioden en behandelingen te controleren. Omdat SED_{rt} , MDS_{wind} en MDS_{tide} een machtsverdeling vertoonden, werd een logaritmische transformatie toegepast om de variantie te stabiliseren en de verdeling te normaliseren. Dit beperkte de invloed van grote waarden en temporele vertragingen in de residuen en verbeterde de interpretatie van de resultaten.

Na normalisatie werd de Levene-test uitgevoerd om de homogeniteit van de varianties te toetsen, met een significantieniveau van $p < 0,05$ (Bonferroni-correctie voor meervoudige vergelijkingen). Indien de aannames van normaliteit of homogeniteit niet voldeden, werd de niet-parametrische Mann–Whitney U-test gebruikt, eveneens met $p < 0,05$. Wanneer beide aannames wel voldeden, werd een onafhankelijke t-toets toegepast, uitgaande van onafhankelijkheid tussen de gesuppleerde en niet-gesuppleerde locaties.

In gevallen waarin de Moran's I-analyse wees op afwezige of zwakke autocorrelatie, werd aanvullend een Z-score-analyse uitgevoerd om vast te stellen of individuele locaties significant afweken van het gemiddelde. Deze methode biedt gedetailleerd inzicht in ruimtelijke variaties binnen het studiegebied en markeert locaties met statistisch significante verschillen. Een Z-score buiten het bereik van $\pm 1,96$ werd als significant beschouwd.

B6.2.7. Analyse van de invloed van omgevingsfactoren op veranderingen in het dagelijkse bodemniveau

Na het in kaart brengen van de ruimtelijke patronen en de omgevingsfactoren die de veranderingen in het dagelijkse bodemniveau beïnvloeden, werd onderzocht in welke mate afzonderlijke omgevingsvariabelen bijdragen aan deze veranderingen. Deze analytische stap is van belang om patronen te verklaren die mogelijk niet volledig door de MDS-analyse zijn vastgelegd. Hiervoor zijn twee complementaire methoden toegepast: Canonische Correlatieanalyse (CCA) en Generalized Linear Models (GLM).

De CCA maakt het mogelijk om te begrijpen hoe omgevingsvariabelen afzonderlijk en in samenhang invloed uitoefenen op veranderingen in het dagelijkse bodemniveau. Hierbij werden de variabelen windsnelheid, windrichting, getijrange en de absolute hoogte van de sensorpositie geanalyseerd. Op deze manier kon zowel de invloed op kortetermijnveranderingen (dagelijks) als op langetermijntwikkelingen (gehele meetperiode) worden geëvalueerd. De absolute hoogte werd bepaald met behulp van een differentieel GPS-systeem (dGPS) tijdens de installatie van de sensoren op elke locatie. De verticale en horizontale nauwkeurigheid van de dGPS-metingen bedroeg $\pm 1,5$ cm. Deze multivariate benadering is waardevol om te begrijpen hoe combinaties van omgevingsfactoren met verschillende ruimtelijke kenmerken gezamenlijk bijdragen aan de morfologische veranderingen op de wadplaten.

Ter aanvulling werd een GLM met een Gaussiaanse verdeling toegepast, waarbij de veranderingen in het dagelijkse bodemniveau als continue responsvariabele werden gemodelleerd. De identity linkfunctie werd gebruikt om de verwachte veranderingen in bodemniveau (δz) rechtstreeks te modelleren als een lineaire combinatie van de verklarende variabelen: windsnelheid (U_w), getijamplitude (U_t) en windrichting, omgezet via trigonometrische functies $\sin(W_d)$ en $\cos(W_d)$ om de circulaire aard van windrichting te representeren. De windrichting werd omgezet van graden naar radialen voordat de transformatie werd toegepast. Daarnaast werd de absolute hoogte (E_s) van de dGPS-metingen opgenomen om het effect van hoogteverschillen op de bodemveranderingen te verklaren. Het GLM werd als volgt geformuleerd:

$$E[\delta z] = \beta_0 + \beta_1 U_w + \beta_2 U_t + \beta_3 \sin(W_d) + \beta_4 \cos(W_d) + \beta_5 E_s$$

Hierin staat $E[\delta z]$ voor de verwachte verandering in het dagelijkse bodemniveau, gemodelleerd als functie van de omgevingsvariabelen. Elke β -coëfficiënt vertegenwoordigt de specifieke invloed van de bijbehorende variabele op de veranderingen in het bodemniveau. Door de resultaten van CCA en GLM te combineren, kon zowel het collectieve effect van omgevingsfactoren (via CCA) als hun individuele bijdrage (via GLM) worden vastgesteld, waardoor een volledig beeld ontstond van de milieudynamiek die de veranderingen in het dagelijkse bodemniveau aanstuurt.

B6.3 Resultaten

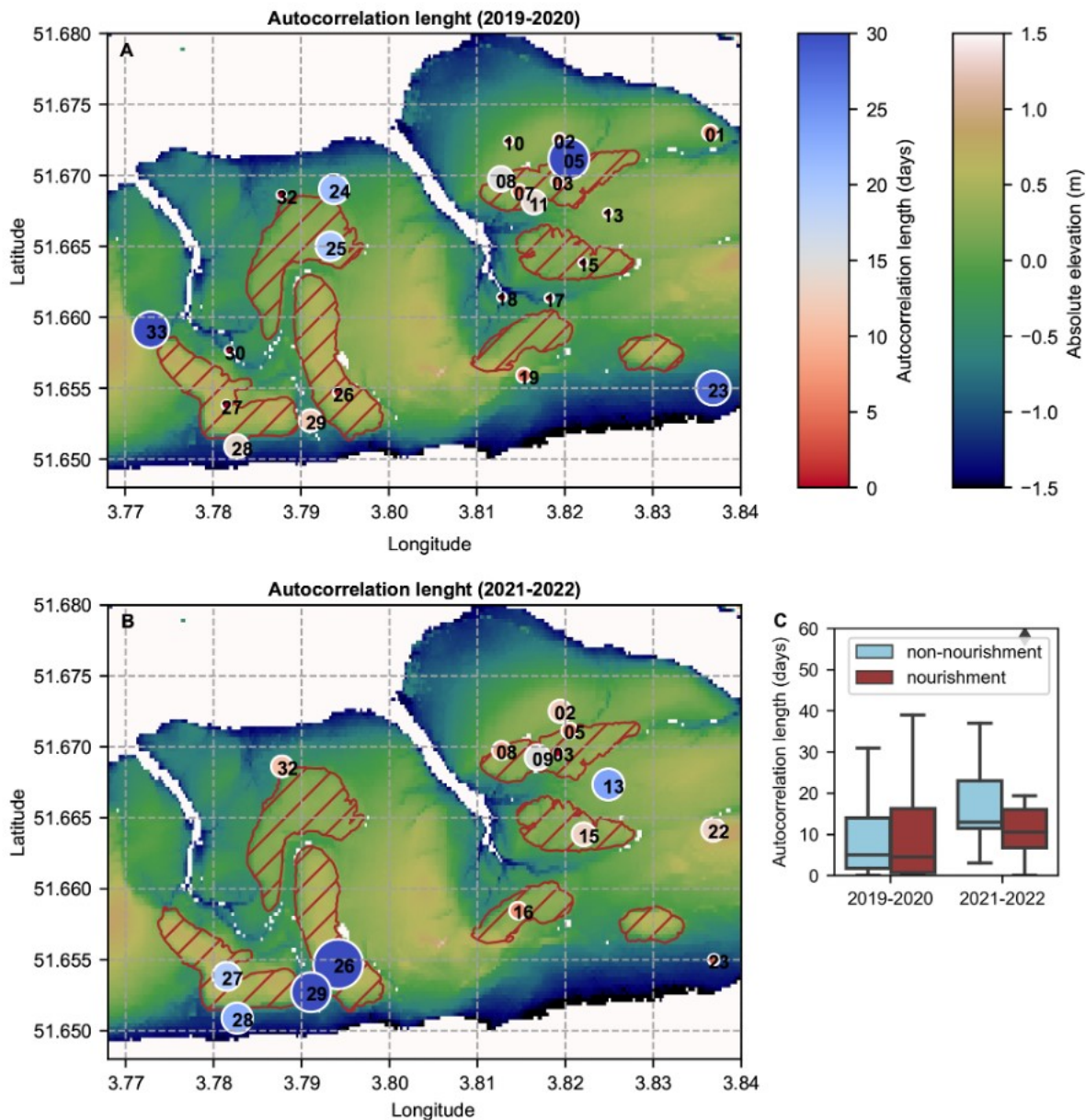
B6.3.1. Stabiliteit van het bodemniveau

De autocorrelatiefunctie (ACF) werd toegepast om de temporele samenhang van het bodemniveau per sensorlocatie te kwantificeren. Over het algemeen duiden hogere ACF-waarden op een stabiel bodemniveau binnen de meetperiode. In de directe nasleep van de suppletie (2019–2020) bedroeg de gemiddelde autocorrelatielengte 10 dagen ($SD = 11$) (Figuur B6-2), wat in de daaropvolgende periode (2021–2022) leek toe te nemen tot 17 dagen ($SD = 15$) (Figuur B6-2). Ondanks deze schijnbare toename bleek het verschil statistisch niet significant (Figuur B6-3C; Tabel B6-2), wat erop wijst dat er weliswaar een tendens tot grotere stabiliteit over tijd zichtbaar is, maar dat de spreiding in de data eveneens toenam, waardoor dit effect statistisch niet aantoonbaar is.

De ruimtelijke analyse toonde een zwakke maar significante ruimtelijke autocorrelatie voor de ACF in de periode 2021–2022 (Tabel B6-3). Dit wijst op een zekere mate van ruimtelijke samenhang in de temporele stabiliteit van het bodemniveau tussen nabijgelegen sensoren. Ondanks deze samenhang sluiten de resultaten niet uit dat er plaatselijke verschillen bestaan tussen gesuppleerde en niet-gesuppleerde gebieden (Figuur B6-2C; Tabel B6-2).

Opvallend was dat drie locaties significante Z-scores vertoonden en daarmee als uitschieters werden geïdentificeerd ten opzichte van het algemene gemiddelde van de dataset. Het betrof locaties 5 (suppletie) en 33 (controle) in 2019–2020 en locatie 26 (suppletie) in 2021–2022. Een vergelijking van ACF-waarden tussen beide perioden per sensorlocatie wees uit dat alleen locaties 26 (suppletie) en 29 (controle) significante Z-scoreafwijkingen vertoonden. Dit duidt op een duidelijke verandering in hun temporele ACF, wat wijst op een significante verschuiving in stabiliteit op deze locaties (Figuur B6-2).

Over het geheel genomen vertoonden de meeste meetpunten consistente ACF-waarden tussen gesuppleerde en niet-gesuppleerde gebieden, wat erop wijst dat de Roggenplaat overwegend een relatief lage temporele stabiliteit kent. De korte autocorrelatielengtes ondersteunen dit beeld. De uniformiteit in ACF-waarden over de gehele Roggenplaat, ongeacht de suppletiemaatregelen, duidt op een consistent morfologisch ontwikkelingspatroon in ruimte en tijd binnen het studiegebied.



Figuur B6-2. Autocorrelatielengte op de Roggenplaat – (A) toont de data uit het eerste jaar na de suppletie (2019–2020) en (B) de monitoringsfase (2021–2022). Grotere en donkerblauwe symbolen duiden stabiele zones aan, terwijl kleinere en donkerrode symbolen wijzen op dynamische (instabiele) omgevingen. Beide perioden vertonen ruimtelijke autocorrelatie van ACF-waarden. Er lijkt een lichte tendens richting stabielere omstandigheden (C), maar deze is statistisch niet significant. Gemiddeld komt de autocorrelatielengte overeen met een spring–doodtij–springcyclus van circa 14 dagen. De X- en Y-assen geven de coördinaten weer in het WGS'84-coördinatensysteem, terwijl de absolute hoogte is uitgedrukt ten opzichte van NAP (gemiddeld zeeniveau).

Tabel B6-2. Samenvatting van de uitgevoerde statistische toetsen voor vergelijking van SED_{rt} (sedimentatie en erosie) en de autocorrelatiefunctie (ACF) tussen twee perioden (2019–2020 en 2021–2022) en twee gebieden (gesuppleerd en aangrenzend niet-gesuppleerd). De Shapiro–Wilk-test controleerde de normaliteit van de data (p -waarde onder Shapiro–Wilk). De Levene-test testte de homogeniteit van de varianties (p -waarde onder Levene). Afhankelijk van de verdeling werd de Mann–Whitney U-test (niet-normale data) of de onafhankelijke t -toets (normale data) toegepast (p -waarde onder Mann–Whitney U test). Een asterisk (*) duidt een significant resultaat aan bij $p < 0,05$.

Treatment	Parameter	Shapiro-Wilk p	Levene's p	Mann-Whitney U test / T-test p
2019-2020 x 2021-2022	SED_{rt} accretion		0.075	0.327
2019-2020	SED_{rt} accretion	0.182		
2021-2022	SED_{rt} accretion	0.321		
Nourished x adjacent areas	SED_{rt} accretion		0.965	0.546
Nourished areas	SED_{rt} accretion	0.031 *		
Adjacent areas	SED_{rt} accretion	0.095		
2019-2020 x 2021-2022	SED_{rt} erosion		0.400	0.233
2019-2020	SED_{rt} erosion	0.019 *		
2021-2022	SED_{rt} erosion	0.163		
Nourished x adjacent areas	SED_{rt} erosion		0.041	0.178
Nourished areas	SED_{rt} erosion	0.084		
Adjacent areas	SED_{rt} erosion	0.024 *		
2019-2020 x 2021-2022	ACF		0.735	0.077
2019-2020	ACF	0.001 *		
2021-2022	ACF	0.010 *		
Nourished x adjacent areas	ACF		0.646	0.976
Nourished areas	ACF	0.002 *		
Adjacent areas	ACF	0.029 *		

Tabel B6-3. Resultaten van de Moran's I-ruimtelijke autocorrelatieanalyse voor dagelijkse bodemhoogtedynamiek (SED_{rt}), autocorrelatiefunctie (ACF), morfodynamische windsignatuur (MDS_{wind}) en morfodynamische getijsignatuur (MDS_{tide}) voor zowel sedimentatie- als erosieprocessen over drie perioden (2019–2023, 2019–2020, 2021–2022). De waarden van Moran's I en de bijbehorende significantieniveaus (p) worden weergegeven. Een Moran's I nabij -1 wijst op perfecte spreiding, een waarde rond 0 op willekeur, en een waarde nabij 1 op sterke ruimtelijke correlatie. Een asterisk (*) duidt een positieve autocorrelatie aan met $p < 0,05$.

Period	Parameter	Spatial autocorrelation	
		Moran's I	p
2019-2022	SED_{rt} accretion	0.19	0.023 *
2019-2020	SED_{rt} accretion	0.20	0.014 *
2021-2022	SED_{rt} accretion	0.18	0.024 *
2019-2022	SED_{rt} erosion	0.18	0.024 *
2019-2020	SED_{rt} erosion	0.25	0.003 *
2021-2022	SED_{rt} erosion	0.12	0.081
2019-2020	ACF	-0.16	0.263
2021-2022	ACF	0.19	0.018 *
2019-2022	MDS_{wind} accretion	-0.09	0.621
2019-2020	MDS_{wind} accretion	-0.10	0.579
2021-2022	MDS_{wind} accretion	-0.20	0.254
2019-2022	MDS_{wind} erosion	-0.02	0.838
2019-2020	MDS_{wind} erosion	-0.16	0.251
2021-2022	MDS_{wind} erosion	-0.05	0.883
2019-2022	MDS_{tide} accretion	-0.07	0.730
2019-2020	MDS_{tide} accretion	-0.17	0.388
2021-2022	MDS_{tide} accretion	0.00	0.627
2019-2022	MDS_{tide} erosion	-0.15	0.275
2019-2020	MDS_{tide} erosion	0.21	0.011 *
2021-2022	MDS_{tide} erosion	-0.20	0.144

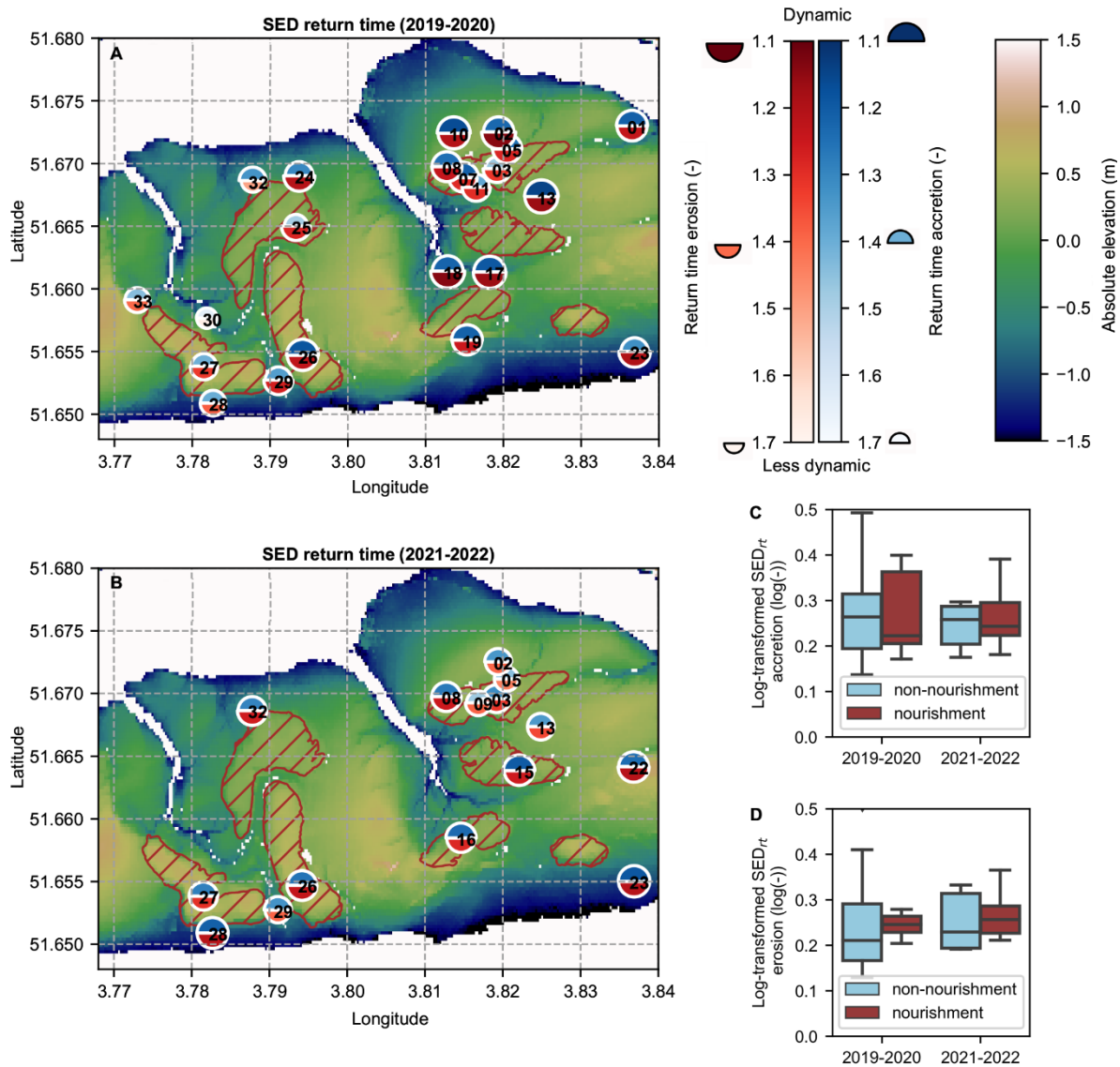
B6.3.2. Veranderingen in het dagelijkse bodemniveau

De analyse van de Surface Elevation Dynamics return period exponent (SED_{rt}) bevestigt de hoge dynamiek van de intergetijdengebieden op de Roggenplaat, met overwegend SED_{rt} -waarden lager dan 1,5 (Figuur B6-3). Deze lage waarden duiden op een regelmatige herhaling van substantiële veranderingen in het dagelijkse bodemniveau. De gemiddelde amplitudes van erosie- en sedimentatiegebeurtenissen bedroegen respectievelijk 8,49 mm (SD = 2,51 mm) en 8,12 mm (SD = 2,38 mm), die zich doorgaans op een wekelijkse schaal voordoen. Deze patronen tonen aan dat de bodem onderhevig is aan frequente en merkbare veranderingen, wat een voortdurende versterking vormt voor benthische gemeenschappen, die zich voortdurend moeten aanpassen aan deze dynamiek.

Een vergelijking tussen het eerste jaar na de suppletie (2019–2020) en de twee daaropvolgende jaren (2021–2022) liet geen statistisch significante verschillen zien in SED_{rt} -waarden (Figuur B6-3C-D; Tabel B6-2). Dit resultaat wijst erop dat de frequentie van veranderingen in het dagelijkse bodemniveau in de tijd stabiel is gebleven. Evenzo werden er geen significante verschillen gevonden tussen de gesuppleerde gebieden ($n = 9$) en de niet-gesuppleerde controlelocaties ($n = 16$), wat duidt op een uniforme dynamiek in het optreden van dagelijkse bodemveranderingen tussen beide gebiedstypen (Figuur B6-3C-D; Tabel 1-3).

De ruimtelijke analyse over de gehele dataset toonde een zwakke maar significante positieve ruimtelijke autocorrelatie van SED_{rt} , wat wijst op een ruimtelijk samenhangend patroon in de frequentie van veranderingen in het bodemniveau (Tabel B6-3). Uitzondering hierop was de erosie- SED_{rt} tijdens de periode 2021–2022, waarvoor geen significante autocorrelatie werd waargenomen. Dit suggereert dat veranderingen

in dagelijkse sedimentdynamiek niet willekeurig voorkomen, maar ruimtelijk gecoördineerd zijn tussen nabijgelegen locaties.



Figuur B6-3. Ruimtelijke autocorrelatie en temporele consistentie in de SED-returnperiode-exponent. De SED_{rt} voor sedimentatie (opwaarts gerichte blauwe halve cirkels) en erosie (neerwaarts gerichte rode halve cirkels) op de Roggenplaat. Paneel (A) toont data uit 2019–2020 en paneel (B) uit 2021–2022, die beide ruimtelijke autocorrelatie vertonen. De variatie in symboolgrootte en -kleur weerspiegelt de dynamiek tussen gebieden. De boxplots voor sedimentatie (C) en erosie (D), uitgesplitst naar periode en interventietype, benadrukken het ontbreken van significante temporele of behandelingsverschillen. De X- en Y-assen tonen coördinaten in het WGS'84-coördinatensysteem, terwijl de absolute hoogte wordt uitgedrukt ten opzichte van NAP (gemiddeld zeeniveau).

Een opvallende uitschieter in dit patroon was locatie 30 (controle), nabij een geul, die significante Z-scores vertoonde voor zowel sedimentatie- als erosiewaarden van SED_{rt} . Hoewel geulranden doorgaans worden geassocieerd met hoge erosiedynamiek op lange termijn, liet deze locatie een onverwacht lage variabiliteit zien in dagelijkse bodemveranderingen. Daarnaast werd een significante temporele verschuiving waargenomen bij locatie 5 (suppletie), waar een duidelijke afname van SED_{rt} voor sedimentatiegebeurtenissen werd vastgesteld (Figuur B6-3). Deze lokale verandering wijst op een aanpassing in de frequentie van dagelijkse bodemveranderingen, die niet overeenkomt met het algemene patroon elders op de Roggenplaat.

Samenvattend tonen de temporele en ruimtelijke analyses aan dat de terugkeerperioden van dagelijkse bodemveranderingen op de Roggenplaat een consistent patroon vertonen, onafhankelijk van de uitgevoerde

sedimentbeheermaatregelen. De uniformiteit van SED_{rt} -waarden over het gehele studiegebied suggereert dat de Roggenplaat wordt gekenmerkt door een algemene toestand van frequente verstoringen, typerend voor een dynamisch getijdenmilieu.

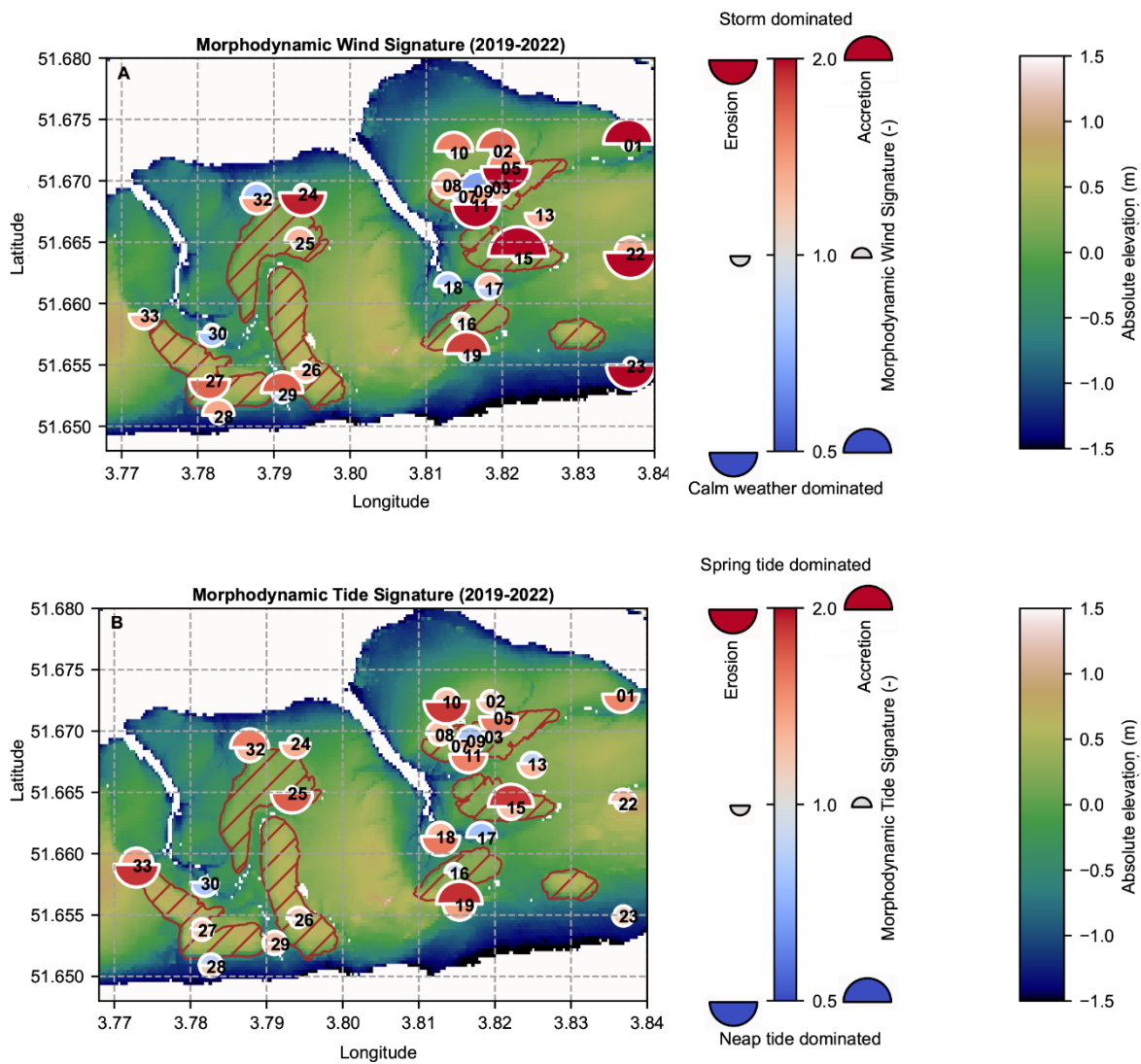
B6.3.3. Invloed van omgevingsfactoren op veranderingen in het dagelijkse bodemniveau

De waargenomen significante ruimtelijke autocorrelaties voor ACF en SED_{rt} wijzen op een zekere ruimtelijke samenhang in zowel de stabiliteit als de frequentie van veranderingen in het dagelijkse bodemniveau tussen nabijgelegen locaties. Omdat deze correlaties echter relatief zwak zijn, suggereren de resultaten dat deze dynamiek lokaal bepaald is binnen de Roggenplaat. Dit benadrukt de complexiteit van sedimentdynamiek, die vaak wordt gestuurd door plaats-specifieke reacties op omgevingsfactoren. De toepassing van de Morphodynamic Signature (MDS)-methode laat zien dat elke sensorlocatie een unieke bodemdynamische respons vertoonde op wind, die fungeert als een proxy voor door wind veroorzaakte golven en stromingen (weergegeven door de verschillende symboolgroottes en kleuren in Figuur B6-4A). Deze variatie weerspiegelt het ontbreken van een sterke ruimtelijke autocorrelatie van windinvloeden op veranderingen in het dagelijkse bodemniveau voor zowel sedimentatie- als erosieprocessen (Tabel B6-3).

Daarnaast werden er geen significante verschillen gevonden tussen behandelingen of tijdsperiodes (Tabel B6-4), wat de subtiele rol van wind onderstreept in het aansturen van veranderingen in het dagelijkse bodemniveau. Opvallende afwijkingen in de Z-scores van MDS_{wind} met name voor erosie, werden gevonden bij locaties 22 (controle) en 23 (controle) in respectievelijk 2021–2022 en 2019–2020. Voor sedimentatie werden duidelijke afwijkingen waargenomen bij locaties 1 (controle) en 15 (suppletie) in dezelfde perioden. Een vergelijking van MDS_{wind} tussen 2019–2020 en 2021–2022 toonde significante verschillen bij locaties 2 (controle) en 29 (controle) voor sedimentatiegebeurtenissen, terwijl voor erosie geen significante veranderingen werden vastgesteld. Over het algemeen vertoonde MDS_{wind} op de meeste locaties een voorkeursrichting naar sedimentatie of erosie tijdens perioden met hoge windsnelheden, onafhankelijk van de suppletiemaatregelen (Figuur B6-4A).

Na de suppletie lieten de analyses van MDS_{wind} en MDS_{tide} over de verschillende locaties grotendeels consistente responsen zien (Figuur B6-4). Hoewel elke locatie een specifieke getijrespons vertoonde, vond een aanzienlijk deel van de veranderingen in het dagelijkse bodemniveau plaats tijdens springtij (weergegeven door de grote donkere symbolen in Figuur B6-4B). Tussen de observatieperiodes werden significante verschillen alleen waargenomen voor MDS_{tide} met betrekking tot erosieprocessen (Figuur B6-5; Tabel B6-4).

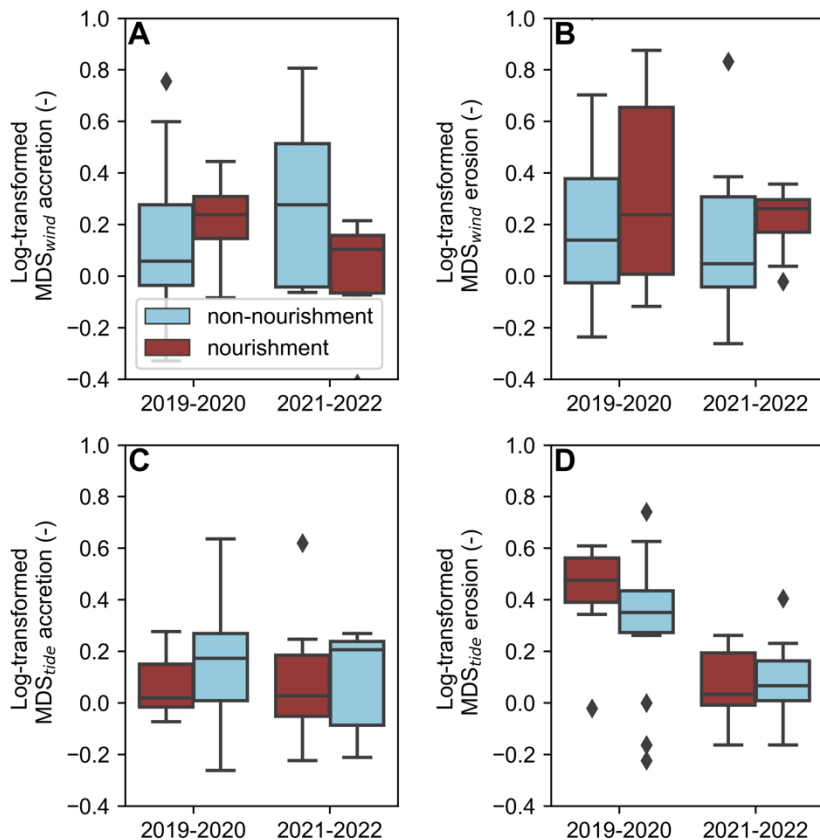
In het bijzonder vertoonden erosiegerelateerde sedimentdynamieken tijdens de latere periode (2021–2022) een afnemende correlatie met springtij, een trend die zowel in gesuppleerde als niet-gesuppleerde gebieden zichtbaar was. Daarnaast werd in 2021–2022 een zwakke maar positieve ruimtelijke autocorrelatie waargenomen voor getijgedreven erosie (Tabel B6-3). Hoewel afwijkingen in de Z-score voor MDS_{tide} voorkwamen, bleven deze beperkt tot enkele specifieke locaties en perioden, wat wijst op een overwegend constante invloed van getijdenprocessen op de Roggenplaat.



Figuur B6-4. De morfodynamische signatuur voor sedimentatie (opwaarts gerichte halve cirkels) en erosie (neerwaarts gerichte halve cirkels) op de Roggenplaat. (A) toont de morfodynamische windsignatuur (MDS_{wind}), terwijl (B) de morfodynamische getijsignatuur (MDS_{tide}) weergeeft. De data beslaan de volledige monitoringsperiode (2019–2022). Grotere symbolen vertegenwoordigen veranderingen in het dagelijkse bodemniveau veroorzaakt door extreme weers- of getijomstandigheden (zoals stormen of springtij), terwijl kleinere symbolen overeenkomen met kalme omstandigheden (zoals neap-tij). Rode kleuren geven aan dat veranderingen vooral optreden onder storm- of springtijomstandigheden, terwijl blauwe kleuren wijzen op veranderingen tijdens rustige omstandigheden. De X- en Y-assen tonen coördinaten in het WGS'84-coördinatensysteem, en de absolute hoogte is uitgedrukt ten opzichte van NAP (gemiddeld zeeniveau).

Tabel B6-4. Samenvatting van de statistische toetsen uitgevoerd om MDS_{wind} en MDS_{tide} te vergelijken voor sedimentatie en erosie tussen twee perioden (2019–2020 en 2021–2022) en twee gebieden (gesuppleerd en niet-gesuppleerd). De Shapiro–Wilk-test werd toegepast om de normaliteit te toetsen (p -waarden onder Shapiro–Wilk). De Levene-test werd gebruikt om de homogeniteit van de varianties te controleren (p -waarden onder Levene's). Omdat alle datasets niet-normaal verdeeld waren, werd de Mann–Whitney U-test gebruikt om significante verschillen te bepalen (p -waarden onder Mann–Whitney U test / T-test). Een asterisk (*) duidt een significant resultaat aan bij $p < 0,05$.

Treatment	Parameter	Shapiro-Wilk p	Levene's P	Mann-Whitney U test / T-test p
2019-2020 x 2021-2022	MDS_{wind} accretion		0.383	1.00
2019-2020	MDS_{wind} accretion	0.945		
2021-2022	MDS_{wind} accretion	0.108		
Nourished x adjacent areas	MDS_{wind} accretion		0.591	0.975
Nourished areas	MDS_{wind} accretion	0.046 *		
Adjacent areas	MDS_{wind} accretion	0.127		
2019-2020 x 2021-2022	MDS_{wind} erosion		0.150	0.581
2019-2020	MDS_{wind} erosion	0.064		
2021-2022	MDS_{wind} erosion	0.280		
Nourished x adjacent areas	MDS_{wind} erosion		0.393	0.520
Nourished areas	MDS_{wind} erosion	0.264		
Adjacent areas	MDS_{wind} erosion	0.057		
2019-2020 x 2021-2022	MDS_{tide} accretion		0.754	0.526
2019-2020	MDS_{tide} accretion	0.234		
2021-2022	MDS_{tide} accretion	0.312		
Nourished x adjacent areas	MDS_{tide} accretion		0.473	0.512
Nourished areas	MDS_{tide} accretion	0.138		
Adjacent areas	MDS_{tide} accretion	0.243		
2019-2020 x 2021-2022	MDS_{tide} erosion		0.190	<0.001 *
2019-2020	MDS_{tide} erosion	0.061		
2021-2022	MDS_{tide} erosion	0.786		
Nourished x adjacent areas	MDS_{tide} erosion		0.920	0.889
Nourished areas	MDS_{tide} erosion	0.300		
Adjacent areas	MDS_{tide} erosion	0.615		



Figuur B6-5. Verdeling van de log-getransformeerde morfodynamische signaturen over twee perioden (2019–2020 en 2021–2022) en interventietypen (suppletie en controle). De deelplots tonen: (A) MDS_{wind} voor sedimentatie, (B) MDS_{wind} voor erosie, (C) MDS_{tide} voor sedimentatie, en (D) MDS_{tide} voor erosie. De kleuren onderscheiden de behandelingen, met bruin voor suppletiegebieden en blauw voor controlegebieden. De y-as toont de log-getransformeerde waarden, wat vergelijking van de processen die veranderingen in het dagelijkse bodemniveau aandrijven vergemakkelijkt. Alleen MDS_{tide} voor erosie vertoonde een significant verschil tussen perioden.

B6.3.4. Invloed van omgevingsfactoren op bodemdynamiek

De Canonical Correlation Analysis (CCA) uitgevoerd over alle sensorlocaties op de Roggenplaat had tot doel de interactie tussen omgevingsfactoren en bodemdynamiek te begrijpen en zo bij te dragen aan een bredere interpretatie van de processen die veranderingen in het dagelijkse bodemniveau aansturen. De analyse leverde een canonische correlatiecoëfficiënt van $-0,39$ op, wat duidt op een matige inverse relatie tussen de langetermijnveranderingen in relatieve bodemhoogte en de omgevingsfactoren windsnelheid, windrichting, getijamplitude en absolute hoogte. De absolute hoogte kwam naar voren als de belangrijkste factor die de relatieve bodemhoogte beïnvloedt (loading = $-0,95$), wat suggereert dat gebieden met een hogere ligging gevoeliger zijn voor erosie. De getijamplitude vertoonde een secundaire invloed (loading = $-0,27$), wat wijst op een aanvullende, maar minder uitgesproken rol in de langetermijndynamiek van de bodemhoogte. Daarentegen hadden windsnelheid ($0,15$) en windrichting ($-0,06$) slechts een geringe invloed op de relatieve bodemhoogte. Voor de veranderingen in het dagelijkse bodemniveau werd windrichting geïdentificeerd als de dominante drijvende kracht (loading = $0,81$), terwijl windsnelheid een negatieve relatie vertoonde (loading = $-0,56$), wat impliceert dat hogere windsnelheden gepaard gaan met een grotere kans op dagelijkse erosie-evenementen. De absolute hoogte en getijamplitude vertoonden lage loadings ($-0,18$ respectievelijk $0,08$), wat aangeeft dat hun directe invloed op dagelijkse bodemveranderingen beperkt is. Samenvattend wijzen de CCA-resultaten erop dat absolute hoogte en getijdenprocessen de belangrijkste factoren zijn voor langetermijnveranderingen, terwijl windgedreven golven en stromingen de dominante mechanismen vormen voor dagelijkse bodemveranderingen.

De Generalized Linear Model (GLM)-analyse, toegepast per sensorlocatie, bood aanvullende inzichten op lokale schaal. In tegenstelling tot de shoal-brede relevantie van windrichting zoals aangetoond door CCA,

identificeerde de GLM-analyse windrichting niet consistent als significante factor voor veranderingen in het dagelijkse bodemniveau. Enkele locaties vertoonden wel een significante relatie tussen de dagelijkse bodemveranderingen en de sinuscomponent van de windrichting, wat duidt op een oriëntatie-afhankelijke invloed, maar dit patroon werd niet uniform waargenomen. Daarentegen bleek windsnelheid een consistentere en belangrijkere factor voor veranderingen in het dagelijkse bodemniveau, zowel in de gesuppleerde als in de aangrenzende gebieden, zij het met variërende mate van significantie. Dit wijst erop dat fysische processen aangedreven door windsnelheid, zoals windgedreven golven en stromingen, essentiële drijvers zijn van de dagelijkse sedimentdynamiek op een intergetijdengebied. De absolute hoogte had een waarneembaar effect op specifieke locaties, wat de lokale rol van morfologische positie in dagelijkse bodemdynamiek onderstreept, hoewel dit niet werd vastgesteld voor de gesuppleerde zones. De getijamplitude had daarentegen slechts een significante invloed op locatie 24 (controle), waarmee de ruimtelijk beperkte invloed van getijdenprocessen op de dagelijkse variabiliteit wordt bevestigd.

Samenvattend: de gecombineerde analyses tonen aan dat de dagelijkse bodemdynamiek op de Roggenplaat hoofdzakelijk wordt gestuurd door windgedreven processen, met absolute hoogte en getijdeninvloed als secundaire modulators. De lokale variatie in respons benadrukt het belang van kleinschalige morfologische en hydrodynamische verschillen bij het verklaren van de ruimtelijke heterogeniteit van sedimentdynamiek.

B6.4 Discussie

Deze studie biedt nieuwe inzichten in de dagelijkse bodemniveau-dynamiek op een gesuppleerde intergetijdensandplaat, gebaseerd op dagelijkse metingen over een periode van drie jaar na uitvoering van een intergetijdensuppletie. Door de relatieve oppervlaktestijging continu te monitoren, konden we analyseren hoe een dergelijke sedimentbeheer-ingreep samenwerkt met lokale sedimentdynamiek. Belangrijk is dat er geen significante verschillen zijn waargenomen tussen gesuppleerde en niet-gesuppleerde gebieden, wat wijst op een beperkte invloed van de suppletie op zowel de omvang als de drijvende krachten van dagelijkse bodemveranderingen. Dit suggereert dat beide gebieden in staat zijn benthische gemeenschappen met vergelijkbare mobiliteitseigenschappen te ondersteunen, zoals ook in eerdere studies is aangetoond (van Belzen et al., 2022; Wiesebron et al., 2022; Zhou et al., 2024). Over het geheel genomen onthulde de driejarige monitoring bredere patronen op de zandplaat, gekenmerkt door (1) lage temporele stabiliteit, (2) frequente dagelijkse verstoringen, en (3) morfologische vorming door gecombineerde wind- en getijdeninvloeden.

B6.4.1. Kortetermijn-variabiliteit van het bodemniveau

Er werden matige maar consistente temporele autocorrelaties (ACF) van het bodemniveau waargenomen over alle locaties, onafhankelijk van de suppletietoestand. Deze uniformiteit in de relatieve langetermijnveranderingen van het bodemniveau suggereert dat de suppletie geen significante veranderingen in sedimentprocessen op schaal van de zandplaat teweegbracht. De lage SED_{τ} -waarden ($< 1,5$) wijzen echter op een sterk dynamisch systeem op dagelijkse schaal, met frequentere en grotere veranderingen in het bodemniveau dan gerapporteerd voor vergelijkbare platen in de Oosterschelde en Westerschelde (Hu et al., 2021). Deze dynamiek creëert waarschijnlijk omstandigheden die gunstig zijn voor benthische soorten met een hoge mobiliteit (Zhou et al., 2024). De waargenomen episodische veranderingen in het dagelijkse bodemniveau worden vermoedelijk veroorzaakt door een complex samenspel van omgevingsfactoren, waaronder door wind aangedreven golven en stromingen (de Vet et al., 2020; Friedrichs, 2012; Hu et al., 2017; Zhu et al., 2017).

B6.4.2. Wind-gedreven sedimentdynamiek

Onze resultaten tonen aan dat de dagelijkse bodemveranderingen sterk samenhangen met windkracht, waarbij zowel erosie- als sedimentatiegebeurtenissen nauw verbonden zijn met hogere windsnelheden (MDS_{wind}). De CCA-analyse toonde aan dat windrichting de dagelijkse bodemveranderingen over de zandplaat beïnvloedt, maar de GLM-analyse liet zien dat dit verband niet consistent optreedt op individuele locaties. In plaats daarvan bleek windsnelheid de meest constante en dominante factor, wat de invloed van windgedreven golven en stromingen op sedimentmobiliteit benadrukt.

De CCA liet verder zien dat hogere windsnelheden, vooral op hogere delen van de zandplaat, leiden tot negatieve veranderingen in het dagelijkse bodemniveau, wat duidt op verhoogde erosie. Dit betekent dat gesuppleerde, hoger gelegen zones gevoeliger zijn voor erosie bij sterke wind. Opvallend is dat de suppleties die aan zuidwestelijke wind zijn blootgesteld bewust met grotere hoogte ($\approx 0,7$ m + NAP) zijn aangelegd dan de beschutte suppleties ($\approx 0,4$ m + NAP), om deze gevoeligheid te compenseren.

Samenvattend bevestigen de resultaten van drie jaar veldmetingen de centrale rol van windforcing, die voorheen voornamelijk op basis van modelstudies werd verondersteld (de Vet et al., 2018; Zheng et al., 2021). De bevindingen sluiten aan bij metingen op getijdenvlakten en kustgebieden elders (Belliard et al., 2019; Hu et al., 2017; Lee et al., 2004; Mulligan et al., 2019). Op de Roggenplaat beïnvloeden deze processen waarschijnlijk zowel kreekmigratie als veranderingen in de absolute hoogte (de Vet et al., 2018), en kunnen zij de mobiliteit van benthische fauna in meer blootgestelde gebieden bepalen (Wiesebron et al., 2022; Zhou et al., 2024).

B6.4.3. Getij-gedreven sedimentdynamiek

Zowel de morfodynamische signaturen voor wind (MDS_{wind}) als voor getij (MDS_{tide}) benadrukken de invloed van stormen en springtij op de veranderingen van het dagelijkse bodemniveau, terwijl rustig weer en doottij slechts een beperkte invloed hebben. Hoewel noch de CCA noch de GLM een significante invloed van getij-amplitude op dagelijkse bodemveranderingen identificeerden, toonde de CCA wel aan dat getij-amplitude en absolute hoogte samen de langetermijnveranderingen in relatieve bodemhoogte bepalen.

Dit bevestigt eerdere studies waarin getijdenprocessen als bepalende factor voor grootschalige morfodynamische evolutie op langere tijdschalen worden beschouwd (de Vet et al., 2018; Zheng et al., 2021), eerder dan voor kleinschalige dagelijkse fluctuaties (Friedrichs, 2012; Hu et al., 2017). Niettemin kunnen getijstromingen lokale vorming en migratie van bodemvormen veroorzaken, processen die op middellange termijn plaatsvinden en waarschijnlijk worden vastgelegd in het cumulatieve MDS_{tide} -signaal. Voor de Roggenplaat lijken getijdenkrachten cyclische veranderingen te veroorzaken (van doottij naar springtij en terug), in plaats van dagelijkse variaties, zoals blijkt uit het ontbreken van correlaties in de CCA- en GLM-resultaten.

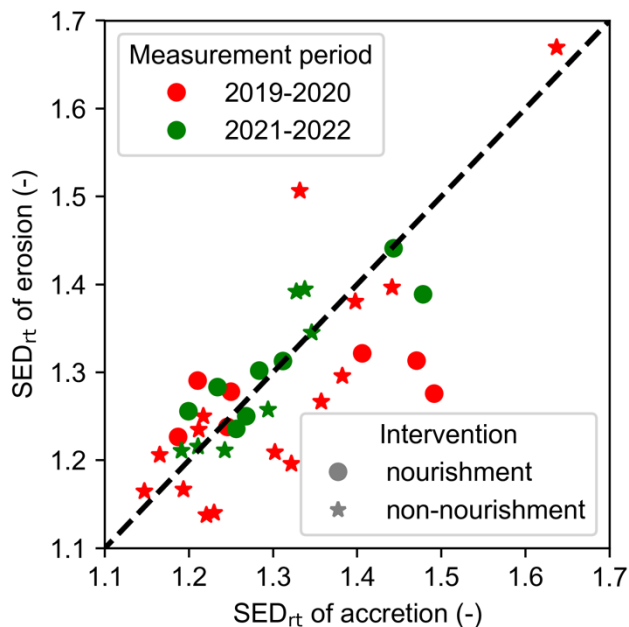
B6.4.4. Evaluatie van de bodemniveau-variabiliteit

De lage ACF-waarden over de Roggenplaat wijzen op een hoge mate van bodemvariabiliteit, vergelijkbaar met die in intergetijdengebieden van de Westerschelde waar kribben zijn aangelegd (Grandjean et al., 2023). Deze lage temporele stabiliteit weerspiegelt waarschijnlijk de erosieve en afvlakkende trends die kenmerkend zijn voor de intergetijdengebieden van de Oosterschelde (de Vet et al., 2017), evenals de blootstelling aan dominante zuidwestelijke winden. Ondanks deze fluctuaties tonen de consistente temporele en ruimtelijke patronen in ACF en SED_{rt} aan dat de omgeving in termen van dagelijkse bodemveranderingen relatief homogeen is. Hierdoor zijn eventuele verschillen in benthische gemeenschappen tussen gesuppleerde en controlegebieden waarschijnlijk niet direct gerelateerd aan dagelijkse bodemvariabiliteit.

B6.4.5. Vooruitblik: implicaties voor de benthische gemeenschappen

Tijdens de onderzoeksperiode werd een convergentie van de SED_{rt} -waarden voor zowel sedimentatie als erosie waargenomen, voornamelijk veroorzaakt door een stijging van de SED_{rt} voor erosie (Figuur B6-6). Aangezien hogere SED_{rt} -waarden duiden op minder frequente extreme gebeurtenissen, wijst deze convergentie op een stabiel fysisch milieu. Dergelijke omstandigheden kunnen bijdragen aan herstel en stabilisatie van benthische gemeenschappen, vergelijkbaar met de waarnemingen drie jaar na de pilotsuppletie op de Galgenplaat (van der Werf et al., 2015).

Verschillen in benthische abundantie kort na een suppletie worden vaak toegeschreven aan rekruteringsstijd na verstoring (Saengsupavanich et al., 2023), absolute hoogte of sedimentsamenstelling (Vanden Eede et al., 2014). Mogelijk zijn bestaande gemeenschappen aanvankelijk begraven tijdens de suppletie. Onze resultaten wijzen er echter op dat de vergelijkbare SED_{rt} - en ACF-waarden tussen gesuppleerde en aangrenzende gebieden geen wezenlijk verschillend fysisch stressregime impliceren. Deze homogeniteit in sediment-dynamiek suggereert dat benthische soorten met vergelijkbare mobiliteitseigenschappen in beide gebieden kunnen voorkomen, wat erop wijst dat fysische verstoringniveaus geen beperkende factor vormen voor het herstel van benthische gemeenschappen op de Roggenplaat.



Figuur B6-6. Convergentie van de SED -terugkeerperiode-exponent voor zowel sedimentatie als erosie door de tijd. De figuur toont dat de SED_{rt} -waarden voor sedimentatie en erosie geleidelijk naar elkaar toe bewegen (richting de 1:1-lijn), wat wijst op vergelijkbare frequenties van erosie- en sedimentatie-gebeurtenissen en mogelijk duidt op stabilisatie van de fysische omgeving.

Bijlage 7 Functionele vogelprofielen en eco-morfologische niches van kustvogels

B7.1 Inleiding

De suppletie op de Roggenplaat werd uitgevoerd met een doel dat duidelijk afwijkt van de gangbare motieven voor zandsuppleties in Nederland. Waar suppleties doorgaans worden toegepast om de kustlijn te stabiliseren of infrastructuur te beschermen, stond hier het behoud en herstel van foerageerhabitat voor beschermde kustvogels centraal. Het project vormt daarmee een uniek voorbeeld van het gebruik van zand als natuurmaatregel: een ingreep die expliciet is bedoeld om het verlies aan intergetijdengebied door erosie tegen te gaan en zo de instandhoudingsdoelstellingen te halen. Een belangrijke vraag daarbij is of de vogels daadwerkelijk hebben geprofiteerd van deze suppletie, en op welke wijze de morfologische veranderingen van de plaat zich vertalen in ecologisch functionele habitats.

In hoofdstuk 4 brengen we de inzichten uit vijf jaar monitoring samen en werken we toe naar een geïntegreerd beeld van de eco-morfologische ontwikkeling van de Roggenplaat na suppletie. We leggen daarbij nadruk op het verbinden van disciplines vanuit het vogelperspectief: we relateren het gebruik van de getijdenplaat door vogels aan de aanwezigheid en ontwikkeling van bodemdieren, de morfologie en de sedimentdynamiek die samen de basis vormen van de habitatkwaliteit.

Om deze integratie te structureren, gebruiken we het foerageergedrag en de habitatkeuzes van kustvogels als centrale invalshoek. De reden hiervoor is tweeledig:

- Doelsoorten centraal: het behoud van foeragerende kustvogels – met name steltlopers en bergeend (Tabel 1-1) – vormde het primaire motief voor de maatregel.
- Vogels als indicatoren: als toppredatoren en indicatorsoorten maken vogels ecologische processen zichtbaar die anders moeilijk te duiden zijn op het schaalniveau van een getijdenplaat.

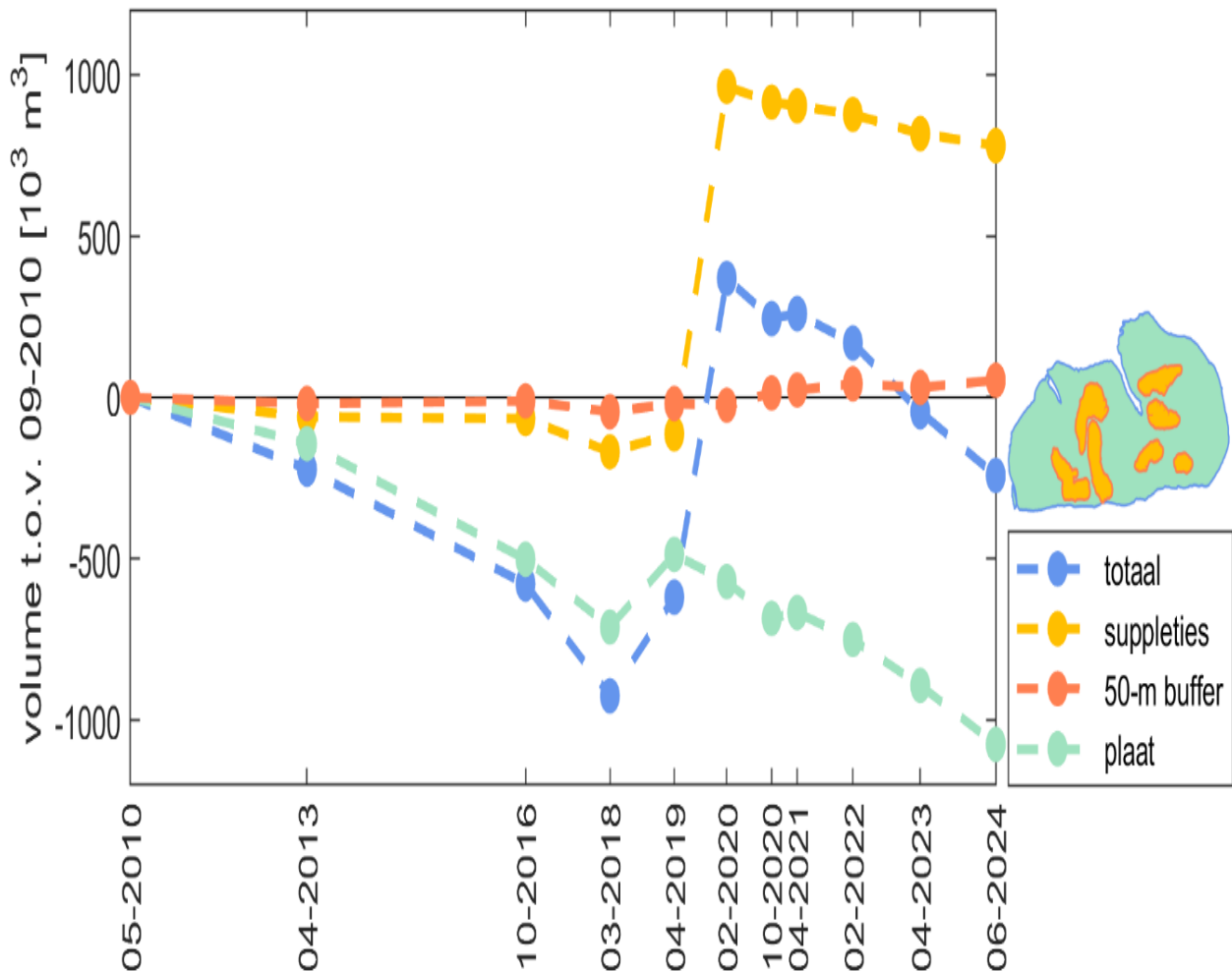
In deze bijlage beschrijven we de functionele profielen van kustvogels die de Roggenplaat benutten, analyseren we de overlap en differentiatie in hun foerageerniches. Het plaatsen van de waargenomen vogelontwikkelingen in de context van de morfologische veranderingen van de Roggenplaat worden in hoofdstuk 4. De resultaten in deze bijlage als onderbouwing van de synthese in hoofdstuk 4, waarin de interactie tussen morfologische ontwikkeling en ecologische benutting integraal wordt besproken.

B7.2 Methodiek: opstellen en analyseren van vogelprofielen

Om inzicht te krijgen in de functionele diversiteit van kustvogels die de Roggenplaat benutten als foerageergebied, is een kenmerkenbenadering toegepast. Daarbij zijn voor alle relevante soorten – de doelsoorten uit Tabel 1-1, aangevuld met andere kustvogels die de Roggenplaat (kunnen) gebruiken – functionele profielen opgesteld (*Tabel B7-1*).

De profielen zijn gebaseerd op literatuur en expertkennis en beschrijven per soort een reeks morfologische en ecologische eigenschappen die bepalend zijn voor het foerageergedrag en de habitatkeuze. Deze eigenschappen omvatten onder andere lichaamsgrootte en -massa, snavel- en pootlengte, foerageerstrategie, zoekgedrag, dieetvoorkeur en habitatvoorkeur. De voedselvoorkeuren spelen hierbij een centrale rol, omdat deze in belangrijke mate de ruimtelijke verdeling en de overlap tussen soorten bepalen.

Figuur B7-1 toont in een driehoekdiagram (ternary plot) de relatieve dieetvoorkeur van de belangrijkste kustvogelsoorten, met onderscheid tussen wormen, schelpdieren en schaaldieren/anders. Deze figuur illustreert de functionele differentiatie in voedselstrategie tussen soorten en vormt samen met gegevens op basis van *Tabel B7-1* de basis voor de statistische analyse.



Figuur B7-1. Vogelsoort-specifieke voedselvoorkeuren. Deze driehoekfiguur geeft de voedselvoorkeuren weer van de doelsoorten (rode labels) en andere waargenomen vogelsoorten op de Roggenplaat (gemodificeerd en uitgebreid naar Leopold et al., 2004). De assen van de driehoek representeren: Schelpdieren en wormen (endobenthisch –in de bodem- voedsel), schaaldieren/anders, waaronder vooral epibenthische –op/boven de bodem- schaaldieren, wadslakjes, alikruiken en wieren vallen. Vogels die in de hoeken van de driehoek staan, hebben een duidelijke voorkeur voor één type voedsel. Soorten die in het midden van de driehoek staan, zijn minder specifiek en eten een gevarieerd dieet.

Om tot een integrale analyse vanuit vogelperspectief te komen, zijn de volgende stappen uitgevoerd:

- Opstellen van vogelprofielen: voor 22 kustvogelsoorten zijn functionele kenmerken verzameld die hun gebruik van getijdenplaten als foerageerhabitat typeren.
- Analyse van variatie en overeenkomsten: met behulp van multivariate statistiek (PCA) is de variatie in functionele kenmerken onderzocht en zijn vogels ingedeeld in functionele groepen met vergelijkbare morfologie en foerageerstrategie.
- Vergelijking met veldwaarnemingen (hoofdstuk 4): de verwachte habitatbenutting op basis van de profielen is vergeleken met de feitelijke waarnemingen van vogels op de Roggenplaat. Daar waar afwijkingen optreden, worden deze geïnterpreteerd in de context van de waargenomen veranderingen in morfologie, sedimentdynamiek en bodemdiergemeenschap.

De resulterende functionele indeling maakt het mogelijk om verschillen in habitatgebruik en het effect van morfologische veranderingen op groepsniveau te analyseren, waarbij de doelsoorten fungeren als indicatorsoorten voor bredere functionele niches.

Tabel B7-1. Beschrijving van de morfologische kenmerken van de vogelsoorten.

Kenmerk	Beschrijving	Ecologische betekenis / interpretatie
Snavelengte (neuspunt tot snavelpunt)	Afstand van de voorrand van de neusgaten tot de punt van de snavel.	Indicatief voor voedseltype en foerageerstrategie; langere snavel bij soorten die in bodem of bloemen peuren.
Snavelengte (culmen)	Lengte langs de bovensnavel van de snavelbasis tot de punt.	Alternatieve maat voor totale snavelengte; nuttig bij vergelijkingen tussen soorten met verschillende snavelvormen.
Snavelbreedte	Breedte van de snavel bij de voorrand van de neusgaten.	Breedte bepaalt vaak wat voor voedsel kan worden opgenomen (bijv. zaden versus insecten).
Snaveldiepte	Verticale hoogte van de snavel bij de voorrand van de neusgaten.	Gerelateerd aan bijtkracht; diepere snavel bij zaadeters.
Tarsuslengte (pootlengte)	Afstand van het midden van het enkelgewricht tot het einde van de laatste schub van het onderbeen (acrotarsium).	Geeft inzicht in de levenswijze: langere tarsen bij lopende of wadende soorten.
Vleugellengte	Afstand van het polsgewricht tot de vleugelpunt.	Indicator van vliegvermogen; langere vleugels bij migrerende soorten.
Kipp's afstand (vleugelvormmaat)	Afstand van de punt van de eerste secundaire veer tot de punt van de langste primaire veer op een gevouwen vleugel.	Maatstaf voor de hand-wing index; hogere waarden duiden op langere, spitsere vleugels en groter verspreidingsvermogen.
Lengte van secundaire veren	Afstand van het polsgewricht tot de punt van de eerste secundaire veer.	Gebruikt bij berekening van vleugelvorm; beïnvloedt lift en wendbaarheid.
Hand-vleugelindex	Verhouding van de lengte van de handvleugel tot de totale vleugellengte.	Geeft vleugelvorm aan; hogere waarden duiden op lange, spitsere vleugels voor efficiënt vliegen en migratie, lagere waarden op afgeronde vleugels voor wendbaarheid.
Staartlengte	Afstand van de punt van de langste staartveer tot het punt waar de middelste staartveren uit de huid komen.	Belangrijk voor balans, wendbaarheid en communicatie (baltsgedrag).
Lichaamsgewicht (massa)	Gewicht van de vogel.	Fundamentele maat voor energiegebruik, vliegefficiëntie en thermoregulatie.

B7.2.1. Morfologische eigenschappen van kustvogels

Voor de karakterisering van kustvogelsoorten zijn morfologische gegevens gebruikt uit de AVONET-database (Pigot et al., 2020; Tobias et al., 2022). Deze wereldwijde dataset bevat gedetailleerde informatie over lichaamsmaten, massa, snavelvorm en andere functionele kenmerken van vogelsoorten op basis van museumcollecties. Op basis van deze gegevens zijn de fysieke eigenschappen van de relevante kustvogelsoorten vastgesteld en gebruikt om hun ecologische rol en niche te typeren.

Deze morfologische kenmerken vormen een belangrijke schakel tussen de abiotische randvoorwaarden (zoals sedimenttype, droogvalduur en waterdiepte) en de biotische processen (zoals voedselbeschikbaarheid en predatie). Daarmee kunnen de waargenomen relaties tussen fysische ontwikkeling en vogelgebruik op de suppleties (zie hoofdstuk 3 en bijlage 3) in een functioneel kader worden geplaatst en kwalitatief worden vergeleken.

De belangrijkste functionele kenmerken die zijn meegenomen, zijn:

- Lichaamsgrootte en -massa: deze bepalen in sterke mate de energiebehoefte, foerageertijd en het ruimtelijk gebruik van het foerageergebied. Grotere soorten hebben doorgaans een groter energieverbruik, maar ook een grotere actieradius.
- Snavel- en pootlengte: deze eigenschappen bepalen de bereikbaarheid van prooien in verschillende sedimenttypes en waterdieptes. Soorten met een lange snavel en lange poten kunnen dieper

foerageren of ondieper water benutten, terwijl kortere snavels en poten beter passen bij droogvallende, fijnkorrelige sedimenten.

NB. Bij het meten van snavellengte wordt gebruikgemaakt van de culmen. Dit is een ornithologische term die verwijst naar de bovenrand van de bovensnavel. Concreet is dit de denkbeeldige lijn die loopt van het punt waar de snavel aan het voorhoofd begint (de snavelbasis, bij het voorhoofd of de neusgaten) tot aan de punt van de snavel. De meting volgt de kromming van de bovensnavel, niet een rechte lijn, en wordt doorgaans aangeduid als beak length (culmen).

Deze morfologische parameters vormen samen met gedrags- en dieetkenmerken (beschreven in paragraaf B7.2.2) de basis voor de functionele analyse van de vogelgemeenschap op de Roggenplaat.

B7.2.2. Ecologische niche

Om de ecologische niches van kustvogels op de Roggenplaat in kaart te brengen, zijn soortspecifieke profielen opgesteld op basis van literatuurstudie en expertkennis. Hierbij is gebruikgemaakt van bestaande onderzoeken naar voedselvoorkeuren en foerageergedrag (Leopold et al., 2004; Zwart et al., 2011), eerdere studies in de Oosterschelde (Bouwmeester, 2015; Van de Kam et al., 2017) en recente synthèses van expertkennis (De Vet et al., 2023; Jacobusse, 2014).

De profielen beschrijven voor elke soort de belangrijkste functionele ecologische eigenschappen die bepalend zijn voor het gebruik van intergetijdengebieden als foerageerhabitat. Daarbij zijn met name de volgende kenmerken meegenomen:

- Voedselvoorkeur en dieetbreedte: het relatieve aandeel van prooitypen (wormen, schelpdieren en schaaldieren/anders) en de mate van specialisatie of generalisme in het dieet.
- Foerageergedrag: onderscheid tussen endobenthische soorten, die bodemdieren zoeken in het sediment, en epibenthische soorten, die vooral foerageren óp of boven het oppervlak.
- Zoekstrategie: de manier waarop prooien worden opgespoord, variërend van visueel (zoeken op zicht) tot tactiel (zoeken op tast).

De combinatie van deze kenmerken bepaalt in belangrijke mate de ecologische niche van elke soort – de functionele ruimte waarin zij optimaal gebruik kunnen maken van de beschikbare habitats en voedselbronnen.

Op basis van de verzamelde gegevens zijn voor alle relevante soorten – de doelsoorten uit Tabel 1-1, aangevuld met andere kustvogelsoorten die de Roggenplaat benutten – functionele profielen opgesteld (Tabel B7-2). Figuur B7-1 toont in een driehoekdiagram (ternary plot) de relatieve dieetvoorkeur van de belangrijkste kustvogelsoorten, met onderscheid tussen wormen, schelpdieren en schaaldieren/anders. Deze profielen vormen de basis voor potentieel latere clustering in functionele groepen en de analyse van niche-overlap, waarmee de relatie tussen habitatontwikkeling en vogelgebruik op getijdenplaten kwalitatief en kwantitatief kan worden vergeleken.

B7.2.3. Functionele benadering

Om ecologische patronen en habitatgebruik van kustvogels op de Roggenplaat beter te begrijpen, is naast een soortspecifieke benadering ook gekeken naar functionele kenmerken die het foerageergedrag en de habitatvoorkeur bepalen. Door niet alleen per soort, maar op basis van gedeelde functionele eigenschappen te analyseren, kunnen we ook inzicht krijgen in het potentieel habitatgebruik van minder waargenomen of afwezige soorten met vergelijkbare kenmerken. Deze benadering maakt het mogelijk om ecologische relaties op een hoger niveau te koppelen aan veranderingen in de fysieke inrichting en ontwikkeling van de getijdenplaat, inclusief de suppleties.

PCA-analyse op functionele kenmerken

Om de onderlinge relaties tussen soorten op basis van hun functionele eigenschappen te verkennen, is een Principal Component Analysis (PCA) uitgevoerd. PCA reduceert de veelheid aan kenmerken tot enkele hoofdassen (principale componenten) die de belangrijkste variatie tussen soorten verklaren. Dit maakt het mogelijk om soorten te positioneren in een multidimensionale ruimte, waarin nabijgelegen soorten vergelijkbare eigenschappen delen.

Tabel B7-2. Vogelprofielen met de meest relevante functionele eigenschappen, geselecteerd uit een uitgebreidere database. Er is een beperkt aantal doelsoorten geanalyseerd om verbanden vast te stellen tussen foerageergedrag en omgevingsfactoren. In rood staan de soorten weergegeven die als individuele soort zijn geanalyseerd, en in blauw staan de Ruiters (*Tringa spp.*) die als groep zijn geanalyseerd (Bijlage 3.B3.3.1).

Naam	Doelsoort	Gewicht (g)	Snavel-lengte (mm)	Tarsus lengte (mm)	% Schelpdier	% worm	% anders	% epi-benthos	% Endo-benthos	Zoekstrategie	Substraat (µm)
steenloper (<i>Arenaria interpres</i>)	ja	136	25.4	25.5	20	5	75	75	25	visual	125-250
driesteenstandloper (<i>Calidris alba</i>)		51.7	30	23.1	8.7	37.5	53.8	32.5	67.5	visual/ tactile	250-500
bonte strandloper (<i>Calidris alpina</i>)	ja	51.9	36.9	24.7	13.8	66.4	19.8	19.3	80.7	tactile	125-250
kanoet (<i>Calidris canutus</i>)	ja	141.9	37.5	29.9	69.5	1.4	29.1	26.7	73.3	tactile	125-250
strandplevier (<i>Charadrius alexandrinus</i>)	ja	42.3	16.3	26.5	0	26.9	73.1	26.9	73.1	visual	125-250
bontbekplevier (<i>Charadrius hiaticula</i>)	ja	64	16.1	25.3	1.2	68.9	29.9	27	73	visual	125-250
kokmeeuw (<i>Chroicocephalus ridibundus</i>)		284	43.4	41.4	24	37	39	39	61	visual	125-250
kleine zilverreiger (<i>Egretta garzetta</i>)		312	94.6	98.8	0	0	100	100	0	visual	250-500
scholekster (<i>Haematopus ostralegus</i>)	ja	526	76.1	49.9	76.3	11.6	12.1	23.7	76.3	visual/ tactile	125-250
zilvermeeuw (<i>Larus argentatus</i>)		1091	74	63.2	63.7	1.8	34.5	34.5	65.5	visual	125-250
stormmeeuw (<i>Larus canus</i>)		412.5	47.8	49.4	36	27	37	37	63	visual	125-250
rosse grutto (<i>Limosa lapponica</i>)	ja	291.7	92.5	53.2	2.9	84.2	12.8	8.9	91.1	tactile	125-250
wulp (<i>Numenius arquata</i>)	ja	803	145.8	82.7	37.7	35.2	27.1	27.7	72.3	tactile	250-500
regenwulp (<i>Numenius phaeopus</i>)		364.6	92.1	59.9	0	0	100	100	0	tactile	250-500
lepelaar (<i>Platalea leucorodia</i>)		1868	190.3	129	0	0	100	0	100	tactile	125-250
zilverplevier (<i>Pluvialis squatarola</i>)	ja	250	32	44.5	9.3	80	10.7	16.9	83.1	visual	125-250
kluut (<i>Recurvirostra avosetta</i>)	ja	304	83.7	86.9	5	90	5	5	95	tactile	63-125
eidereend (<i>Somateria mollissima</i>)		2060.9	62.1	47.5	90	1	9	9	91	visual	125-250
Bergeend (<i>Tadorna tadorna</i>)	ja	1146.8	54.2	51.6	35	5	60	60	40	visual	63-125
zwarte ruiter (<i>Tringa erythropus</i>)	ja	158	63	57.2	3.4	29.1	53.1	53.1	32.6	visual/ tactile	63-125
Groenpootruiter (<i>Tringa nebularia</i>)	ja	187	63.6	58	0	8.6	91.4	91.4	8.6	visual/ tactile	125-250
Tureluur (<i>Tringa totanus</i>)	ja	129	45.1	47.3	10.9	42.9	46.2	48.7	51.3	visual/ tactile	63-125

De PCA is in twee stappen uitgevoerd:

- PCA op morfologische kenmerken – Hierbij zijn kenmerken zoals lichaamsmassa, lichaamslengte, snavel-lengte en pootlengte gebruikt. Deze variabelen geven inzicht in de fysieke mogelijkheden van soorten om in verschillende sedimenttypen en waterdieptes te foerageren.
- PCA op ecologische nichekenmerken – In deze analyse zijn gedrags- en habitatkenmerken meegenomen, zoals foerageerstrategie (endo- versus epibenthisch), zoekstrategie (visueel versus tactiel) en voedselvoorkeur (wormen, schelpdieren, schaaldieren/anders). Hiermee wordt de ruimtelijke en functionele niche van elke soort gekarakteriseerd.

Interpretatie en clustering

De eerste twee PCA-componenten verklaren samen het grootste deel van de variatie binnen de dataset. Soorten die dicht bij elkaar liggen in de PCA-ruimte vertonen overeenkomstige morfologische of ecologische niche-eigenschappen. Op basis van deze patronen kunnen functionele groepen worden onderscheiden, bijvoorbeeld 'diepzoekende wormeneters', 'oppervlakte-foeragerende schelpdiereters' of 'visueel jagende soorten'.

Hoewel in deze studie nog geen formele clustering of indeling in functionele groepen is uitgevoerd, laten de PCA-resultaten zien dat dit in de toekomst goed mogelijk is. Een dergelijke indeling zou het mogelijk maken om doelsoorten te gebruiken als indicatorsoorten voor bredere functionele groepen. Als de habitat geschikt is voor een doelsoort, kan dan worden aangenomen dat verwante soorten met vergelijkbare functionele eigenschappen waarschijnlijk ook profiteren.

Toepassing voor evaluatie van de suppleties

De functionele benadering biedt een robuuster kader om te beoordelen in hoeverre de suppleties voorzien in de ecologische voorwaarden die aansluiten bij de behoeften van verschillende groepen vogels. Door de nadruk te leggen op gedeelde ecologische functies – zoals de beschikbaarheid van ondiepe foerageerzones of specifieke voedseltypen – ontstaat een beter inzicht in hoe de maatregelen bijdragen aan een functioneel divers en veerkrachtig foerageerlandschap. De resultaten van deze analyses worden gepresenteerd in de volgende sectie Figuur B7-2 (PCA morfologie) en Figuur B7-3 (PCA ecologische niche).

B7.3 Resultaten

B7.3.1. Morfologische vogeleigenschappen

Om patronen in de morfologische variatie tussen vogelsoorten te identificeren, is een Principal Component Analysis (PCA) uitgevoerd. Deze analyse brengt de belangrijkste dimensies van variatie in kaart en maakt het mogelijk om soorten te positioneren langs interpreteerbare assen, die corresponderen met functionele verschillen in lichaamsbouw en foerageerpotentieel (Figuur B7-1).

De eerste hoofdas (PC1) verklaart het grootste deel van de variatie in de morfologische dataset (72,3%). Alle top-vijf variabelen met de hoogste bijdrage aan PC1 – lengte van de secundaire veren, lichaamsgewicht, vleugellengte, snaveldiepte en staartlengte – hebben positieve en vergelijkbare loadings. Dit duidt erop dat PC1 een algemene maat voor lichaamsgrootte vertegenwoordigt. Soorten met hoge PC1-scores zijn over het algemeen zwaarder en groter, met langere vleugels, staarten en snavels (bijv. scholekster, wulp), terwijl soorten met lage PC1-scores kleiner en lichter zijn, met kortere vleugels en snavels (bijv. strandloper-soorten).

De tweede hoofdas (PC2) verklaart 15,8% van de variatie en onderscheidt soorten op basis van vleugelvorm versus snavelvorm. Variabelen die gerelateerd zijn aan vliegvermogen – zoals de hand-vleugelindex en Kipp's distance – hebben sterke negatieve loadings, terwijl snavelvormvariabelen positief bijdragen. PC2 kan daarom worden geïnterpreteerd als een vorm- of aanpassingsas die het contrast weergeeft tussen aerodynamische soorten met sterke vliegeigenschappen (negatieve kant) en soorten met relatief lange snavels, aangepast aan foerageren in dieper of natter sediment (positieve kant).

De derde hoofdas (PC3) verklaart nog 6,8% van de totale variatie (de eerste drie componenten samen verklaren 94,8%). Deze as onderscheidt soorten met een lange, smalle snavel (negatieve kant) van soorten met een korte, brede en diepe snavel (positieve kant). PC3 kan daarmee worden geïnterpreteerd als een snavelvorm-gradiënt, variërend van lang/slank (geschikt voor sondage in zachtere sedimenten) naar kort/diep (geschikt voor krachtig openen of kraken van schelpen).

Ecologische interpretatie

De PCA-ruimte laat zien dat morfologische kenmerken sterk samenhangen met functionele rollen in het 'foerageerlandschap'. Grote soorten met lange snavels bevinden zich aan één uiterste van de PC1-PC2-ruimte en zijn doorgaans gespecialiseerd in het zoeken van prooien in dieper water of grover sediment, terwijl kleine soorten met korte snavels en compacte vleugels meer gebonden zijn aan oppervlakkig foerageren in het hogere litoraal. Deze patronen weerspiegelen bekende ecologische scheidingen tussen kustvogelsoorten en vormen een kwantitatieve basis om te onderzoeken hoe verschillende groepen gebruikmaken van de herstelde en gesuppleerde delen van de Roggenplaat.

B7.3.2. Ecologische niche van kustvogels

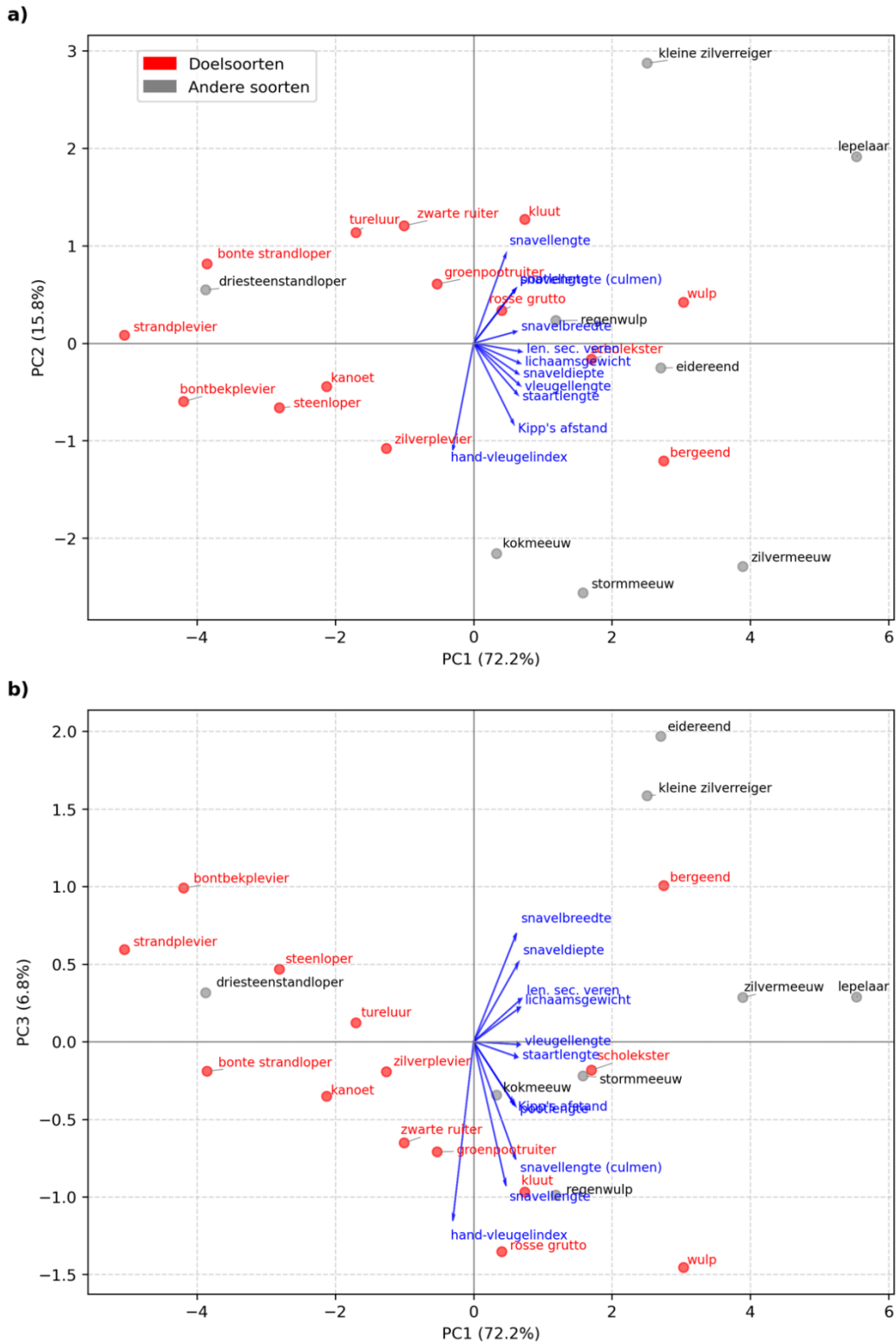
De principale-componentenanalyse (PCA) van de ecologische-nichekenmerken (Figuur B7-2) laat zien dat de eerste drie componenten samen ruim 83 % van de totale variatie in de dataset verklaren. Dit betekent dat deze drie hoofdasdimensies bijna alle relevante patronen in de ecologische differentiatie tussen de kustvogelsoorten samenvatten. Met andere woorden: met slechts drie componenten kunnen we een groot deel van de functionele verschillen in foerageergedrag en habitatgebruik beschrijven.

PC1 verklaart 47 % van de totale variatie en wordt voornamelijk bepaald door de verhouding tussen epibenthisch en endobenthisch foerageren. Soorten die hun prooi vooral op of boven het sedimentoppervlak zoeken (hoog aandeel epifauna in het dieet) scoren hoog op deze as, terwijl soorten die in het sediment naar bodemdieren graven (hoog aandeel endofauna) juist lage waarden hebben. Deze eerste component weerspiegelt daarmee een functionele gradiënt van sedimentdoorwoelende tot oppervlakkige foerageerders. Soorten met hoge PC1-scores hebben overwegend een mobiele, visueel georiënteerde foerageerstrategie, terwijl soorten met lage PC1-scores juist tactiel foerageren in zachtere bodems.

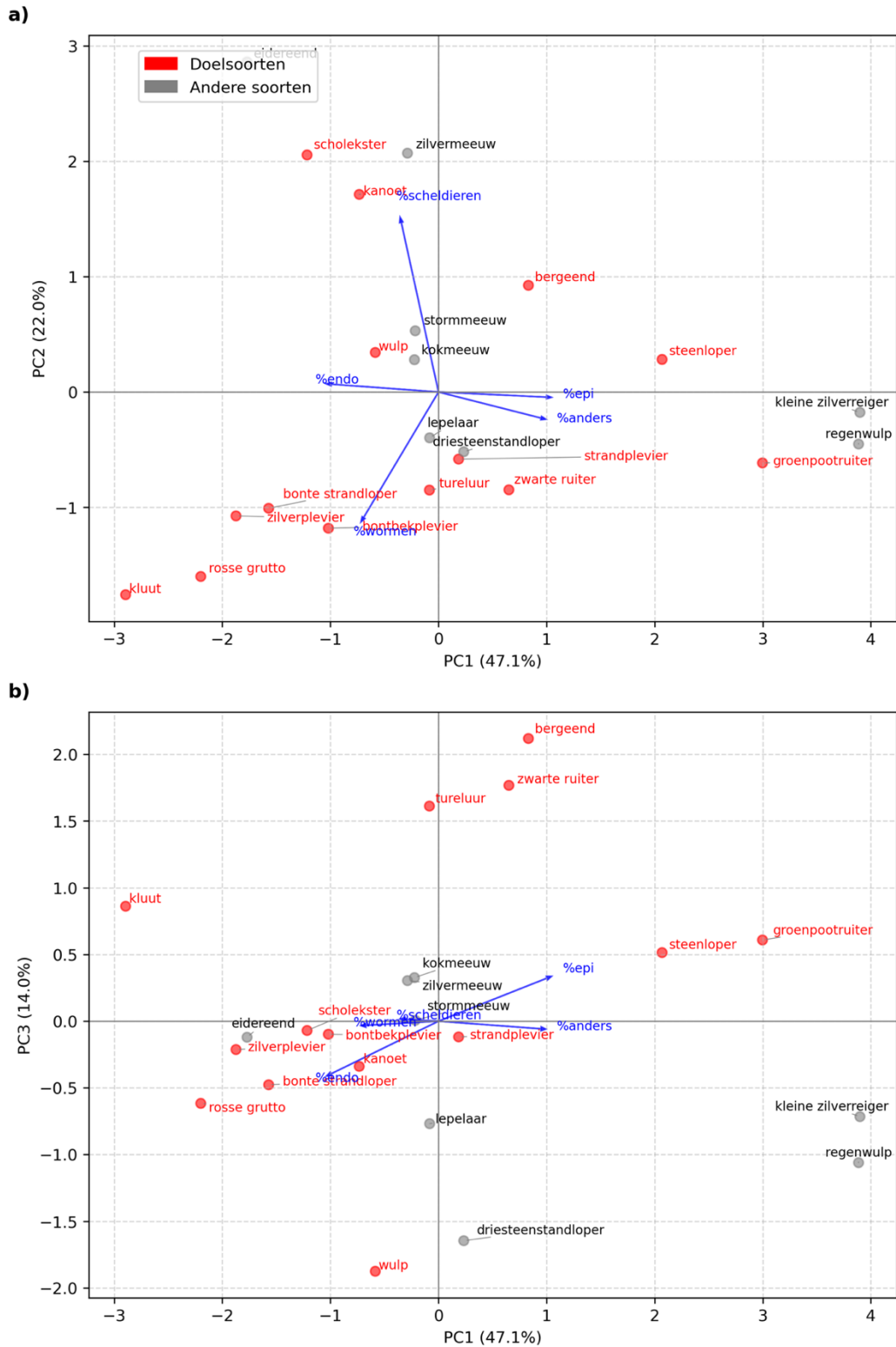
PC2 verklaart 22 % van de variatie en onderscheidt soorten op basis van hun voedseltype. Soorten met een groot aandeel schelpdieren in het dieet dragen sterk positief bij aan deze as, terwijl soorten die voornamelijk wormen eten juist negatieve waarden vertonen. Deze component kan worden geïnterpreteerd als een voedselgradiënt van schelpdier-eters op hardere substraten (positief) naar wormeneters op zachtere, fijnere sedimenten (negatief).

PC3, die nog eens 14 % van de variatie verklaart, wordt grotendeels bepaald door de substraatvoorkeur (loading = 0,92). Deze component weerspiegelt daarmee vooral de fysieke leefomgeving waarin soorten foerageren — variërend van soorten die harde, stabiele bodems prefereren tot soorten die juist beter gedijen op zachte, dynamische platen. Daarnaast dragen enkele gedragskenmerken, zoals visueel foerageren en generalisme in voedselkeuze, in mindere mate bij aan deze as.

De combinatie van deze drie assen maakt het mogelijk om soorten te positioneren in een multidimensionale ecologische ruimte, waarin hun niche wordt bepaald door foerageerstrategie, voedseltype en substraatvoorkeur. Doelsoorten zoals de scholekster, bonte strandloper en wulp bezetten binnen deze ruimte karakteristieke posities die overeenkomen met hun bekende ecologische rol als respectievelijk eter van schelpdier-, worm- en kreeftachtigen. De spreiding tussen soorten laat zien dat er sprake is van duidelijke functionele differentiatie, maar ook van gedeelde niche-kenmerken die potentieel kunnen worden gebruikt om soorten te clusteren in functionele groepen.



Figuur B7-2. Biplot van de PCA op morfologische vogeleigenschappen van kustvogels die de Roggenplaat benutten. De figuur toont de spreiding van kustvogelsoorten op basis van hun morfologische kenmerken (zie Tabel B7-1). De eerste twee hoofdcomponenten verklaren samen 88 % van de totale variantie. Rode symbolen geven de doelsoorten weer. De pijlen tonen de richting en relatieve bijdrage van afzonderlijke morfologische variabelen aan de eerste twee assen. Soorten die dicht bij elkaar liggen, delen vergelijkbare lichaamskenmerken en vormen daarmee potentiële functionele clusters met overeenkomende foerageerstrategieën of habitatvoorkeuren.



Figuur B7-3. Biplot van de PCA op ecologische-nichekenmerken van kustvogels. De eerste twee componenten verklaren samen 69 % van de totale variatie. De assen representeren respectievelijk een gradiënt van endobenthische naar epibenthische foerageerders (PC1) en van wormeneters naar schelpdiereters (PC2). Rode symbolen geven de doelsoorten weer. Soorten die dicht bij elkaar liggen, delen vergelijkbare foerageerstrategieën en voedselvoorkeuren, en vormen daarmee potentiële functionele groepen binnen de foeragerende gemeenschap van de Roggenplaat.

B7.4 Discussie en synthese

De PCA-analyses van morfologische en ecologische kenmerken van de kustvogels op de Roggenplaat geven belangrijke inzichten in de functionele diversiteit en de factoren die het foerageergedrag sturen. De eerste component van de morfologische PCA (PC1) laat duidelijk zien dat lichaamsgrootte en lichaamsmassa een dominante rol spelen: grotere soorten hebben een hogere energiebehoefte en kunnen relatief sneller een prooiaanbod exploiteren, terwijl kleinere soorten meer tijd nodig hebben om hun voedselquota te verzamelen. Dit benadrukt het belang van een voldoende langdurige droogvalperiode op de Roggenplaat, zodat ook de kleine steltlopers effectief kunnen foerageren. De huidige doelindicator van 50–80 % droogvalduur is hiermee dan ook ecologisch onderbouwd en biedt de basis voor het behouden van een functioneel foerageergebied voor een brede groep soorten.

Tegelijkertijd tonen de analyses aan dat andere aspecten van de habitat minstens zo belangrijk zijn. De morfologische en ecologische PCA's laten zien dat zowel de toegankelijkheid van prooien in het sediment als de variatie in voedseltype en substraatstructuur van groot belang zijn. Endobenthische soorten hebben bijvoorbeeld zachte, penetrerende sedimenten nodig om wormen en bodemdieren te kunnen vinden, terwijl epibenthische, visueel foeragerende soorten juist gebaat zijn bij oppervlakken met voldoende openheid en diversiteit om schelpdieren, wieren en epibenthische schaaldieren op te merken en te grijpen. Deze inzichten onderstrepen dat een gestructureerde morfologische en ecologische diversiteit van de getijdenplaat cruciaal is voor het functioneren van de hele vogelgemeenschap.

De combinatie van morfologische en ecologische informatie biedt bovendien een sterke basis om in hoofdstuk 4 te komen tot een geïntegreerde synthese. Door de morfologische eigenschappen (bijvoorbeeld lichaamsgrootte en snavelengte) te koppelen aan ecologische niches (voedseltype, foerageerstrategie, substraatvoorkeur) kunnen we beter begrijpen welke soorten in welke delen van de Roggenplaat optimaal gebruik kunnen maken van de habitats die ontstaan door suppleties en natuurlijke dynamiek. Bovendien maakt deze functionele benadering het potentieel mogelijk om doelsoorten te zien als indicatoren voor bredere functionele groepen, zodat ook het gebruik van minder waargenomen of afwezige soorten kan worden afgeleid.

Kortom, de inzichten uit deze bijlage laten zien dat droogvalduur, sedimenteigenschappen en habitatdiversiteit samen de ecologische kwaliteit van de Roggenplaat bepalen. Deze kennis vormt de basis voor de interpretatie in hoofdstuk 4, waar de veranderingen in morfologie, sedimentdynamiek en vogelgebruik worden geïntegreerd om de effectiviteit van de suppleties voor het behoud en herstel van foerageerhabitat te evalueren.

Bijlage 8 Kennisdeling en outreach

De grootschalige monitoring op de Roggenplaat draagt substantieel bij aan de kennisbasis over de fysische en ecologische processen die intergetijdengebieden vormgeven, evenals de interacties tussen morfologie, ecologie en menselijke ingrepen. Het actief delen van deze kennis is essentieel voor het verbeteren van beheerstrategieën in vergelijkbare systemen binnen en buiten de Oosterschelde. Onderstaand volgt een chronologisch overzicht van de activiteiten rond kennisdeling en outreach binnen het project.

2022 – Presentaties en eerste resultaten uit het monitoringsprogramma

In 2022 zijn de eerste bevindingen van de monitoring gedeeld in diverse wetenschappelijke en sectorbijeenkomsten:

- ECSA-conference, San Sebastián (2022)
 - Lodewijk de Vet, Brenda Walles, Jebbe van der Werf, Tjeerd Bouma, Bram van Prooijen, Zheng Bing Wang, Eric van Zanten & Tom Ysebaert (2022), Intertidal flat nourishments to mitigate ecological consequences of human interventions, lessons for climate change adaptation, ECSA conference, Spain.
 - Susanne van Donk, Brenda Walles, Alicia Hamer, Jeroen Wijsman, Lodewijk de Vet, Tjeerd Bouma, Tom Ysebaert & Eric van Zanten (2022), Sediment nourishments to preserve foraging habitat for shorebirds in an erosive system, ECSA conference, Spain.
- Scheldesymposium
 - Tim Grandjean (2022) Het belang van korte termijn morfologische ontwikkelingen bij grootschalige interventies
- Voorlichtingsbijeenkomst mosselsector
 - Brenda Walles, Susanne van Donk, Vincent Escaravage (2022). Voorlopige resultaten monitoringsprogramma Roggenplaat suppletie
 - Jeroen Wijsman (2022) Monitoring Roggeplaat

2023 – Kenniscommunity en uitbreiding onderzoek

In 2023 is de Kenniscommunity Suppleren voor Natuur opgericht — een platform waarin de meeste projectpartners participeren en kennisdeling structureel wordt verankerd.

Wetenschappelijke bijdragen

- De Vet, P. L. M., van der Werf, J. J., van Prooijen, B. C., de Bakker, A. T. M., Walles, B., Bouma, T. J., Ysebaert, T., van Zanten, E., & Wang, Z. B. (2023). Sand nourishments to mitigate the eco-morphological losses caused by storm surge barriers. In *Coastal Sediments 2023*, New Orleans (pp. 2278-2285).
- Walles, B., van Donk, S., Escaravage, V., Ysebaert, T., de Vet, P.L.M., van der Werf, J.J., Aarts, F., Bouma, T.J., van Belzen, J., Buis, K. (2023). Preserving estuarine foraging habitats for shorebirds through sand nourishments, NCK Dagen 2023.
- Menzione, A., de Vet, P. L. M., Mancini, M., Van der Werf, J. J., Schrijvershof, R., & Prooijen, B. C. V. (2023). Modeling the morphological evolution of intertidal flats: learning from an intertidal flat nourishment. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2023, pp. EP23A-02)

2024 – Rapportages, nieuwsbericht en vervolgpresentaties

Openbare T3-rapportage (2024)

- Escaravage, V., van Donk, S., de Vet, L., Vermeer, N., de Bakker, A., van der Werf, J., & van Belzen, J. (2024). Roggenplaatsuppletie (Oosterschelde): morfologische en ecologische ontwikkelingen over de eerste drie jaren (2020T1-2021T2-2022T3) na aanleg (No. C006/24). Wageningen Marine Research.
<https://edepot.wur.nl/647835>

Het rapport is te vinden op het open Rijkswaterstaat Publicatie Platform:

<https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@270037/roggenplaat-suppletie-oosterschelde/>

Naar aanleiding hiervan verscheen op 4 april 2024 een nieuwsbericht bij Natuurmonumenten: "Kustvogels weten gesuppleerde delen Roggenplaat weer te vinden."

<https://www.natuurmonumenten.nl/natuurgebieden/zuidkust-van-schouwen/nieuws/kustvogels-weten-gesuppleerde-delen-roggenplaat-weer-te>

Wetenschappelijke bijdragen

- Vermeer, N.P., de Vet, P.L.M., De Bakker, A.T.M., Van der Werf, J.J., Escaravage, V., Van Donk, S., Van Belzen, J., Bouma, T.J., de Looff, H., Buis, K. (2024). The Roggenplaat intertidal flat nourishment: development of the sediment composition. NCK Dagen 2024.
- Geomorphology. Grandjean, T.J., van Belzen, J., van der Wal, D., de Vet, L., de Smit, J.C., Walles, B., Zhou, Z., van Dalen, J., Bouma, T.J. (2024) Evaluating the impact of intertidal sediment nourishment on daily bed level dynamics. [Manuscript in revisie voor publicatie in Geomorphology]

Interne rapportage

- Vincent Escaravage, (2024). Semi-kwantitatieve opname bodemdieren Roggenplaat 2017-2022; Resultaten en vergelijking met de kwantitatieve monitoring. Wageningen Marine Research rapport. C040/24. 30 blz.

2025 – Webinar, conferenties en nieuwe onderzoeksresultaten

Webinar

Op 28 januari 2025 vond een breed opgezette webinar plaats, georganiseerd door RWS, Provincie Zeeland, RVO en Natuurmonumenten, waarin de nieuwste resultaten van de Roggenplaatmonitoring zijn toegelicht.

Ingediende en geaccepteerde bijdragen voor 2025

- Jim van Belzen, Vincent Escaravage, Tim Grandjean, Jeroen van Dalen, Lodewijk de Vet, Brenda Walles & Tjeerd J. Bouma¹ (2025) Priming Nourishments with Local Sediment to Accelerate Recovery: A Large-Scale In Situ Experiment. NCK-dagen 2025
- Vermeer, N.P., de Vet, P.L.M., De Bakker, A.T.M., Van der Werf, J.J., Escaravage, V., Van Donk, S., Van Belzen, J., Grandjean, T., Walles, B., de Looff, H., Buis, K. (2025). The Roggenplaat intertidal flat nourishment: morphological evaluation after 5 years of monitoring. NCK-dagen 2025.
- Vermeer, N.P., de Vet, P.L.M., De Bakker, A.T.M., Van der Werf, J.J., Escaravage, V., Van Donk, S., Van Belzen, J., de Looff, H., Buis, K. (2025). Eastern Scheldt Nourishments. Presentation for North Sea Coastal Management Group (NSCMG).
- Jim van Belzen, Vincent Escaravage, Tim Grandjean, Jeroen van Dalen, Lodewijk de Vet, Brenda Walles & Tjeerd J. Bouma¹ (2025) Priming Nourishments with Local Sediment to Accelerate Recovery: A Large-Scale In Situ Experiment. ECSA, Antwerpen
- Susanne van Donk, Jim van Belzen, Vincent Escaravage, Nienke Vermeer, Lodewijk de Vet (2025) Sediment nourishments to preserve foraging habitat for shorebirds in an erosive system. ECSA, Antwerpen
- van Belzen, J., Escaravage, V. L., & van Donk, S. C. (2025). Roggenplaat: strijd tegen zandhonger voor het behoud van de natuur: Wageningen Marine Research Regiocentrum Yerseke. Visserijnieuws, 6-6.
<https://edepot.wur.nl/699024>

Geplande en lopende wetenschappelijke publicaties

Er zijn momenteel drie wetenschappelijke publicaties in voorbereiding, gericht op:

1. Morfologische ontwikkelingen van de gesuppleerde Roggenplaat over de eerste vijf jaar na aanleg.
2. Priming-experiment en benthosontwikkeling op de suppletie-elementen.
3. Integrale synthese van alle fysische, ecologische en beheerrelevante resultaten uit het volledige monitoringsprogramma op basis van perspectief vanuit vogels.

Deze publicaties zijn voorzien voor de komende periode en zullen bijdragen aan zowel de nationale kennisbasis als de internationale literatuur over natuurvriendelijk suppleren en intergetijdenherstel.

Wageningen Marine Research
T +31 (0)317 48 70 00
E marine-research@wur.nl
www.wur.nl/marine-research

Bezoekersadres:

- Ankerpark 27 1781 AG Den Helder
- Korringaweg 7, 4401 NT Yerseke
- Haringkade 1, 1976 CP IJmuiden



Wageningen Marine Research levert met kennis, onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek en advies een wezenlijke bijdrage aan een duurzamer, zorgvuldiger beheer, gebruik en bescherming van de natuurlijke rijkdommen in zee-, kust- en zoetwatergebieden.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
