



Effecten van de zandsuppletie in het Amelanders Zeegat op de bodemdieren-gemeenschappen 1 en 3 jaar na aanleg

Wageningen University &
Research rapport C088/22

Effecten van de zandsuppletie in het Amelanders Zeegat op de bodemdierengemeenschappen 1 en 3 jaar na aanleg



Vincent Escaravage

Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research
Yerseke, December 2022

Wageningen Marine Research rapport C088/22

© Wageningen Marine Research

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

KvK nr. 09098104,
WMR BTW nr. NL 8113.83.696.B16.
Code BIC/SWIFT address:
RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO
0373599285

Wageningen Marine Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor gevolgschade, 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.

Keywords: Waddensea, sand nourishment, Benthic communities, Spatial patterns,

Opdrachtgever:
Dr. C.A. Schipper
Rijkswaterstaat.

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/583169>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Inhoud

Samenvatting	6
1 Inleiding	8
2 Achtergrond en stand van kennis	10
2.1 Bodemdierengemeenschappen op T0	11
2.2 Bodemdierengemeenschappen op T1 vergeleken met T0	12
2.3 Bodemdierensoorten als indicatoren voor hun leefomgeving	13
2.4 Aandachtspunten voor de huidige studie	14
3 Materiaal en methoden	15
3.1 Selectie van de gegevens en analytisch aanpak	15
3.2 Statistische methodes	16
4 Bodemdierengemeenschappen in het Ameland Zeegat vóór de suppletie (T₀)	18
4.1 Ruimtelijke verdeling van de clusters op T0	18
4.2 Totale dichtheid, taxonomische samenstelling en diversiteit in de clusters op T0	19
4.3 Soortensamenstelling van de clusters op T0	20
5 Bodemdierengemeenschappen in het Ameland Zeegat ná de suppletie (T₁-T₂)	22
5.1 Ruimtelijke verdeling van de clusters op T1	22
5.2 Totale dichtheid, taxonomische samenstelling en diversiteit in de clusters op T1	23
5.3 Soortensamenstelling van de clusters op T1	24
5.4 Ruimtelijke verdeling van de clusters op T2	26
5.5 Totale dichtheid, taxonomische samenstelling en diversiteit in de clusters op T2	27
5.6 Soortensamenstelling van de clusters op T2	28
6 Ruimtelijke en temporele veranderingen in de bodemdier-gemeenschappen tussen T0-T1-T2	30
6.1 Geografische locatie van de clusters op T0, T1 en T2	30
6.2 Bodemdierengemeenschappen in de verschillende gebieden en veranderingen tussen T0 T1 en T2	31
6.2.1 Vlake van Ameland	31
6.2.2 Centraal Bornrif	32
6.2.3 Buitenrand delta	33
6.2.4 Borndiep	34
6.2.5 Westgat/Ebscharen/Akkepollegat	34
7 Relatie met abiotische factoren	36
7.1 Ruimtelijke verdeling van de clusters (T0+T1+T2)	36
7.2 Relatie tussen de clustering en omgevingsfactoren (T0+T1+T2)	37
7.2.1 Overzicht van de omgevingsfactoren gebruikt in de analyse	37
7.2.2 Statistische analyse	38
8 Veranderingen in de bodemdieren-gemeenschappen binnen de suppletiegebieden 1 en 3 jaar na de suppletie	40
8.1 Veranderingen in de abiotische omstandigheden	40
8.2 Veranderingen in dichtheid en diversiteit	41
8.3 Multivariate descriptoren	43

9	Discussie en conclusies	46
10	Kwaliteitsborging	49
	Literatuur	50
	Verantwoording	52
Bijlage 1	Soortenlijst met Latijnse en Nederlandse benamingen en foto	53
Bijlage 2	Soortenlijst met weergave van de codes gebruikt in de analyse	56
Bijlage 3	Selectie van de locaties voor het toetsen van het effect van de suppletie op de bodemdieren-gemeenschappen 1 (2019) en 3 (2021) jaar na het aanleg	57
Bijlage 4	Selectie van de soorten om mee te nemen in de analyse op basis van 'soorten_BD_Allyears_mached.xlsx' (Holzhauer, pers.comm)	59

Samenvatting

Om de veiligheid van de Nederlandse kust te garanderen is gekozen voor een suppletie strategie waarbij de basiskustlijn wordt gehandhaafd en het kustfundament te laten meestijgen met de zeespiegelstijging. Rijkswaterstaat heeft besloten om de kennis over de uitvoerbaarheid en de effectiviteit van een grootschalige suppletie op een buitendelta te vergroten. De buitendelta van het Amelanders Zeegat is daarbij gekozen als locatie voor een pilotsuppletie over de uitvoerbaarheid en de effectiviteit van een grootschalige suppletie op een buitendelta.

De pilotsuppletie, welke onder het onderzoeksprogramma Kustgenese 2.0 (KG 2.0) valt, werd uitgevoerd in de periode maart 2018 – maart 2019. Gedurende KG 2.0 vond er op 3 momenten in de tijd ecologische monitoring plaats, respectievelijk 2017 (T0), 2019 (T1) en 2021 (T2) van verschillende trofische niveaus: benthos, zandspiering, grote stern, zwarte zee-eend en zeehonden tijdens T0 en T1. Tijdens de T2 is alleen benthos bemonsterd. Naast de ecologische monitoring zijn er tijdens de benthosbemonstering parallel sedimentmonsters genomen en geanalyseerd op korrelgrootte.

De huidige studie richt zich op de statistische analyse van de ecologische ontwikkeling tussen de uitgangssituatie T0 vóór de suppletie (2017) en de waarnemingen op T1 (2019) en T2 (2021). Ecologische analyses van de bodemdiergemeenschappen in de buitendelta van Ameland werden eerder uitgevoerd o.a. voor de T0 in Verduin & Lewis (2018) en Holzhauer et al. (2022) en voor de T0-T1 in Schellekens & Verduin (2020) en van Hal et al. (2021).

Bij de huidige verwerking van de T0-T1-T2 dataset is, ten gunste van de consistentie, rekening gehouden met de opgedane ervaring en gekozen benadering in die eerdere werken bij de beantwoording van onderstaande vragen:

- a) Welke bodemdierengemeenschappen komen voor in de buitendelta van het Amelanders Zeegat op basis van de toegepaste bemonsteringsmethodiek (box corer) vóórdat de suppletie plaats vindt?
- b) Wat is de ruimtelijke en temporele variatie in de bodemdierengemeenschappen?
- c) Wat zijn de effecten van de zandsuppleties op de bodemdierengemeenschappen na 1 en 3 jaar (T=1, T=2) op basis van de analyse en resultaten van de data uit de box-corer?
- d) Wat is de relatie tussen het voorkomen van de verschillende bodemdierengemeenschappen op en rondom de suppletielocaties en de abiotische factoren (sedimentsamenstelling en hydrodynamica).

Op basis van de huidige analyses zijn de volgende antwoorden geformuleerd:

Zoals ook beschreven in Holzhauer et al. (2022) toont de ruimtelijke verdeling van de bodemdierengemeenschappen in de buitendelta van Ameland een sterke relatie met de geomorfologische structuren en de daarmee gepaard gaande gradiënten in hydrodynamische omstandigheden. De bodemdierengemeenschappen in de buitendelta van Ameland zijn over het algemeen typisch voor gebieden die blootgesteld zijn sterke hydrodynamische regime, golven op ondiepe gebieden en getijstroomingen in de geulen. Alleen aan de buitenrand van het gebied bevinden zich bodemdierengemeenschappen die beter gedijen in wat rustigere omstandigheden.

Omvangrijke veranderingen in de bodemdierengemeenschappen waargenomen tussen 2017 en 2019 zijn gevolgd in 2021 door een partieel herstel van de, in 2017, aanwezige ruimtelijke structuren. Deze waarnemingen wijzen op de sterke jaarlijkse veranderingen van de bodemdieren-gemeenschappen die plaats kunnen vinden in de buitendelta van Ameland.

De aanleg van de suppletie toont een sterk effect op de totale dichtheid en soortensamenstelling binnen de suppletie op T1 (2019) gevolgd door een toename tot 'referentieniveaus' op T2 (2021). De snelheid waarmee dit herstel plaats vindt in het suppletie gebied wijst op het opportunisme van soorten in gebieden die van natuur blootgesteld zijn aan sterke fysieke verstoringen.

De beschikbare abiotische factoren gebruikt in de multivariate analyse (diepte, korrelgrootte, stroom- en orbitaalsnelheid) verklaren 22% van de variantie in de bodemdiersamenstelling en -dichtheid. De soortensamenstelling toont een eenduidige relatie met de omgevingsfactoren en bevestigt de rol ervan in de ruimtelijke indeling van de bodemdierengemeenschappen tussen de geomorfologische eenheden in de buitendelta.

1 Inleiding

In het kader van het programma Kustlijnzorg is er door de Nederlandse overheid voor gekozen om de basiskustlijn te handhaven en het kustfundament te laten meestijgen met de zeespiegelstijging door middel van zandsuppleties (Mulder, 2000).

Daarbij moet ook rekening moeten worden gehouden met de gestelde doelen ten aanzien van natuurbehoud en -ontwikkeling van de Nederlandse kust.

Aanvullend op het programma Kustlijnzorg is het programma Kustgenese 2.0 (KG 2.0) opgezet (RWS, 2020). In het kader van het dit programma worden ter optimalisatie verschillende opties voor het suppleren (hoeveelheid en locatie) onderzocht. Een van de doelen van Kustgenese 2.0 is om te onderzoeken of de buitendelta van Ameland een geschikte locatie is voor het aanleg van een suppletie en of dit een gunstige uitwerking kan hebben op de kustveiligheid. Er is daarvoor besloten om een pilotsuppletie uit te voeren om de kennis over de uitvoerbaarheid en de effectiviteit van een grootschalige suppletie op een buitendelta te vergroten.

Door de ondertussen goed gedocumenteerde gevoeligheid van bodemdieren op geomorfologische en hydrodynamische veranderingen (de Jong et al., 2015; Degraer et al., 2003; van Hoey et al., 2004) van der Wal et al., 2017; Ysebaert and Herman, 2002), kunnen deze organismen gebruikt worden als indicatoren voor veranderingen in hun omgeving als gevolg van natuurlijke processen dan wel menselijke activiteiten. Als bovendien rekening gehouden met het belang van bodemdieren in het ecosysteem als bijvoorbeeld 'ecosystem-engineer' en/of voedsel voor hogere trofische niveaus kan de monitoring van de bodemdieren informeren over de draagkracht van het systeem en het effect van natuurlijke processen dan wel menselijke activiteiten erop.

De pilotsuppletie geprogrammeerd in het kader van het onderzoeks-programma Kustgenese 2.0 werd uitgevoerd met het suppleren van 5.45 miljoen m³ zand in het zeegat tussen Ameland en Terschelling tussen maart 2018 en maart 2019 (Elias et al., 2020). Gedurende KG 2.0 vond er op 3 momenten in de tijd ecologische monitoring plaats, respectievelijk 2017 (T0), 2019 (T1) en 2021 (T2), van verschillende trofische niveaus. Op T0 en T1 zijn bemonstering uitgevoerd gericht op benthos, zandspiering, en zender-data van zeehonden ingewonnen. Tijdens de T2 is alleen benthos bemonsterd. Naast de ecologische monitoring zijn er tijdens de benthosbemonstering parallel sedimentmonsters genomen en geanalyseerd op korrelgrootte.

De huidige studie richt zich op de statistische analyse van de ecologische ontwikkeling van de bodemdiergemeenschappen tussen de uitgangssituatie T0 vóór de suppletie (2017) en de waarnemingen op T1 (2019) en T2 (2021).

Ecologische analyses van de bodemdiergemeenschappen in de buitendelta van Ameland werden eerder uitgevoerd voor de T0 in Verduin & Lewis (2018) en Holzhauer et al. (2022) en voor de T0-T1 in Schellekens & Verduin (2020) en van Hal et al. (2021).

Bij de huidige verwerking van de T0-T1-T2 dataset is, ten gunste van de consistentie, rekening gehouden met de opgedane ervaring en gekozen benadering in die eerdere werken ter beantwoording van onderstaande vragen:

- a) Welke bodemdierengemeenschappen kwamen voor in de buitendelta van het Amelandse Zeegat op basis van de toegepaste bemonsteringsmethodiek (box corer) vóórdat de suppletie plaats vindt (T=0)?
- b) Wat is de ruimtelijke en temporele variatie in de bodemdierengemeenschappen?
- c) Wat zijn de effecten van de zandsuppleties op de bodemdierengemeenschappen na 1 en 3 jaar (T=1, T=2) op basis van de analyse en resultaten van de data uit de box-corer?
- d) Wat is de relatie tussen het voorkomen van de verschillende bodemdierengemeenschappen op en rondom de suppletielocaties en de abiotische factoren (sedimentsamenstelling en morfologische en hydrodynamische aspecten).

Leeswijzer

De soortennamen zijn weergegeven in de wetenschappelijke notatie volgens de taxonomie aanbevolen in de World Register of Marine Species (<http://www.marinespecies.org/>). Voor de statistische analyse en sommige grafische weergaven is er wel gebruik gemaakt van een 8-lettercode. De meeste soorten genoemd in deze rapportage zijn opgenomen in Bijlage 1, samen met de Nederlandse naam en een foto.

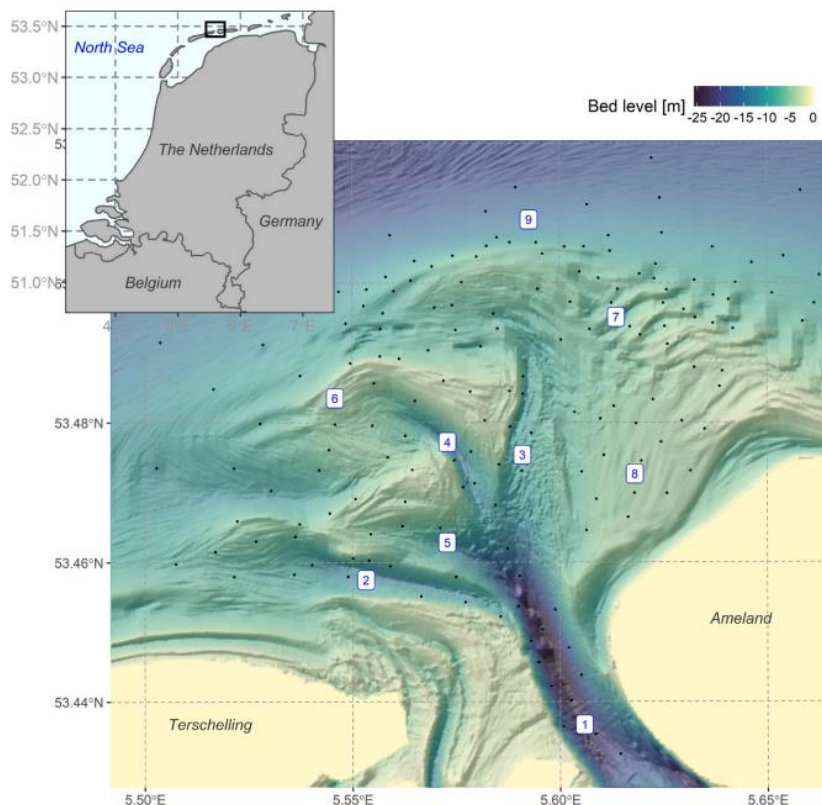
Dankwoord

Johan Craeymeersch (WUR) was de projectleider voor WUR-Wageningen Marine Research en Cor Schipper (RWS Z&D) projectleider voor Rijkswaterstaat.

Met dank aan Cor Schipper (RWS Z&D), Harriëtte Holzhauer (RWS Z&D) en Jeroen Wijsman (WUR) voor het kritisch nalezen en substantieel verbeteren van het huidige rapport.

2 Achtergrond en stand van kennis

De huidige studie maakt onderdeel van een corpus van talrijke studies uitgevoerd sinds 2017 in het kader van het Kustgenese2.0 met betrekking tot de Amelandse zeegat suppletie. De ervaring opgedaan tijdens deze studies is van zulke omvang dat het zinvol is om die vooraf door te nemen om een duidelijk beeld te krijgen van de stand van kennis bij het schrijven van deze rapportage. Eerder verschenen rapportages leveren uitvoerige beschrijvingen van het meetplan (Holzhauer, 2017, 2019; van Dalfsen, 2020; van Hal et al., 2018), de uitvoering van de monstercampagnes (Verduin & Olie, 2019) en de bodemdierenanalyses (Schellekens & Verduin, 2020) waardoor hier niet verder op ingegaan wordt.



Figuur 1.- Ligging van de hoofdgeulen en -platen in de buitendelta van het Zeegat van Ameland (onderliggende bodem is gebaseerd op de 2017 RWS Vaklodingen). [1] Borndiep, [2] Westgat, [3] Akkepollegat, [4] Ebschaar-2, [5] Ebschaar-1, [6] Kofmansplaat, [7] Bornrif rand, [8] Centraal Bornrif, [9] Vlake van Ameland zeewaarts van de buitenrand. De zwarte punten staan voor de monsterlocaties van de To. (uit Holzhauer et al., 2022).

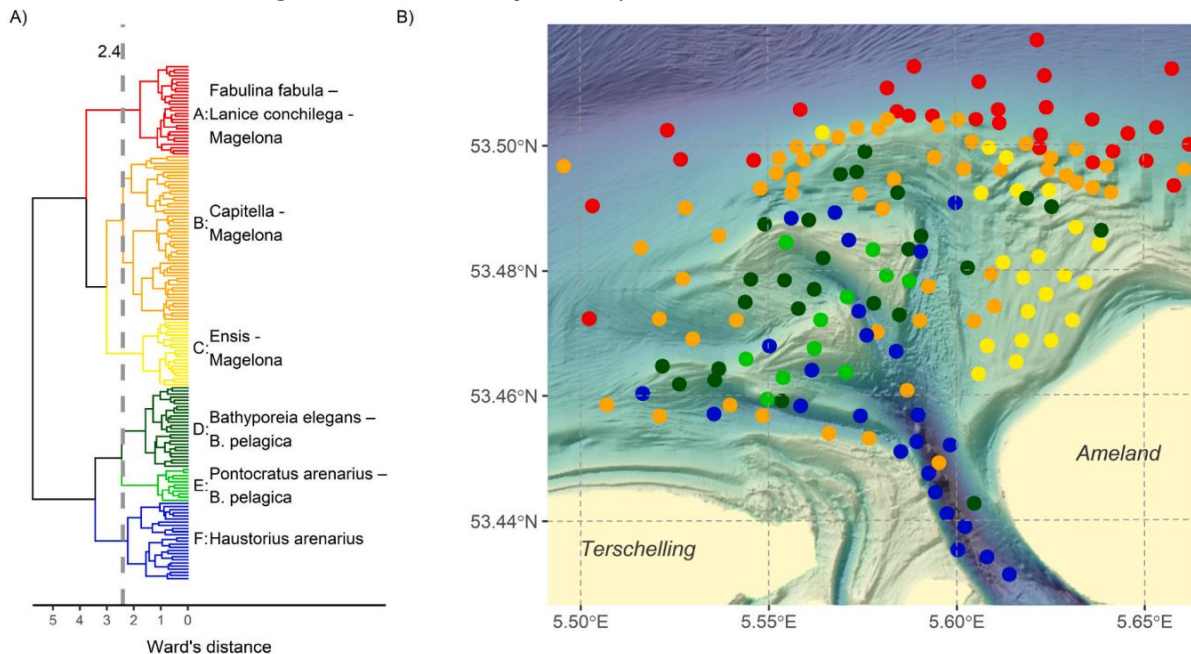
Om de beschrijving van de verspreiding van de bodemdieren over het studiegebied eenduidig te krijgen voor de huidige rapportage, zijn een aantal geomorfologische deelgebieden in de buitendelta genoemd volgens de benaming in Figuur 1 uit Holzhauer et al. (2022) en beschrijving hieronder (Elias et al., 2020):

1. **Borndiep**: hoofdgeul aan de oostzijde van het zeegat, langs de westkust van Ameland.
2. **Westgat**: vloed-gedomineerde geul aan de zeewaartse zijde van Terschelling
3. **Akkepollegat**: geul in de Noordwaarts verlenging van het Borndiep.
4. **Ebschaar 2**: getijgeul aan de Oostelijke kant van het Akkepollegat
5. **Ebschaar 1**: getijgeul tussen ebschaar 2 en het Westgat.
6. **Kofmansplaat**: ebschild van ebschaar 2 (waar de suppletie aangelegd werd)
7. **Bornrif rand**: Zeewaartse kant van Centraal Bornrif, zandgolven in landwaartse beweging .
8. **Centraal Bornrif**: Ondiepe en relatief vlak gebied voor de kust van Ameland
9. **Vlake van Ameland** : Aflopende zeebodem aan de zeewaartse kant van de buitenrand van de delta.

2.1 Bodemdierengemeenschappen op T0

De bodemdiergemeenschap in de buitendelta van Ameland tijdens de T0-fase is uitvoerig geanalyseerd in Holzhauer et al. (2022). De resultaten uit die studie zijn weergegeven hieronder. Een hiërarchische clusteranalyse van de bodemdiergegevens van de T₀-monitoring heeft geresulteerd in een onderscheid van zes bodemdiergemeenschappen (Holzhauer et al. 2022). Deze gemeenschappen onderscheiden zich door hun geografische locatie (zie gebiedsnamen in Figuur 1) en de daarbij behorende hydrodynamische condities en sedimentsamenstelling (Figuur 2):

- Cluster A op de Vlake van Ameland (zeewaarts van de buitenrand van de delta)
- Cluster B vooral op de buitenrand van de delta
- Cluster C in Centraal Bornrif
- Clusters D en E op de geulenranden bij Westgat, Ebscharen 1 en 2 en bij Akkepollegat
- Cluster F in de geullocaties vooral bij Borndiep.



Figuur 2.-A.-Weergave van de hiërarchische clusteranalyse tussen de monsterlocaties op basis van soorten dichtheden (dominante soorten zijn genoemd) B) Ruimtelijke verdeling van de clusters over het studie gebied. (Holzhauer et al., 2022).

De ruimtelijke verdeling van de zes bodemdierengemeenschappen onderscheiden in Holzhauer et al (2022) blijkt sterk aangestuurd te zijn door een gradiënt in sedimentkarakteristieken met een successie van gemeenschappen A naar (B/C) naar (D/F) en E langs een gradiënt van fijn slibrijk (met een hoog organisch-stofgehalte naar grof sediment.

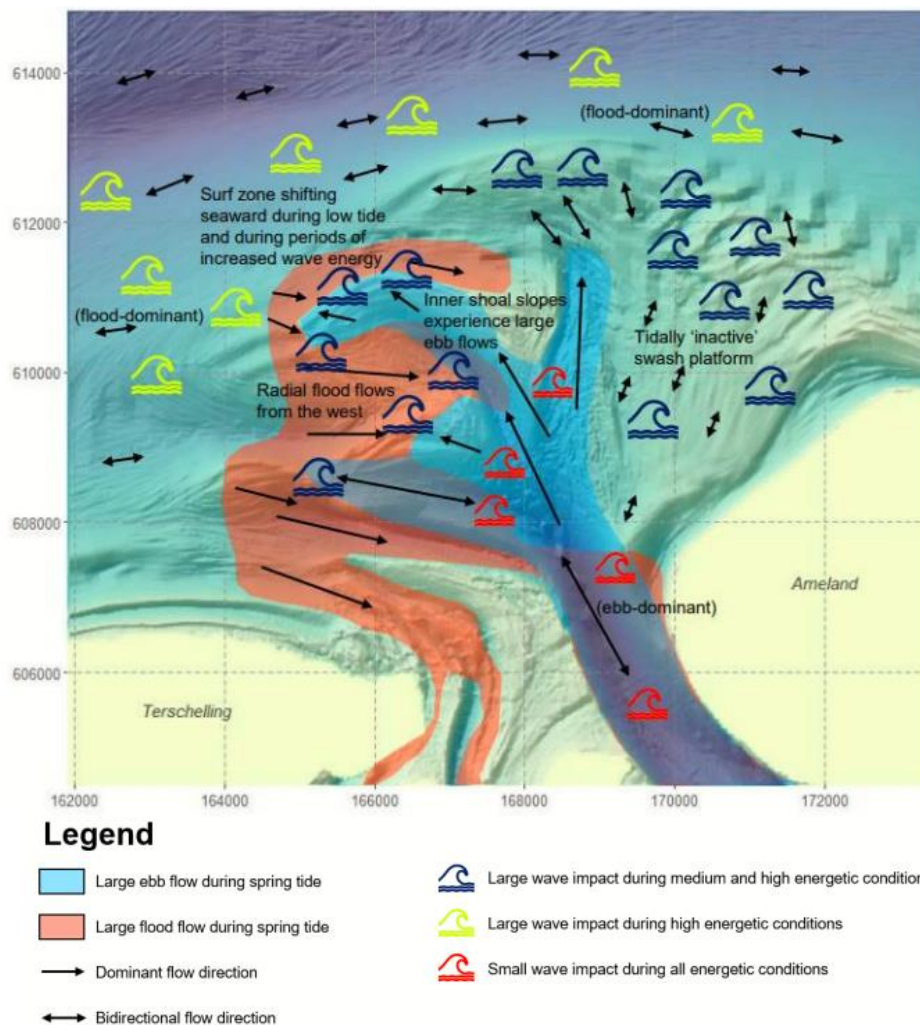
Deze gradiënt van fijn naar grof sediment houdt een sterk verband met de toename in de intensiteit van hydrodynamische verstoring van de bodem tussen de beschutte gebieden aan de buitenrand van de delta en de aan golven én getijstroken blootgestelde banken en geulen.

Een tweede gradiënt tussen goed gesorteerd sediment in ondiepe gebieden onder invloed van golven en slecht gesorteerd sediment in de geulen onder invloed van getijstroken resulteert in het onderscheid tussen gemeenschappen D en F.

De differentiële invloed van golven en getijstroken voor de bodemleven kan verder geïllustreerd worden door de grote mate van overeenkomst tussen de hydrodynamische typologie van het gebied zoals weergegeven in Figuur 3 (Röell;2021) en de ruimtelijke verdeling van de bodemdiergemeenschappen in Figuur 2 (Holzhauer et al., 2022).

Clusters A, B, C en F bevinden zich in gebieden met een homogeen hydrodynamisch regime, respectievelijk op de vlakte van Ameland (slechts verstoord bij stormen), op de buitenrand van de delta (sterke invloed door golven), in centraal Bornrif (sterke invloed door golven, weinig getij-involed) en in het Borndiep (eb gedomineerd en sterke invloed van golven).

De overige drie clusters D en E en F bevinden zich aan de oostkant (Westgat, Ebscharen 1 en 2 en Akkepollegat) waar meer facies naast elkaar komen (vloed-, eb-, golven-geedomineerd).



Figuur 3.-Overzicht van de relatieve dominantie van golven en getijstroom op de zeebodem in de buitendelta van Ameland (Röell, 2021).

2.2 Bodemdierengemeenschappen op T1 vergeleken met T0

De analyse van de T1-bemonstering (2019) in Schellekens & Verduin (2020) was vooral bedoeld om de veranderingen voor en na het aanleg op de suppletie locatie in kaart te brengen. De T0-bemonstering kon echter (op twee locaties na) niet plaatsvinden op de beoogde locatie voor de suppletie in 2017 door de aanwezigheid van meetframes. Daarom zijn er in maart 2018, voorafgaand aan de suppletie, twintig monsters genomen op de suppletie locatie (en ook 23 verspreid over het Amelanders zeegat) om gebruik te worden als T0-gegevens in de vergelijking met T1. Uit de analyse van Schellekens & Verduin (2020) bleken echter grote verschillen te zijn in de voorjaarsmonsters van 2018 vergeleken met de najaar-monsters van 2017 en 2019 (ook buiten het suppletiegebied) omdat sommige soorten een goede broedval hebben in of het voor- of het najaar, en daardoor in het voor- of najaar in grote aantallen voorkomen en andere soorten juist afwezig of niet meetbaar zijn in een van beide seizoenen.

Dit was de reden voor Schellekens & Verduin (2020) om de monstercampagne van 2018 verder buiten beschouwing te houden waardoor geen (T1/T0) effectmeting van de suppletie op de bodemdierengemeenschap plaats kon vinden.

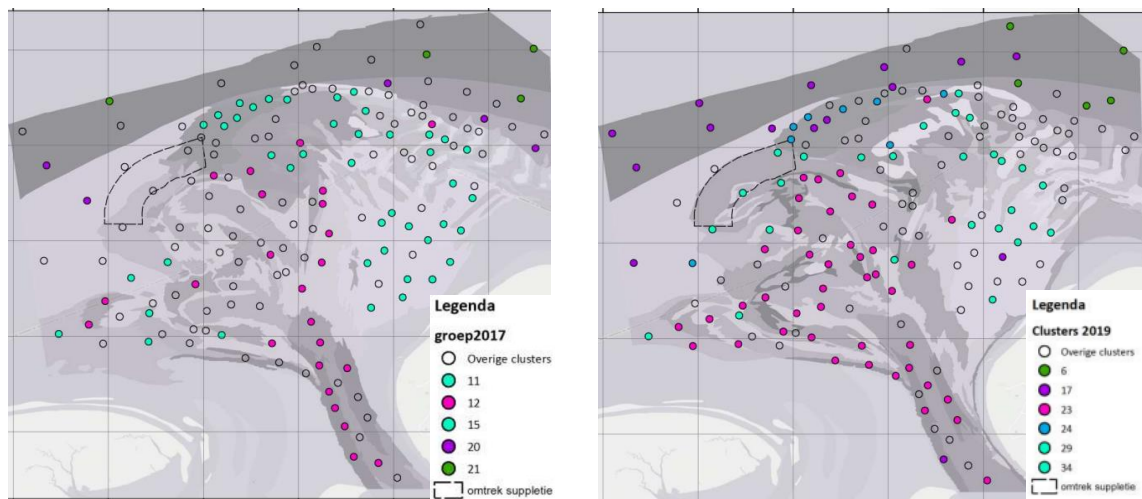
In de vergelijking tussen 2017 (vóór aanleg suppletie) en 2019 (ná aanleg suppletie) over de rest van de buitendelta onderzochten Schellekens & Verduin (2020) de relatie tussen clusters gevormd met behulp van de SIMPROF¹ routine en de habitattypologie zoals bepaald in Holzhauer (2017). Deze

¹ SIMPROF: statistische toets waarbij getest wordt in hoeverre monsters van elkaar verschillen qua soortensamenstelling zonder vooraf bepaalde (habitat)indeling van de monsters te veronderstellen (Clarke et al., 2008). Hierbij wordt getest welke clusters uit de clusteranalyse verschillen van het gemiddelde similariteitsprofiel. Daar waar de clusters significant verschillen met het gemiddelde profiel, is er sprake van een groep.

benadering resulteerde volgens Schellekens & Verduin (2020) in onstabiele uitkomsten over de indeling van monsterlocaties tussen de ca 30 clusters verkregen voor verschillende runs van de SIMPROF-routine.

Schellekens & Verduin (2020) maakten vervolgens een selectie van de monsterlocaties met een constante clusterindeling. Dit leverde 4 à 5 relatief stabiele clusters op basis van de gegevens uit 2017 en 2019 (Figuur 4) (zie Figuur 1 voor gebiedsnamen):

- 1.-Borndiep, Westgat, Ebscharen 1 en 2, Akkepollegat (Clusters 12 in 2017 en 23 in 2019).
- 2.-Vlakte van Ameland (Clusters 20 in 2017 en 17 in 2019)
- 3.-Centraal Bornrif, Bornrif rand en buitenrand (Clusters 11+15 in 2017 en 29+34 in 2019).
- 4.-Oostelijke kant van de vlakte van Ameland (Clusters 21 in 2017 en 6 in 2019)
- 5.-Buitenrand ten westen van de suppletie in 2019 door het uitspoelen van de het suppletie materiaal (Cluster 24).



Figuur 4.- Selectie van SIMPROF clusters op basis van de bodemdieren soortendichtheden op locaties bemonsterd in 2017 en 2019. Kleuren corresponderen met overeenkomstige soortensamenstelling tussen de clusters in beide jaren (Schellekens & Verduin, 2020).

Naast deze terugkeer van een paar vaste clusters tussen 2017 en 2019 concluderen Schellekens & Verduin (2020) dat er sprake is van een heel andere toestand van de benthische gemeenschappen tussen die jaren. Deze veranderingen werden door de auteurs toegeschreven aan soorten die aangepast zijn aan de dynamische omstandigheden in een, van nature, zeer dynamisch gebied.

Met betrekking tot de statistische methode gebruikt bij de analyse van de bodemdieren zetten van Hal et al. (2021) kanttekeningen bij de automatische selectie van het aantal clusters op basis van statistische toetsen *“waarbij het de vraag is of deze allemaal een ecologische onderbouwing hebben of veroorzaakt zijn door de bemonsteringsmethode of kans dat een enkele soort is aangetroffen.”* Uiteindelijk kwamen de auteurs tot de conclusie dat de keuze voor het aantal te onderscheiden clusters ondergeschikt moest blijven aan de ecologische waarde van de gekozen indeling en de beslissing werd vervolgens genomen op basis van ‘expert judgement’ om het aantal clusters tot vijf te beperken.

2.3 Bodemdierensoorten als indicatoren voor hun leefomgeving

Informatie uit de literatuur over de ecologie van de bodemdierensoorten die geassocieerd zijn met de clusters kan gebruikt worden om de ecologische betekenis van de gevormde clusters te doorgronden. Ook de verschuiving tussen bepaalde soorten kan gebruikt worden om de invloed van abiotische gradiënten op het bodemleven te documenteren.

Volgens de EUNIS- classificatie (<https://eunis.eea.europa.eu/species.jsp>) is de aanwezigheid van het nonnetje *Limecola balthica* samen met de zandzager *Nephtys hombergii* typerend voor relatief ondiepe en slibrijke bodems.

Binnen het genus *Nephtys* beschrijft de EUNIS-classificatie een transitie tussen de zandzagers *N. hombergii* en *N. cirrosa* met het grover en zandiger worden van het sediment. Verder wordt de aanwezigheid van soorten zoals *Bathyporeia sp.* en *Nephtys cirrosa* beschouwd als typisch voor zandige, hoogdynamische bodems.

In Craeymeersch et al. (1990) wordt (over de hele Voordelta) een verschuiving in dominantie van soorten beschreven langs een gradiënt in de hoogteligging met i.-*Bathyporeia sp.* op de platen, ii.-*Nephtys cirrosa* samen met *Spisula subtruncata* in de overgangszone van plaat naar geul en iii.-*Nephtys hombergii* ook samen met *Spiophanes bombyx* in diepere gebieden.

Een gemeenschapsanalyse (Escaravage & van der Heijden, 2021) van de WOT-dataset (2011-2019) wijst ook de rechtsgestreepte platschelp *Fabulina fabula* en de breedpootkrab *Portumnus latipes* aan als kensoorten voor respectievelijk de geul-plaat-transitiegebieden en ondiepe platen. Volgens de EUNIS classificatie is de transitie tussen die soorten kenmerkend voor een toenemende invloed van golven op de hydrodynamica.

In de laatste publicatie over het Belgische monitoringprogramma voor de bodemdieren (1994-2012) benadrukken Breine et al. (2018) dat, waar het optimum van *Ensis* in relatief diepe en 'rustige' locaties in het slibrijke zand ligt, de numerieke dominantie van *Ensis* in de meest ondiepe en hoog hydrodynamische gebieden voorkomt.

De aanwezigheid van de kurkentrekkerworm *Paraonis fulgens* die, als een kurkentrekker ingegraven in het sediment, sterke stromingen kan weerstaan (Rasmussen 1973) is een indicatie voor de intensiteit van de hydrodynamiek.

Vlokreeften *Bathyporeia pelagica*, *Bathyporeia elegans*, *Haustorius arenarius* en *Pontocrates arenarius* zijn beschreven in de EUNIS-classificatie als typische soorten voor mobiele sedimenten onder een hoge hydrodynamische intensiteit. Verder onderscheiden Holzhauer et al (2020), binnen de vlokreeften, de associaties *Haustorius arenarius* - *Bathyporeia pelagica* bij strandhellingen in schoon zand onder direct invloed van golven en de associatie *Pontocrates arenarius* - *Bathyporeia elegans* die iets dieper gevonden is bij een verlaagde verstoringsintensiteit door golven.

Degraer et al. (2006) beschrijven een successie van robuuste gemeenschappen die parallel loopt met een gradiënt in toenemende korrelgrootte van het sediment, samen met een toenemende afstand tot de kust: De "*Limecola balthica*" (nonnetje) gemeenschap aan de kust en verder van de kust met een afname van slib de "*Abra alba*" (dun witschaal) gemeenschap en de "*Nephtys cirrosa*" (zandzager) gemeenschap daartussen.

In Breine et al. (2018) werd de soortenarme gemeenschap "*Magelona-Ensis leei*" geïdentificeerd in zeer ondiepe gebieden langs de kust onder invloed van golven.

Degraer et al. (2006) benadrukken de geleidelijke transitie tussen de bodemdierengemeenschappen: "Naturally there are no clear boundaries between these communities; they gradually blend into each other. Such transitions are called transient associations."

2.4 Aandachtspunten voor de huidige studie

De informatie beschreven in dit hoofdstuk levert de volgende aandachtspunten voor de huidige studie:

- Een hiërarchische clusteranalyse van de T0-gegevens levert een onderscheid op tussen ruimtelijk gedifferentieerde bodemdierengemeenschappen in relatie tot sedimentsamenstelling en hydrodynamica (getijstromen en golven).
- Het dynamisch karakter van het gebied zorgt mogelijk voor grote jaar-tot-jaarveranderingen (zoals tussen T0 en T1) in de ruimtelijke verdeling van de bodemdierengemeenschappen over het studiegebied.
- Het aantal te onderscheiden clusters moet zo veel mogelijk beperkt worden ten gunst van de robuustheid van de resulterende indeling. Dit gebeurt door middel van 'expert judgement op basis' van de ruimtelijke verdeling van de bodemdierengemeenschappen en van de daarmee geassocieerde soorten.

Ten gunste van de interne consistentie binnen het Kustgenese2.0 onderzoeksprogramma wordt bij de huidige analyse rekening gehouden met deze punten.

3 Materiaal en methoden

3.1 Selectie van de gegevens en analytisch aanpak

Selectie van de benthosgegevens

Bij de analyse van de ruimtelijke verdeling van de bodemdierengemeenschappen op T₀ (§ 4) is gebruik gemaakt van alle gegevens verzameld in het najaar van 2017. De gegevens verzameld in het voorjaar van 2018 als aanvulling (binnen het suppletiegebied) op de T₀ van 2017 zijn niet meegenomen in de analyse volgens de aanbevelingen in Schellekens & Verduin (2020).

In het kader van de studie naar de ruimtelijke en temporele variatie in de bodemdieren-gemeenschappen tussen T₀-T₁-T₂ (§5) vindt de analyse afzonderlijk voor elk jaar plaats, zoals voor de T₀, op de gegevens verzameld in 2019 (T₁) en 2021 (T₂).

Bij de analyse naar de relatie tussen het voorkomen van bodemdierengemeenschappen en de abiotische factoren (diepte, sediment samenstelling en stroomsnelheden door golven en getij, §7) zijn alle monsters verzameld in 2017, 2019 en 2021 meegenomen.

Deze analyse maakt gebruik van een directe benadering waar de assen van de multivariate analyse op basis van de bodemdierensamenstelling berekend zijn als lineaire functies van de omgevingsvariabelen

Om het effect van de suppletie op de bodemdieren-gemeenschappen na 2 (2019) en 4 (2021) jaar te kunnen meten, ontbreken de nodige T₀-observaties op twee locaties na, verzameld binnen het suppletiegebied in 2017 (Schellekens & Verduin, 2020).

Als vervanging voor die ontbrekende gegevens is gepoogd om een reconstructie (T_{0R}, genoemd) te maken van de gemeenschappen aanwezig binnen het suppletiegebied in 2017 volgens de volgende procedure:

- Voor deze T_{0R}-reconstructie is gezocht naar locaties bemonsters in 2017 buiten het suppletiegebied met vergelijkbare waarden van omgevingsvariabelen (diepte, sediment samenstelling en stroomsnelheden door golven en getij) als die aanwezig binnen het suppletiegebied vóór het storten.
- De referentiewaarden van de omgevingsvariabelen te gebruiken voor deze selectie zijn benaderd met de waarden op de locaties verzameld binnen het suppletiegebied in 2018 samen met de twee suppletie-locaties die wel in 2017 bemonsterd waren.
- De selectie van de T_{0R}-locaties gebeurt vervolgens, voor waarden van omgevingsvariabelen, tussen de 5^{de} en de 95^{ste} percentielen van deze referentiewaarden. Voor de twee hydrodynamische variabelen is wel één overschrijding toegestaan (<5^{de} percentiel dan wel >95^{ste} percentiel) om voldoende locaties in de selectie te krijgen. Dit levert 22 T_{0R} locaties op.
- De effectmeting bestaat uiteindelijk in de vergelijking tussen de bodemdierengemeenschappen waargenomen in die T_{0R} locaties en in de suppletie-monsters verzameld op de suppletie in 2019-2021 ('Suplt_2019' en 'Suplt_2021').
- De controle-monsters bestaan uit 15 monsters verzameld in 2019 en 2021 op de locaties uit de T_{0R}-selectie met uitzondering van de 7 monsters binnen het invloedgebied (<1 km) van de aanleg ('Ctrl_2019', 'Ctrl_2021').

De huidige analyse is opgebouwd volgens een BACI-design (**B**efore en **A**fter waarnemingen in **C**ontrol en **I**mpact gebieden): waar de vergelijking tussen T_{0R}_2017 en de suppletie-monsters (Suplt_2019, Suplt_2021) informeert over de effecten (Before / After) van de suppletie, de vergelijking tussen T_{0R}_2017 en de controle-monsters (Ctrl_2019, Ctrl_2021) laat toe om, voor dezelfde periode (voor en na het aanleg), autonome ontwikkelingen waar te nemen.

De volledige procedure voor de selectie van de T_{0R} locaties met referentiewaarden en kaarten is weergegeven in Bijlage 3.

Standaardisering en verwerking van de bodemdierengegevens

Om rekening te houden met voortschrijdend wetenschappelijk inzicht m.b.t. de taxonomie en ten gunste van de interne consistentie tussen de jaren is de hele dataset bewerkt m.b.v. de "Taxon match" routine beschikbaar op de site van de World Register of Marine Species (<https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=match>).

Taxa die incidenteel voorkomen, zijn buiten beschouwing gehouden dan wel samengevoegd met andere organismen op basis van verwantschap op een hogere taxonomische niveau (genus of familie). Alleen taxa die in minimaal 2% van de monsters van elke campagne aanwezig zijn, zijn meegenomen in de analyse.

Voor de selectie en samenvoeging van de soorten die meegenomen zijn bij de analyse is gebruik gemaakt van dezelfde benadering als Holzhauer et al. (2022), ten behoeve van de consistentie binnen het project. De werkblad gebruikt bij die selectie is weergegeven in Bijlage 4.

Ook werd de behandeling van de juveniele stadia (slechts 2 à 3 % van het totale aantal individuen.) die wel onderscheiden zijn in de dataset van Eurofins samengevoegd met de volwassene stadia zoals in het werk van Holzhauer et al. (2022). Ook ten behoeve van de consistentie binnen het project is gebruik gemaakt van een R-code overhandigd door Harriëtte Holzhauer bij voorbereiding van de benthosgegevens voorafgaand aan de statistische analyse.

Bij de grafische weergave van sommige statistische analyse worden taxa namen gecodeerd m.b.v. lettercodes ($N_{\max}=8$), bijvoorbeeld: *Spisula solida* = SPISSOLI, *Spisula subtruncata* = SPISSUBT, *Abra* = ABRA. De lijst met soortennamen en bijbehorende codes is weergegeven in Bijlage 2.

Hydrodynamische variabelen

In aanvulling op de dieptebepaling op iedere monsterlocaties, gebaseerd op de jaarlijkse vaklodingen, en de sedimentsamenstelling bepaald op een deelmonster uit de box corer genomen voor de bemonstering van de bodemdieren, is er ook gebruik gemaakt van hydrodynamische gegevens ter beschrijving van de relatie tussen bodemdieren en abiotiek. Deze gegevens zijn afkomstig van de modelberekeningen die zijn uitgevoerd voor het opstellen van de ecotopenkaart voor de Waddenzee en bestaan uit een grid voor stroomsnelheid (SSp99ms, 99^{ste} percentiel van de stroomsnelheid in m/s) en een grid voor orbitaal stroomsnelheid (OrbiS_ms, gemiddelde snelheid in m/s) verkregen van Deltares (Roy van Weerdenburg, pers. comm. ²).

Numerieke voorbereiding van de gegevens. Vooraf aan de analyse is een vierdemachtswortel-transformatie van de dichtheden van de bodemdieren (N/m^2) gedaan om het effect van uitschieters op de analyse te dempen en de scheefheid in de verdeling (dominantie door lage waarden) te verminderen. De abiotische variabelen (diepte, sediment samenstelling en stroomsnelheden door golven en getij) zijn onderzocht op majeure uitschieters en scheefheid in de numerieke verdeling en werden ook onderworpen aan een vierdemachtswortel-transformatie .

3.2 Statistische methodes

Dissimilariteitsmatrix. Bij de berekening van de verschillen tussen de monsterlocaties is gebruik gemaakt van een matrix van dissimilariteiten tussen de monsterlocaties gebaseerd op de Chord coëfficiënt (R: *vegdist*, *vegan* package) zoals eerder gebruikt in Holzhauer et al. (2022). Hoge waarden van het coëfficiënt (afstanden) zijn berekend tussen monsterlocaties met grote verschillen in hun bodemdierensamenstelling.

Clustering. Een hiërarchische clusteranalyse is uitgevoerd op de dissimilariteitsmatrix door de monsters te groeperen op basis van de overeenkomsten in soortensamenstelling (lage waarden van de dissimilariteitscoëfficiënt). Deze groepering is uitgevoerd met behulp van de Ward-methode om de variatie binnen elke groep te minimaliseren (R: *hclust*, *ward.D2*, *stats* package).

Een statistisch optimaal aantal clusters is berekend door middel van de 'gap'-statistiek (Tibshirani (2001) in *fviz_nbclust*, *factoextra* R package) om een indicatie te krijgen over het aantal clusters dat statistisch significant zijn. De ga- statistiek vergelijkt de totale variatie binnen de clusters met een

² Stroomsnelheden zijn bepaald op basis van een modeluitvoer voor de twee spring-doodtij periodes in 2017 (vóór het aanleg) en de golfcondities zijn representatief voor maart 2020 en dus ná de aanleg (Kers et al, 2021). Het gebrek van overeenkomst tussen die referentie perioden en de jaren van bemonstering kan een effect hebben op de huidige resultaten

voorspelling verkregen uit 500 simulaties van clustering op basis van random verdelingen (nul model). Dit levert het aantal clusters waarvoor de som van de 500 verschillen tussen het model en de gegevens maximaal is.

Vervolgens kan het aantal clusters arbitraire verlaagd worden ten opzichte van dit aantal om ervoor te zorgen dat, ten behoeve van de robuustheid, voldoende locaties aanwezig zijn in elke cluster. De significantie van de verschillen tussen de clusters zijn getoetst m.b.v. een paarsgewijze permutatietest (*anosim*, vegan R package).

Het iteratieve proces van binaire scheidingen tussen groepen van monsterlocaties zorgt voor de hiërarchische structuur van de clustering weergegeven door middel van een dendrogram. De resulterende boomstructuur informeert over het niveau van overeenkomsten tussen de gevormde clusters.

Vervolgens zijn de associaties van soorten met de clusters berekend met behulp van 'Multi-level pattern analysis' (*multipatt*, indicpecies R-package) waarmee de associatie tussen verspreidingspatronen van soorten vergeleken wordt met combinaties tussen de clusters. De lijst van soorten aangewezen door de statistische toets zijn eventueel mogelijk aangevuld met niet geselecteerde soorten die wel waargenomen zijn in minimaal 25% van de monsters binnen een cluster.

RDA-analysis: In de Redundantieanalyse (RDA) zijn de dichtheden van soorten geprojecteerd in een multidimensionale ruimte waar de dimensies (assen) berekend zijn als lineaire functies van de omgevingsfactoren die meegenomen zijn in de analyse. Daarmee wordt de fractie van de variatie in de bodemdierengemeenschappen berekend die verklaard kan worden door de omgevingsfactoren. De RDA informeert ook over de relatie tussen de abiotische gradiënten en de trends in de bodemdierengemeenschappen.

nMDS: Bij de analyse van de verschillen tussen groepen van locaties T0_R_2017, Suplt_2019, Suplt_2021, Ctrl_2019 en Ctrl_2021 bij de analyse naar de effecten van de suppletie op de soortensamenstelling is gebruik gemaakt van Metric Multidimensional Scaling (nMDS). De dichtheden van alle soorten in de monsters zijn eerst met een vierdemachtswortel getransformeerd om de scheve verdeling van de gegevens te verminderen en vervolgens zijn de monsters met elkaar vergeleken door middel van een Bray-Curtis similariteitsindex. Deze index zegt iets over de overeenkomst van monsters m.b.t. de soortensamenstelling ten opzichte van elkaar. De resultaten van deze berekening zijn visueel gemaakt in non-Metric Multidimensional Scaling (nMDS) diagrammen, waarmee de data in een tweedimensionaal ordinatieplot zijn gezet. Dit type plot laat de similariteit of overeenkomst van monsters ten opzichte van elkaar zien. Op die manier kunnen verschillen tussen de groepen van locaties op gemeenschappelijke niveau aangetoond worden met de identificatie van de soorten die het meest bijdragen aan de waargenomen patronen.

Univariate analyse. De verschillende bodemdierengemeenschappen, zoals onderscheiden door middel van de clusteranalyse, zijn beschreven op basis van de volgende descriptoren:

- Totale dichtheid N/m²;
- Taxonomische samenstelling genomen op het niveau van de klassen;
- *Alpha-diversiteit* (aantal taxa per monster) en de *Pielou's evenness index* (maat van evenredigheid tussen de aantallen individuen per soorten), berekend als de ratio $J' = H'/H'_{max}$ (waarden tussen 0 en 1) met H' de waarde van de Shannon index en H'_{max} de maximale waarde voor H' , te weten de logaritme van het aantal soorten ($H'_{max} = \ln[S]$).

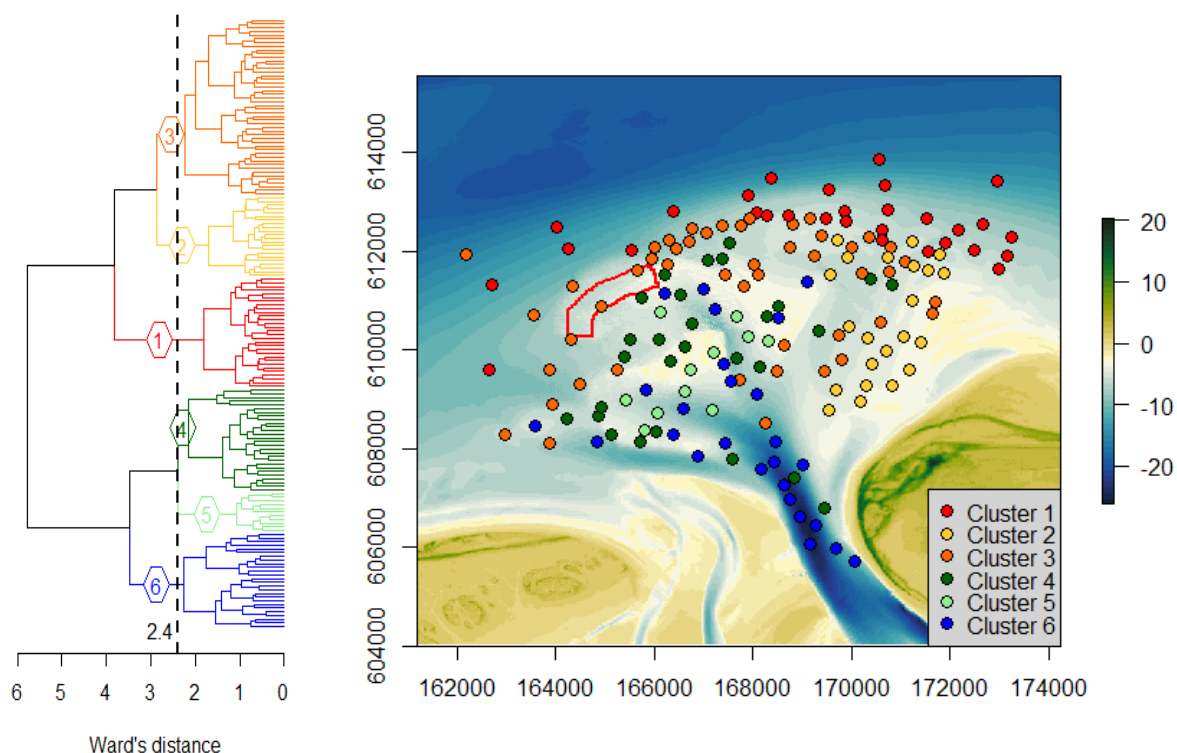
4 Bodemdierengemeenschappen in het Amelanders Zeegat vóór de suppletie (T₀)

4.1 Ruimtelijke verdeling van de clusters op T₀

De hiërarchische clustering (Ward's D2 clustering methode) toegepast op de dissimilariteitsmatrix (Chord afstand) tussen de 165 locaties op basis van de bodemdierensamenstelling (54 taxa) levert een structuur waar 6 clusters onderscheiden zijn door de gap-statistiek voor een Ward's afstand van 2.4. De ANOSIM-toets bevestigt de statistische significantie van de groepsindeling (ANOSIM statistic R: 0.75, $p < 0.001$).

De clusters genummerd van 1 tot 6 omvatten respectievelijk 30, 22, 48, 28, 11, en 26 locaties.

De huidige analyse zou een herhaling moeten zijn van de analyse in Holzhauer et al (2022), maar toch vallen een aantal verschillen op bij een vergelijking tussen de kaarten in Figuur 2 en Figuur 5. Dit zal zeer waarschijnlijk te maken hebben met afwijkingen bij de voorbereidingen van de benthosgegevens. Ondanks deze verschillen leveren beide analyses zeer vergelijkbare verdeling van de bodemdierengemeenschappen over het studiegebied.



Figuur 5.- Links: Dendrogram als weergave van de clustering (Ward's D2 methode) van de monsterlocaties op basis van de soorten dichtheden van de bodemdieren (T₀). De verticale stippellijn staat bij de Ward's distance (2.4) voor het onderscheiden van de clusters. Rechts: Ruimtelijke verdeling van de locaties clustering. De rode polygoon staat voor het suppletie gebied.

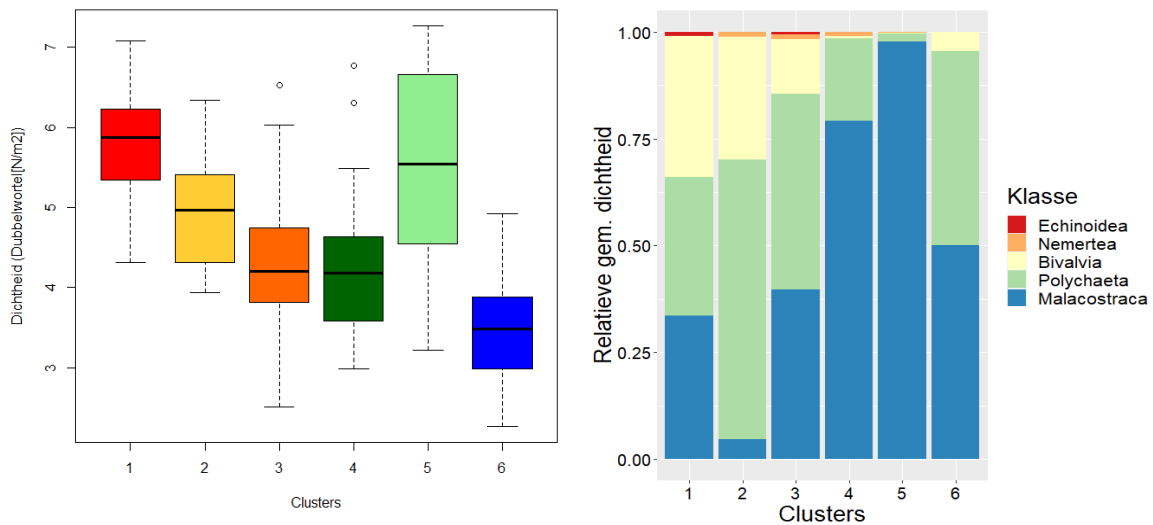
De clusteranalyse scheidt als eerste de monsterlocaties in twee groepen met clusters 1, 2 en 3 aan de ene kant en clusters 4, 5 en 6 aan de andere kant (zie dendrogram in Figuur 5). Vervolgens onderscheiden clusters 1 en 6 zich van de rest van de monsterlocaties. De laatste clusters die uit de analyse komen, zijn clusters 2 en 3 (verwanten van cluster 1) en clusters 4 en 5 (verwanten van cluster 6).

Clusters 1, 2 en 3 liggen voornamelijk aan de buitenkant van het gebied (Vlakte van Ameland, buitenrand van de delta en aan de oostkant van het studiegebied en clusters 4, 5 en 6 vooral aan de zuidwestelijke kant ervan (Figuur 5).

De individuele clusters verschillen ook min of meer van elkaar in hun ruimtelijke verdeling, met clusters 1 (rood) op de Vlakte van Ameland, Cluster 2 (geel) op Centraal Bornrif, cluster 3 (oranje) op de buitenrand van de delta, cluster 4 (donker groen) en 5 (licht groen) op geulenranden bij Westgat, de Ebscharen en Akkepollegat en cluster 6 in de geulen bij Borndiep Westgat, de Ebscharen en Akkepollegat (Kaart in Figuur 5 en gebiedsnamen zoals in Figuur 1).

4.2 Totale dichtheid , taxonomische samenstelling en diversiteit in de clusters op T0

Gemiddelde bodemdieren dichtheden en taxonomische bijdrage aan de totale dichtheden



Figuur 6.-Links: Verdeling van de totale bodemdieren dichtheid (na dubbelwortel transformatie) als functie van de clustering op basis van bodemdieren-soortensamenstelling (T0). Rechts: Relatieve taxonomische (Klasse) samenstelling binnen de verschillende clusters.

De clusters onderscheiden zich duidelijk van elkaar op basis van de totale dichtheid (Figuur 6). De hoogste mediane waarden van dichtheid komen voor in clusters 1 en 5 en nemen af tussen clusters 2, 3, 4 en 6.

Uitgedrukt als aritmetische gemiddelden komen de hoogste waarden van dichtheden voor in cluster 5 (1198 ± 910 sd) en nemen vervolgens af tussen clusters 1 (1190 ± 910 sd), 2 (631 ± 338 sd), 4 (441 ± 455 sd), 3 (417 ± 332 sd) en 6 (184 ± 140 sd).

In alle clusters is de dichtheid gedomineerd door schaaldieren (Malacostraca), borstelwormen (Polychaeta) en schelpdieren (Bivalvia).

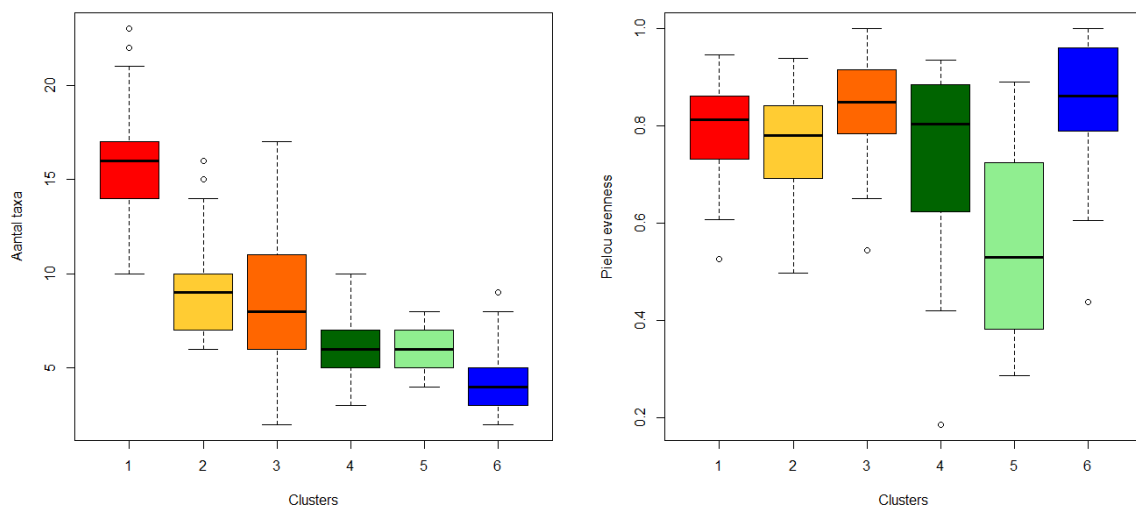
In cluster 1 dragen elke van deze drie groepen evenveel bij (ca 33%) aan de totale dichtheid.

In cluster 2 neemt, vergeleken met cluster 1, vooral het aandeel van de schaaldieren af (5%) ten gunste van de borstelwormen (65%) waar schelpdieren nog 29% van de totale bodemdieren dichtheid vertegenwoordigen.

In cluster 3 vertegenwoordigen schaaldieren, borstelwormen en schelpdieren respectievelijk 40%, 46% en 13% van de totale dichtheid.

In cluster 4 en 5 vertegenwoordigen de schelpdieren minder dan 1% van de totale dichtheid die sterk gedomineerd is door de schaaldieren met respectievelijk 79% en 98% van de totale dichtheid. Het aandeel van de borstelwormen is respectievelijk 19 en 2 % in cluster 4 en 5.

In cluster 6 vindt weer een evenwichtige verdeling plaats van de relatieve dichtheden tussen schaaldieren (50%) en borstelwormen (46%). De schelpdieren vertegenwoordigen slechts 4 % van de totale dichtheid in deze cluster.



Figuur 7. Links: Aantal soorten per locatie als functie van de clusters en Rechts: Waarden van de Pielou evenness index per locatie als functie van de clusters op basis van bodemdieren-soortensamenstelling (T0)

De hoogste gemiddelde aantal soorten per monster is bereikt in cluster 1 (15.8 ± 3 sd) waar het gemiddeld aantal soorten voor de andere clusters liggen tussen 4.5 (cluster 6) en 9.2 (cluster 2). Voor de meeste clusters liggen de gemiddelde waarden van de Pielou evenness index tussen 0.74 (cluster 5) en 0.87 (cluster 4).

De laagste gemiddelde waarde van de Pielou evenness index is bereikt in cluster 5 (0.56 ± 0.22) wat overeen komt met de bijna exclusieve dominantie van de bodemdieren gemeenschap door schaaldieren met 97% van de totale dichtheid in deze cluster (Figuur 6).

4.3 Soortensamenstelling van de clusters op T0

Vergeleken met de andere clusters kenmerkt Cluster 1 zich met negen soorten die bijna exclusief in deze cluster voorkomen, namelijk de rechtsgestreepte plaatschelp *Fabulina fabula*, de schelpkokerworm *Janice conchilega*, de zandzager *Nephtys hombergii*, de halfgeknotte strandschelp *Spisula subtruncata*, de zeeklit *Echinocardium* en de ermee geassocieerde ovale zeeklitschelp *Tellimya ferruginosa*, de zeerups *Malmgrenia* en het vlokreeftje *Nototropis falcatus*.

De borstelworm *Spio martinensis*, het bulldozerkreeftje *Urothoe poseidonis* en het nonnetje *Limecola balthica*, en het zaagje *Donax vittatus* zijn ook kwantitatief aanwezig in andere clusters bereiken hun hoogste dichtheid in cluster 1.

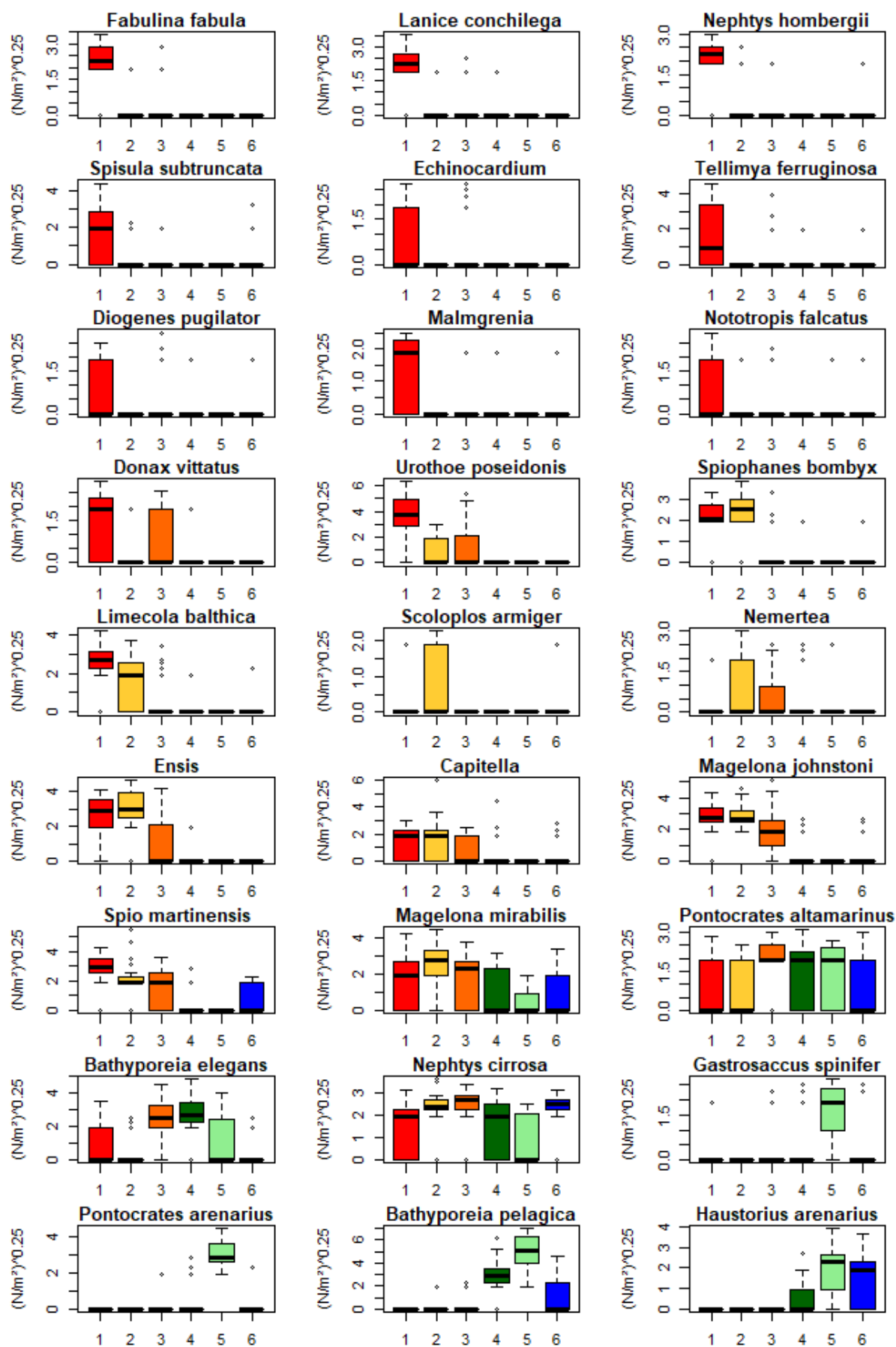
In Cluster 2 bereiken de mesheft *Ensis*, de borstelworm *Magelona mirabilis*, de Noordelijke zandkokerworm *Spiophanes bombyx*, snoerwormen (Nemertea) en de wapenworm *Scoloplos armiger* hun hoogste dichtheden.

Het mesheft *Ensis* de slangpier *Capitella* en de borstelworm *Magelona johnstoni* zijn goed vertegenwoordigd in clusters 1, 2 en 3 wel met de laagste dichtheden waargenomen in cluster 3. In cluster 3 komen wel het vlokreeftje *Pontocrates altamarinus* en het kniksprietkreeftje *Bathyporeia elegans* in hogere dichtheden voor dan in eerste twee clusters.

Cluster 4 is gekenmerkt door de aanwezigheid van beide de kniksprietkreeftjes *Bathyporeia elegans* en *B. pelagica* samen met de vlokreeftjes *Pontocrates altamarinus* en *Haustorius arenarius*.

Ook in cluster 5 komen de vlokreeftjes *Pontocrates altamarinus* en *Haustorius arenarius* wel samen met de aasgarnaal *Gastrosaccus spinifer* en de vlokreeftjes *Pontocrates arenarius* die samen met het kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica* hun hoogste dichtheden in cluster 5 bereiken.

Cluster 6 is vooral kenmerkt door de weinige soorten die daar hoge dichtheden bereiken. Zoals in clusters 4 en 5 zijn naast de borstelworm *Nephtys cirrosa*, de vlokreeftjes *Pontocrates altamarinus* en *Haustorius arenarius* en het kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica* goed vertegenwoordigd in cluster 6.



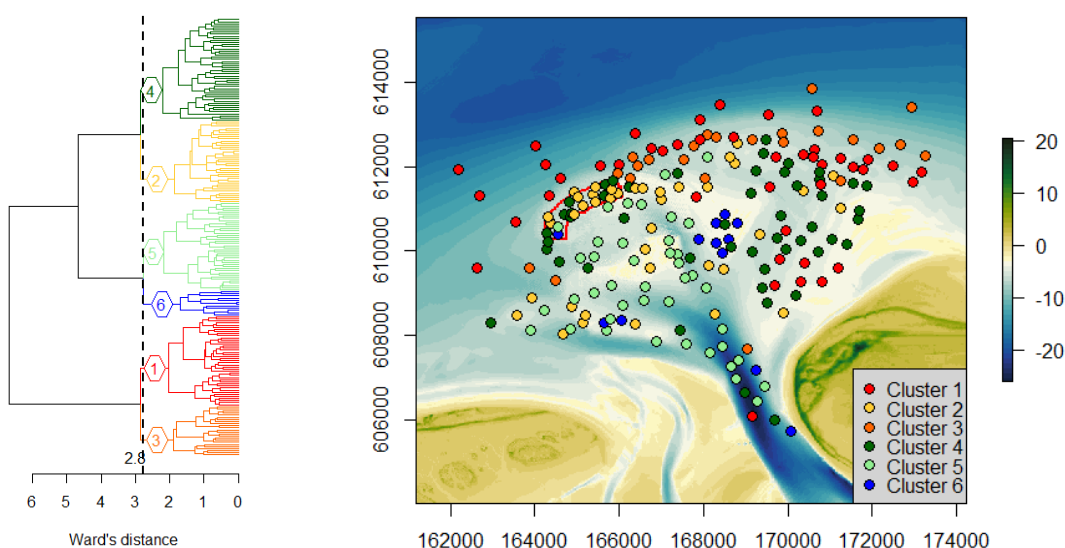
Figuur 8.- Dichtheden ($[N/m^2]^{0.25}$) van de dominante bodemdiersoorten in de 6 clusters (x-as) van monsterlocaties na groepering op basis van de soortensamenstelling (T0)

5 Bodemdierengemeenschappen in het Amelanders Zeegat ná de suppletie (T₁-T₂)

5.1 Ruimtelijke verdeling van de clusters op T1

De hiërarchische clustering (Ward's D2 clustering methode) toegepast op de dissimilariteitsmatrix (Chord coëfficiënt) tussen de 209 locaties op basis van de bodemdierensamenstelling (41 taxa) levert een structuur waar 6 clusters onderscheiden zijn door de gap-statistiek. De ANOSIM-toets bevestigt de statistische significantie van de groepsindeling (ANOSIM statistic R: 0.69, $p < 0.001$).

De clusters genummerd van 1 tot 6 omvatten respectievelijk 43, 39, 24, 49, 42 en 12 locaties.



Figuur 9.-Links: Dendrogram als weergave van de clustering (Ward's D2 methode) van de monsterlocaties (T1). De verticale stippellijn staat bij de Ward's distance (hier 2.8) voor het onderscheiden van de clusters. Rechts: Ruimtelijke verdeling van de locaties per cluster. De rode polygoon staat voor het suppletie gebied.

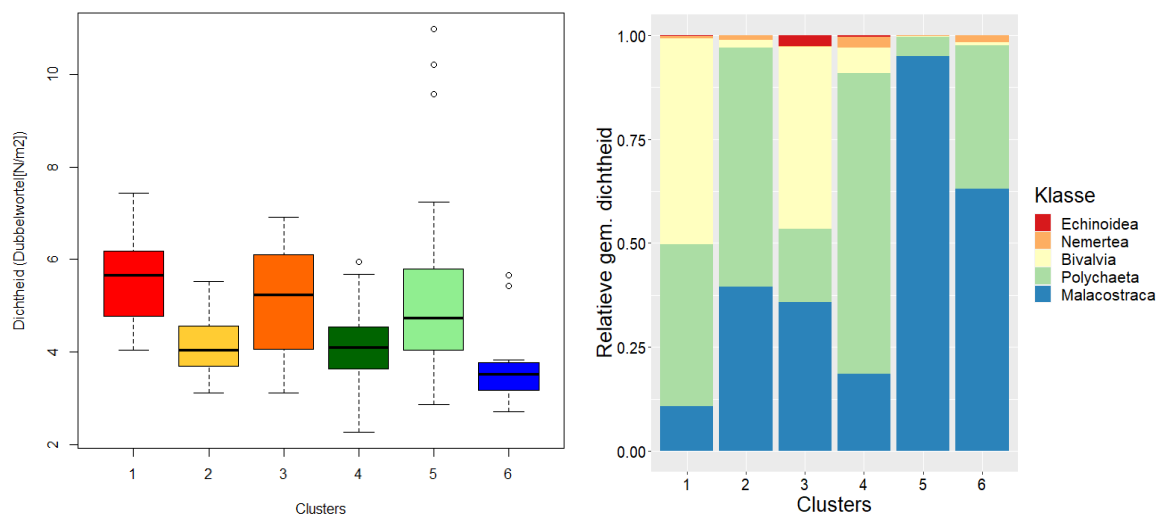
De clusteranalyse scheidt als eerste de monsterlocaties in twee groepen met clusters 1 en 3 aan de ene kant en clusters 4, 5 en 6 aan de andere kant (zie dendrogram in Figuur 5). Vervolgens onderscheiden zich twee groepen met clusters 5 en 6 aan de ene kant en clusters 1 en 3 aan de andere kant.

Clusters 1, 3, 2 en 4 liggen voornamelijk aan de buitenkant en aan de oostelijke zijde van het gebied en clusters 5 en 6 vooral aan de zuidwestelijke kant ervan (Figuur 9).

De clusters onderscheiden zich in zekere mate van elkaar op basis van hun ruimtelijke verspreiding met clusters 1 (rood) vooral aan de westelijke kant van de Vlake van Ameland en op de buitenrand van de delta en cluster 3 (oranje) samen met cluster 1 op de buitenrand van de delta en vooral aan de oostelijke kant van de Vlake van Ameland.

Cluster 2 (geel) ligt verspreid over de delta maar concentreert zich wel op de suppletie samen met cluster 4 (donker groen) die ook breed verspreid over de delta ligt en samen met cluster 1 op Centraal Bornrif en de Buitenrand van de delta. Cluster 5 (licht groen) bevindt zich vooral bij Borndiep Westgat, de Ebscharen en Akkepollegat. Cluster 6 (blauw) aan de randen van Borndiep en Westgat concentreert zich in het ondiep tussen Ebschaar 2 en Akkepollegat (Kaart in Figuur 9 en gebiedsnamen zoals in Figuur 1).

5.2 Totale dichtheid, taxonomische samenstelling en diversiteit in de clusters op T1



Figuur 10.-Links: Gemiddelde bodemdieren dichtheid als functie van de locaties clustering op basis van bodemdieren-soortensamenstelling (T1). Rechts: Relatieve taxonomische (Klasse) samenstelling binnen de verschillende clusters.

De mediane waarde van de totale dichtheden (Figuur 10) ligt hoger in clusters 1, 3 en 5 dan in clusters 2, 4 en 6. Vergeleken met de overige clusters toont cluster 6 de laagste waarde van mediane dichtheid.

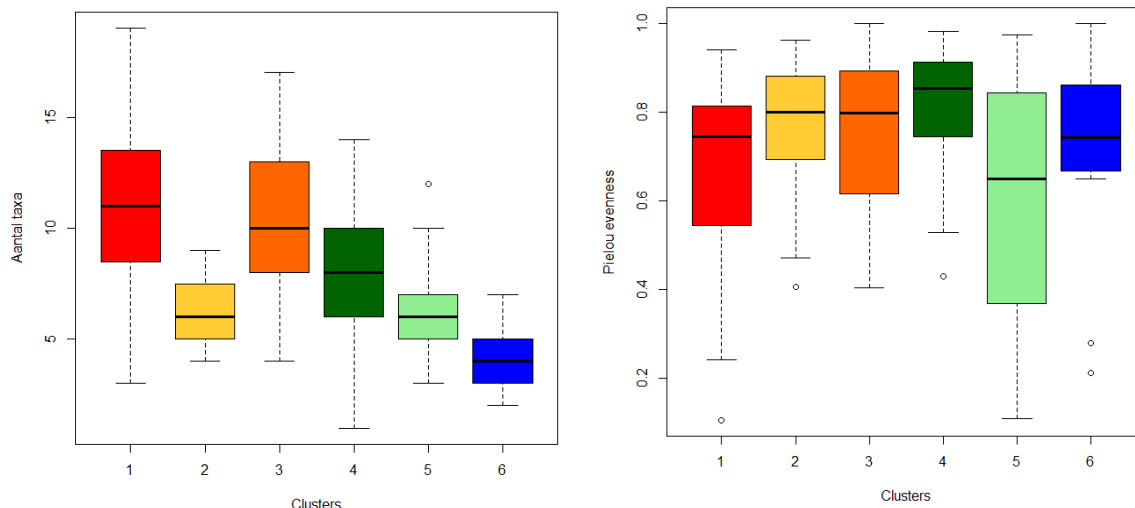
Uitgedrukt als aritmetische gemiddelden komen de hoogste dichtheden voor in cluster 5 ($14\,933 \pm 27910$) door de aanwezigheid van een paar uitschieters (duidelijk zichtbaar in Figuur 10) gevolgd door cluster 1 (9464 ± 10835) en cluster 3 (4304 ± 4199). De gemiddelde dichtheden zijn van dezelfde orde van grootte in cluster 2 (3330 ± 3746) en 4 (3437 ± 5174) en beduidend lager in cluster 6 (810 ± 965).

In alle clusters vertegenwoordigen de schaaldieren (Malacostraca), borstelwormen (Polychaeta) en schelpdieren (Bivalvia) samen meer dan 90% van de totale bodemdieren dichtheid.

Clusters 5 en 6 zijn gekenmerkt door de hoogste bijdragen van schaaldieren aan de totale dichtheden met waarden van respectievelijk 95% en 63%; de rest van de dichtheid bestaat, in deze clusters, voornamelijk uit borstelwormen: 4.5% en 35% in clusters 5 en 6.

Schelpdieren dragen significant bij aan de totale dichtheid in clusters 1 (50%) en 3 (44%); deze bijdrage neemt af in clusters 4 (6%) en 2 (2%) en vertegenwoordigt minder dan 1% van de totale dichtheid in clusters 5 en 6.

De hoogste bijdrage van borstelwormen aan de totale dichtheid is waargenomen in clusters 2 (58%) en 4 (72%)



Figuur 11. Links: Aantal soorten per locatie als functie van de clusters en Rechts: Waarden van de Pielou evenness index per locatie als functie van de clusters op basis van bodemdieren-soortensamenstelling (T1)

De hoogste waarden van gemiddelde soortenrijkdom per monster komen voor in clusters 1 (11 ± 3.4) en 3 (10.7 ± 3.6) gevolgd door cluster 4 (7.9 ± 3.1), cluster 2 (6.3 ± 1.4) en cluster 5 (5.8 ± 1.8). De laagste niveau van soortenrijkdom is waargenomen voor cluster 6 (4.1 ± 1.6).

Een aantal waarnemingen (locaties) met zeer lage waarden van de Pielou evenness index in clusters 1, 5 en 6 zorgen voor lage gemiddelde van de index in deze clusters, respectievelijk 0.68, 0.61 en 0.71 waar de gemiddelde waarden voor de andere clusters boven 0.75 liggen. Deze lage waarden duiden op de dominantie van de gemeenschap door een beperkt aantal soorten op locaties binnen deze clusters.

5.3 Soortensamenstelling van de clusters op T1

De zandzager *Nephtys hombergii*, het nonnetje (*Limecola balthica*) en het bulldozerkreeftje (*Urothoe poseidonis*) zijn goed vertegenwoordigd in beide clusters 1 en 3.

Andere soorten komen voor in alle drie clusters 1, 3 en 4; dat zijn de borstelworm *Spio martinensis*, de Noordelijke zandkokerworm *Spiophanes bombyx* en de mesheft *Ensis*.

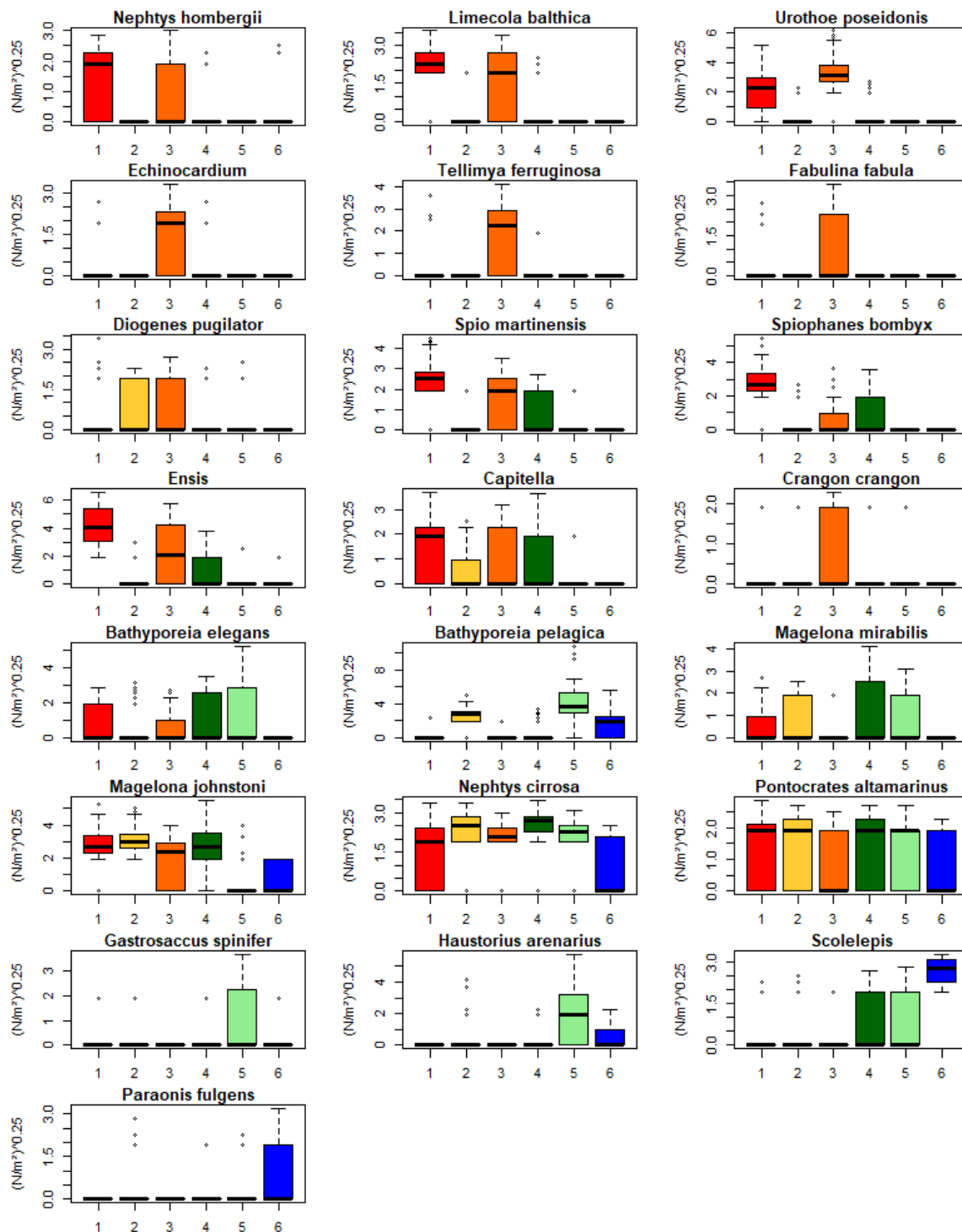
Weinig soorten bereiken hoge dichtheden in cluster 2 en de enige die dat doen zijn de zandzager *Nephtys cirrosa*, het kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica* en de borstelworm *Magelona johnstoni* die ook kwantitatief getroffen zijn in de overige clusters.

Cluster 3 kenmerkt zich ook door de aanwezigheid van de zeeklit *Echinocardium* en de ermee geassocieerde ovale zeeklitschelp *Tellimya ferruginosa* samen met de rechtsgestreepte plaatschelp *Fabulina fabula* en de gewone garnaal (*Crangon crangon*) die weinig voorkomen in de andere clusters.

In cluster 4, zoals cluster 2, komen soorten voor, meestal borstelwormen en schaaldieren, die ook gangbare soorten blijken te zijn in de andere clusters. Kenmerkend voor cluster 4 is het delen van soorten zowel met clusters 1 en 3 zoals *Spio martinensis*, *Spiophanes bombyx* en *Ensis* als met clusters 5 en 6 zoals *Haustorius arenarius* en *Scolecopsis*.

Typerend voor Cluster 5 zijn de relatieve hoge dichtheden van de aasgarnaal *Gastrosaccus spinifer* en het vlokreeftje *Haustorius arenarius*. Zoals in clusters 2 en 6 heeft het kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica* hoge dichtheden in cluster 5.

Naast de aanwezigheid van het vlokreeftje *Haustorius arenarius* is Cluster 6 gekenmerkt door de relatieve hoge dichtheden van de borstelworm *Scolecopsis* en de kurketrekterworm *Paraonis fulgens*.

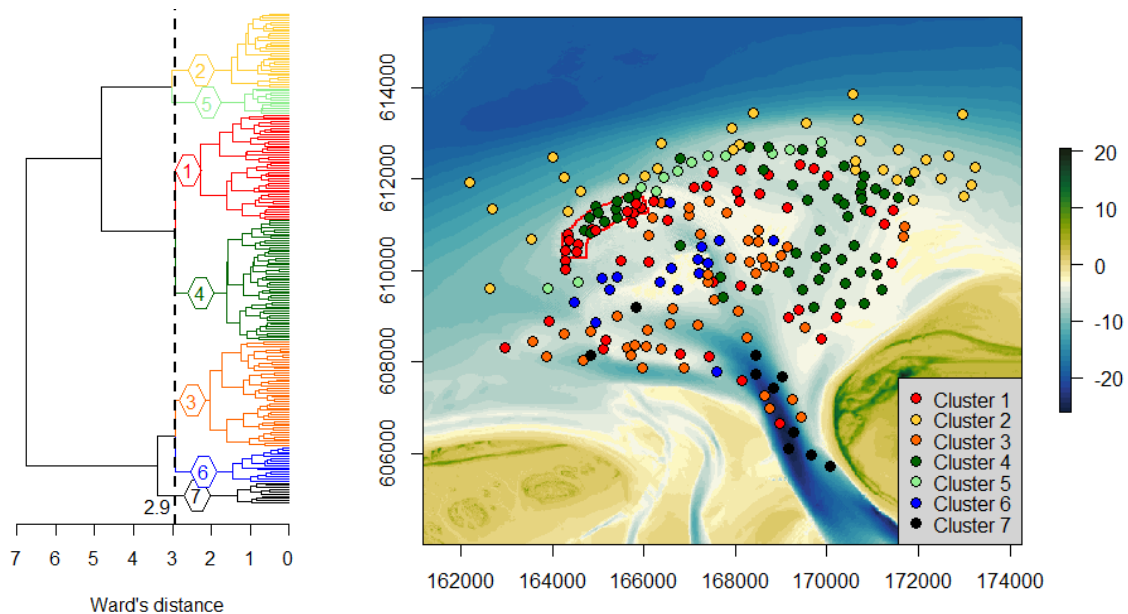


Figuur 12.- Dichtheden ($[N/m^2]^{0.25}$) van de dominante bodemdiersoorten in de 7 clusters (x-as) van monsterlocaties na groepering op basis van de soortensamenstelling (T1)

5.4 Ruimtelijke verdeling van de clusters op T2

De hiërarchische clustering (Ward's D2 clustering methode) toegepast op de dissimilariteitsmatrix (Chord-coëfficiënt) tussen de 223 locaties op basis van de bodemdierensamenstelling (46 taxa) levert een structuur waar 7 clusters onderscheiden zijn door de gap-statistiek. Een eerste poging met 6 clusters leverde een ruimtelijke indeling met alle locaties tussen Borndiep, Westgat en Ebscharen in één cluster met 106 locaties, vandaar de verhoging van 6 naar 7 (verdere opsplitsing van de cluster met 106 locaties). De ANOSIM toets bevestigt de statistische significantie van deze clustering (ANOSIM statistic R: 0.75, $p < 0.001$).

De clusters genummerd van 1 tot 7 omvatten respectievelijk 48, 34, 48, 55, 12, 16, en 10 locaties.



Figuur 13.-Links: Dendrogram als weergave van de clustering (Ward's D2 methode op Chord dissimilariteit matrix) van de monsterlocaties op basis van de bodemdieren soorten dichtheden (T2). De verticale stippellijn staat bij de Ward's distance (hier 2.9) voor het onderscheiden van de clusters. Rechts: Ruimtelijke verdeling van de locaties clustering. De rode polygoon staat voor het suppletie gebied.

De clusteranalyse scheidt als eerste de monsterlocaties in twee groepen met clusters 1, 2, 4 en 5 samen aan de ene kant en clusters 3, 6 en 7 aan de andere kant (zie dendrogram in Figuur 13). Vervolgens scheiden de clusters groepen 1-4 en 2-5 zich van elkaar. Cluster 7 is de eerste cluster die gevormd wordt na zijn scheiding van de verwante clusters-groep 3-6. In de laatste stap van de analyse worden de clusters 1 tot 6 gevormd.

De monsterlocaties van Clusters 1 en 4 liggen geconcentreerd op de suppletie en ook samen met cluster 4 aan de buitenrand van de delta, op de rand van Borndiep en Westgat en op de Centraal Bornrif (Kaart in Figuur 13 en gebiedsnamen zoals in Figuur 1). Cluster 5 ligt uitgestrekt op de buitenrand van de delta ten Oosten van de suppletie.

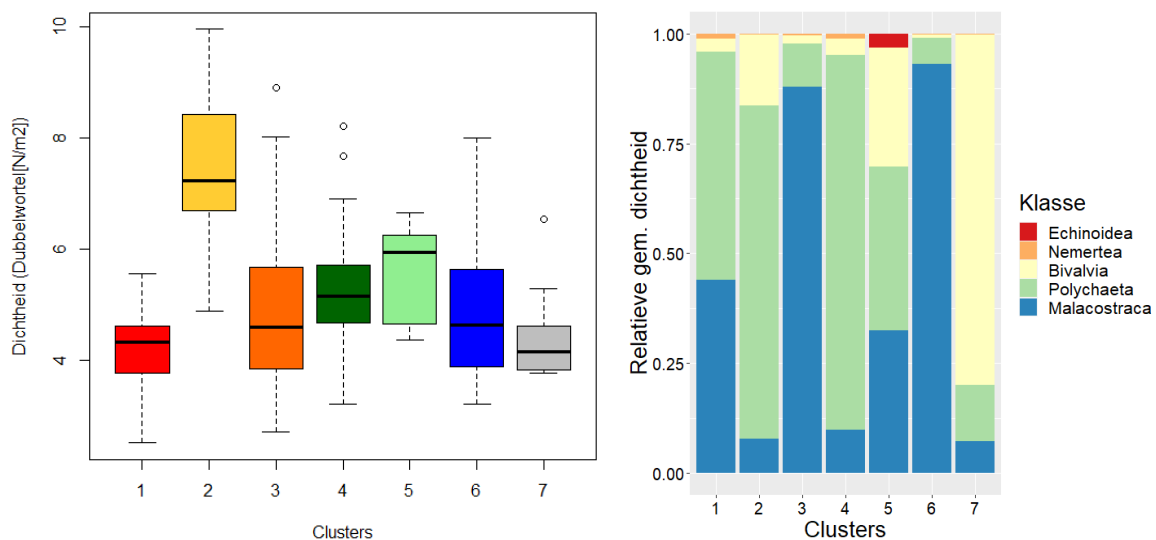
Cluster 2 is enkel te vinden op de Vlake van Ameland.

De monsterlocaties van Cluster 3 liggen langs het Borndiep, Westgat, Ebschaar-1, Ebschaar-2 en op de vlakte tussen Ebschaar-2 en Akkepollegat.

Cluster 6 ligt vooral op de vlakte tussen Ebschaar-1 en Ebschaar-2.

Acht locaties van cluster 7 liggen in het Borndiep en de resterende twee bij de uitmondingen van het Westgat en van Ebschaar 1.

5.5 Totale dichtheid, taxonomische samenstelling en diversiteit in de clusters op T2



Figuur 14.-Links: Gemiddelde dichtheid aan bodemdieren als functie van de locaties clustering op basis van bodemdieren-soortensamenstelling (T2). Rechts: Relatieve taxonomische (Klasse) samenstelling binnen de verschillende clusters.

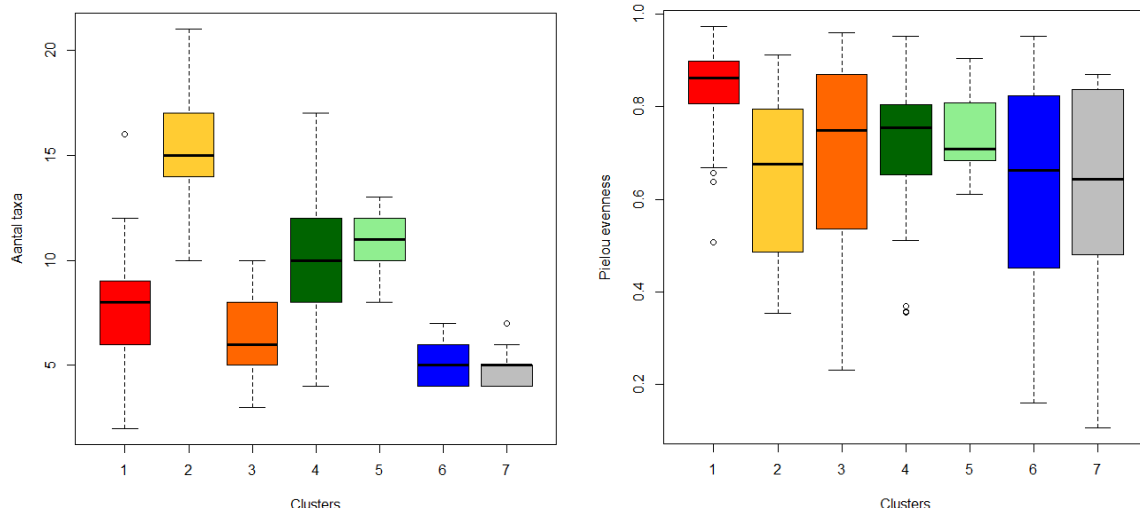
De hoogste mediane waarde van de totale dichtheid (na dubbelwortel-transformatie) komt voor in cluster 2 en de laagste waarden zijn waargenomen in clusters 1 en 7 met intermediaire waarden in de resterende clusters. Uitgedrukt als aritmetische gemiddelden komt de hoogste waarde van dichtheden voor in cluster 2 (24024 ± 38297) en nemen de gemiddelde waarden vervolgens af tussen clusters 3 (10313 ± 17394), 4 (9776 ± 17940), 5 (3273 ± 1974), 6 (3270 ± 5945) en 6 (1230 ± 1811).

De taxonomische samenstelling laat uiteenlopende verdelingen zien tussen de clusters met een enorme dominantie door schaaldieren in clusters 3 (88%) en 6 (93%) waar de bijdrage van deze groep bijzonder laag is in clusters 2 (8%), 4 (10%) en 7 (7%).

In cluster 1 en 5 vertegenwoordigen de schaaldieren respectievelijk 44% en 32% van de totale dichtheid.

Borstelwormen zijn vooral goed vertegenwoordigd in clusters 1 (52%), 2 (76%) en 4 (85%) en in mindere maat in cluster 5 (37%) waar de bijdrage van deze groep lager blijft dan 12% in de overige clusters.

De bijdrage van de schelpdieren aan de totale dichtheid neemt toe tussen clusters 2 (16%) en 5 (27%) en bereikt extreme hoge waarden in cluster 7 (80%).



Figuur 15. Links: Aantal soorten per locatie als functie van de clusters en Rechts: Waarden van de Pielou evenness index per locatie als functie van de clusters op basis van bodemdieren-soortensamenstelling (T2)

Het hoogste gemiddelde aantal soorten per monster is bereikt in cluster 2 (15.2 ± 2.7) en neemt verder af in clusters 5 (10.8 ± 1.5), 4 (10.3 ± 3.0), 1 (7.8 ± 2.7), 3 (6.2 ± 1.8), 6 (5.2 ± 1.1) en 7 (5.0 ± 0.9). De waarden van de Pielou evenness index zijn laag in clusters 2, 3, 6 en 7 gekenmerkt door de scheve verdelingen in de taxonomische samenstelling (Figuur 14).

5.6 Soortensamenstelling van de clusters op T2

Volgende zeven soorten komen bijna exclusief en in relatief hoge dichtheden voor in cluster 2: het vlokreeftje *Microtopotus maculatus*, de groengele wadworm *Eteone*, het vlokreeftje *Gammarus*, de zandzager *Nephtys hombergii*, het goudkammetje *Lagis koreni* de schelpkokerworm *Lanice conchilega* en de zeerups *Malmgrenia*.

Daarnaast is er ook een aanzienlijk aantal soorten met relatief hoge dichtheden in cluster 2 die ook gevonden zijn in andere clusters, zoals het tweetandschelpje *Kurtiella bidentata*, de tere plaatschelp *Macomangulus tenuis* en het mesheft *Ensis* ook waargenomen in cluster 5.

Soorten zoals de borstelworm *Spio martinensis*, het nonnetje *Limecola balthica* en de borstelworm *Magelona johnstoni* komen in relatief hoge dichtheden in cluster 2, 4 en 5.

Cluster 3 is vooral gekenmerkt door hoge dichtheden van het kniksprietkreeftje *Bathyporeia elegans*, samen met het vlokreeftje *Pontocrates altamarinus*, de borstelworm *Scolecopsis*, de aasgarnaal *Gastrosaccus spinifer* en het vlokreeftje *Pontocrates arenarius*.

Naast de aanwezigheid van soorten die ook te vinden zijn in clusters 2 en 5 is cluster 4 ook gekenmerkt door de aanwezigheid van relatief hoge dichtheden aan borstelwormen *Nephtys cirrosa*, *Magelona johnstoni*, *Spiophanes bombyx* en *Spio martinensis* en *Capitella*.

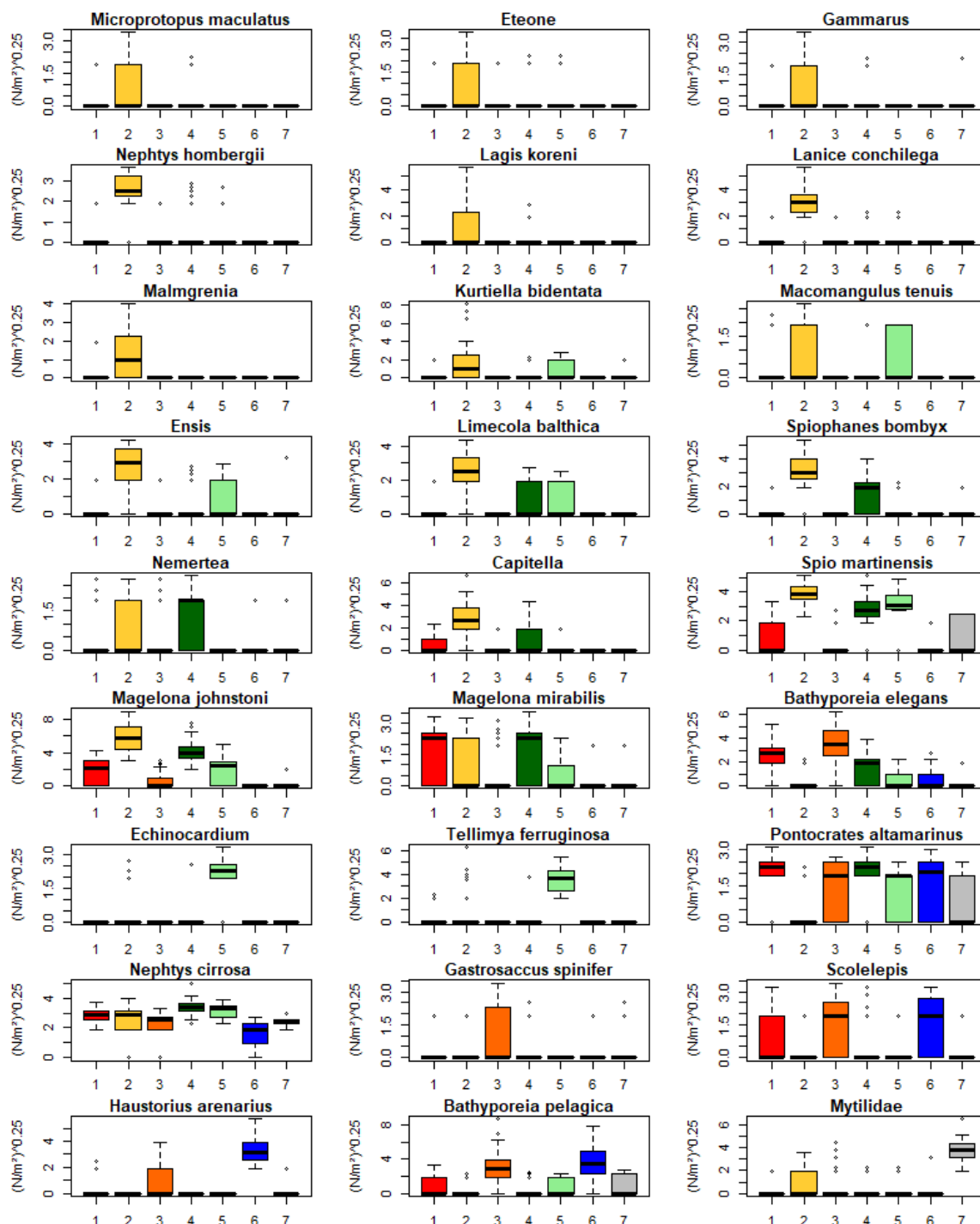
Typisch voor cluster 5 zijn de hoge dichtheden van de zeeklit *Echinocardium* en de ermee geassocieerde ovale zeeklitschelp *Tellimya ferruginosa*, en van de borstelworm *Spio martinensis*.

Cluster 6 is gekenmerkt door de aanwezigheid van de vlokreeftjes *Pontocrates altamarinus* en *Haustorius arenarius*, de borstelworm *Scolecopsis* en het kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica*.

Kenmerkend voor cluster 7 is de hoge dichtheid aan mosselen (Mytilidae) samen met de aanwezigheid van het vlokreeftje *Pontocrates altamarinus*, de borstelworm *Spio martinensis* en het kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica*.

Hoge dichtheden aan van het vlokreeftje *Pontocrates altamarinus* en het kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica* komen voor in cluster 1.

De zandzager *Nephtys cirrosa* is goed vertegenwoordigd in alle clusters maar in mindere mate in cluster 6.



Figuur 16.- Dichtheden ($[N/m^2]^{0.25}$) van de dominante bodemdiersoorten in de 7 clusters (x-as) van monsterlocaties na groepering op basis van de soortensamenstelling (T2)

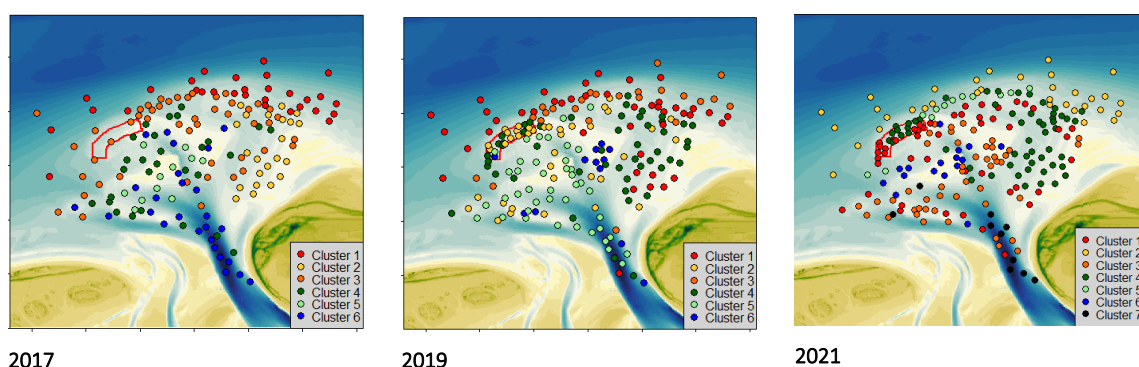
6 Ruimtelijke en temporele veranderingen in de bodemdiergemeenschappen tussen T0-T1-T2

De bodemdiergemeenschappen aanwezig in de buitendelta op T0 en de ruimtelijke en de temporele variatie in T1 en T2 zijn beschreven op basis van de soortensamenstelling van de clusters en van hun ruimtelijke verdeling in de buitendelta door de jaren heen.

De analyses zijn uitgevoerd voor elk jaar afzonderlijk (2017, 2019, 2021) waardoor een gegeven clusternummer mogelijk een andere bodemdierengemeenschap vertegenwoordigt voor de verschillende jaren.

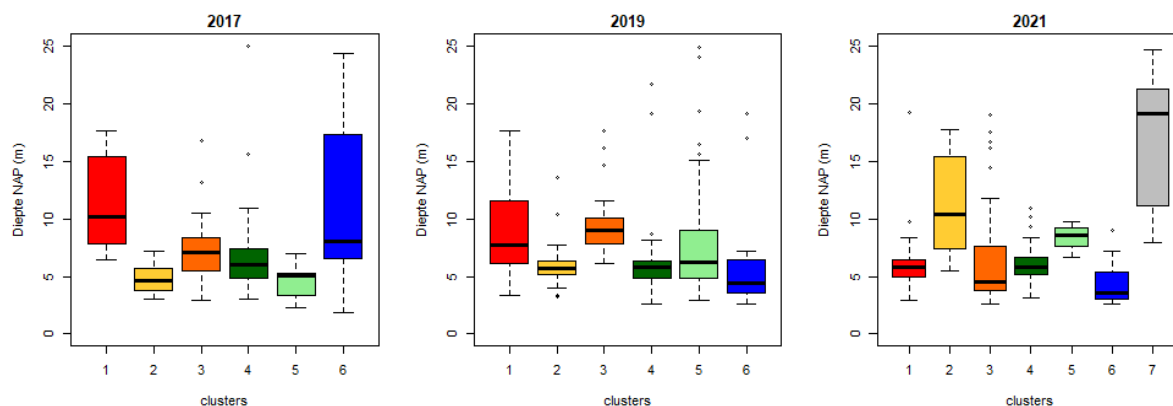
6.1 Geografische locatie van de clusters op T0, T1 en T2

De ruimtelijke verdeling van de clustering van de locaties in 2017, 2019 en 2021 (individueel bestudeerd in hoofdstuk 5) is weergegeven in Figuur 17.



Figuur 17.- Ruimtelijke verdeling van de clustering van de locaties op basis van de dichtheden van de bodemdieren in 2017, 2019 en 2021. De kleurcodering loopt gelijk met de jaarlijkse cluster-nummering waardoor clusternummers in de verschillende jaren verschillende bodemdierengemeenschappen vertegenwoordigen. De rode polygoon staat voor het suppletiegebied.

De vergelijking tussen de jaren vindt plaats op basis van de ruimtelijke verdeling van de clustering van de locaties tussen de deelgebieden binnen de buitendelta zoals beschreven in Figuur 1. De dieptes van de locaties binnen de verschillende clusters (Figuur 18) wordt gebruikt om de verdeling van de clusters binnen de deelgebieden beter te typeren.



Figuur 18.-Verdeling van de dieptes op de monsterlocaties in de clusters gevormd op basis van de bodemdierengemeenschappen voor de drie monsterjaren. De kleurcodering loopt gelijk met de jaarlijkse cluster-nummering waardoor clusternummers verschillende bodemdierengemeenschappen vertegenwoordigen door de jaren.

Op basis van de ruimtelijke verdeling van de clusters (Figuur 17) en van de bijbehorende dieptes (Figuur 18) is een overzicht gemaakt van de locaties waar de clusters gevonden zijn in 2017, 2019 en 2021 (Tabel 1).

Tabel 1.- Verdeling van de verschillende clusters gevonden in 2017, 2019 en 2021 tussen de deelgebieden binnen de buitendelta (benaming volgens kaart in Figuur 1) met eventuele aanwijzing m.b.t. de locatie binnen de gebieden. De analyses zijn uitgevoerd voor elk jaar afzonderlijk (2017, 2019, 2021) waardoor een gegeven clusternummer mogelijk een andere bodemdierengemeenschap vertegenwoordigt voor de verschillende jaren.

Gebieden / Monsterjaren:	2017	2019	2021
Vlakte van Ameland	1	1 West 3 Oost	2
Centraal Bornrif	2	1 4	4
Buitenrand delta	3	1 - 3 2 - 4 (suppletie)	5 1 - 4 (suppletie)
Borndiep	6	5	7
Westgat/ Ebscharen/ Akkepollegat	4 Dieper 5 Ondieper	5 Dieper 6 Ondiep	3 Dieper 6 Ondieper

De sterkte van het verband tussen de ruimtelijke verdeling van de bodemdierengemeenschappen en de geomorfologische gebieden in Tabel 1 varieert met de gebieden en met de monsterjaren. In 2017 is elk gebied sterk gedomineerd door één bodemdierengemeenschappen met uitzondering van het complex van geulen en ondiepten tussen Westgat, Ebscharen en Akkepollegat waar onderscheid gemaakt is tussen twee gemeenschappen als functie van de diepte. In 2019 zijn er meerdere bodemdierengemeenschappen onderscheiden binnen de meeste gebieden en slechts de Borndiep blijft gekenmerkt door de aanwezigheid van één gemeenschap. De ruimtelijke verdeling van de bodemdierengemeenschappen in 2021 keert gedeeltelijk terug op het patroon van 2017 met één dominante bodemdieren-gemeenschap in Vlakte van Ameland, Centraal Bornrif en Borndiep en twee gemeenschappen bij Westgat, Ebscharen en Akkepollegat. Het suppletiegebied onderscheidt zich t.o.v. de rest van de buitenrand van de delta met betrekking van de bodemdierengemeenschappen waargenomen in 2019 en 2021.

6.2 Bodemdierengemeenschappen in de verschillende gebieden en veranderingen tussen T0 T1 en T2

De gegevens laten toe om de veranderingen in de samenstelling van de bodemdierengemeenschappen te volgen in de verschillende geomorfologische eenheden in de buitendelta (Vlakte van Ameland, Centraal Bornrif, Buitenrand delta, Borndiep, Westgat/Ebscharen/Akkepollegat) door de jaren heen. Na de beschrijving van de individuele jaren zijn de waargenomen veranderingen in bodemdieren-gemeenschappen per deelgebied uitgelicht.

6.2.1 Vlakte van Ameland

2017: Het gros van het gebied behoort tot één cluster (cluster 1) met een hoge soortenrijkdom en totale dichtheid en een evenwichtige verdeling tussen schaaldieren, wormen en schelpdieren met kenmerkende soorten zoals *Fabulina fabula*, *Spisula subtruncata*, *Nephtys hombergii*, *Lanice conchilega*, *Echinocardium* en *Malmgrenia*. Meerdere soorten zoals *Limecola balthica*, *Ensis*, *Donax vittatus*, *Magelona's*, *Urothoe poseidonis*, *Spio martinensis* en *Capitella*, ook gevonden in andere clusters, bereiken hoge dichtheden in deze cluster.

2019: Een tweedeling van het gebied vindt plaats tussen cluster 1 aan de westelijke kant en cluster 3 aan de oostelijke kant. Beide clusters tonen relatief hoge dichtheden en soortenrijkdom (wel lager dan in 2017). In cluster 3, relatief meer schaaldieren en minder borstelwormen dan in cluster 1, in beide clusters wel de hoogste bijdrage aan schelpdieren van alle clusters.

De soorten *Fabulina fabula* en *Echinocardium* samen zijn slechts in cluster 3 aanwezig gevonden maar de soorten *Limecola balthica*, *Ensis*, *Urothoe poseidonis* en *Capitella* komen wel in beide clusters voor.

2021: Het gros van het gebied behoort tot één cluster (cluster 2). De totale dichtheid en soortenrijkdom is hoger in cluster 2 dan in de overige clusters en vergelijkbaar met de niveaus van 2017. Borstelwormen domineren sterk de bodemdierengemeenschap in cluster 2. Cluster 2 is gekenmerkt door de aanwezigheid van *Nephtys hombergii*, *Lanice conchilega*, *Malmgrenia*, *Spiophanes bombyx* samen met *Limecola balthica*, *Ensis*, *Kurtiella bidentata* en *Capitella*.

Het gemiddelde aantal soorten neemt af tussen 2017 en 2019 om zich weer te herstellen in 2021. De gemiddelde dichtheid is hoger in 2021 dan in de voorafgaande jaren. Schelpdieren zijn goed vertegenwoordigd in 2017 en 2019 terwijl de bodemdierengemeenschappen sterk gedomineerd wordt door borstelwormen in 2021.

De schelpdieren (*F. fabula*, *S. subtruncata*, *L. balthica*, *D. vittatus Ensis*), goed vertegenwoordigd in dit gebied in 2017, zijn slechts gedeeltelijk en in lagere dichtheden terug te vinden in 2019, vooral *F. fabula*, *L. balthica* en *Ensis*. In 2021 bereiken slechts *L. balthica* en *Ensis* dichtheden die vergelijkbaar zijn met de niveaus bereikt in 2017.

Kenmerkend voor dit gebied is de enorme toename in borstelwormen dichtheden tussen 2019 en 2021 zoals *Nephtys hombergii*, *Lanice conchilega*, *Malmgrenia*, *Spiophanes bombyx*.

6.2.2 Centraal Bornrif

2017: Centraal Bornrif behoort tot cluster 2 die tot aan de noordoostelijke kant van de buitenrand reikt. De totale dichtheid en soortenrijkdom zijn lager dan in cluster 1 (Vlakte van Ameland) maar nog hoger dan in de meeste clusters. De bodemdierengemeenschap in cluster 2 bestaat vooral uit borstelwormen en schelpdieren met een gering aandeel van schaaldieren. Cluster 2 is vooral gekenmerkt door *Ensis*, *Magelona mirabilis*, *Spiophanes bombyx* en *Scoloplos armiger*.

2019: Een tweedeling van het gebied vindt plaats tussen clusters 1 (ook op de Vlakte van Ameland) en 4 (ook op de buiterand van de delta). Zowel de totale dichtheid als de soortenrijkdom zijn hoger in cluster 1 dan in cluster 4. In cluster 1 domineren borstelwormen en schelpdieren samen op gelijke niveau, waarbij de gemeenschap vooral bestaat uit borstelwormen in 4. In beide clusters is de bijdrage van schaaldieren aan de totale dichtheid het geringste van alle andere clusters. Kenmerkend voor cluster 1 is de aanwezigheid van *Nephtys hombergii*, *Spio martinensis*, *Spiophanes bombyx* en, vooral ook gevonden in cluster 3 (Vlakte van Ameland), *Limecola balthica*, *Ensis*, *Urothoe poseidonis* en *Capitella*. Kenmerkend voor cluster 4 is het delen van soorten zowel met clusters 1 en 3 (Vlakte van Ameland) zoals *Spio martinensis*, *Spiophanes bombyx* en *Ensis* als met clusters 5 en 6 (Westgat/Ebscharen/Akkepollegat) zoals *Haustorius arenarius* en *Scolecopsis*.

2021: Het gebied hoort vooral bij cluster 4 dat verder reikt naar de buitenrand van de delta tot aan de suppletie. Zowel de totale dichtheid als de soortenrijkdom liggen in de middenmoot vergeleken met de overige clusters. De bodemdierengemeenschap in cluster 4 bestaat vooral uit borstelwormen met een gering aandeel van schaaldieren. *Nephtys cirrosa*, *Magelona johnstoni*, *Spiophanes bombyx* en *Spio martinensis* zijn kenmerkende soorten voor deze cluster.

Waar één relatief rijke gemeenschap in dichtheid en aantal soorten met vooral borstelwormen en schelpdieren (cluster 2) het Centraal Bornrif domineert in 2017 (wel armer dan op de Vlakte van Ameland) komen er twee verschillende gemeenschappen voor (cluster 1 en 4) in 2019.

Die twee gemeenschappen onderscheiden zich van elkaar door een hogere dichtheid en aantal soorten in cluster 1 dan cluster 4. Cluster 4 kenmerkt zich ook door een hoge dominantie van wormen daar waar schelpdieren voor meer dan de helft bijdragen aan de dichtheden in cluster 1.

In 2021 is het Centraal Bornrif weer gedomineerd door één gemeenschap (cluster 4) gekenmerkt door een relatief lage dichtheid en aantal soorten en die sterk gedomineerd is door borstelwormen.

De schelpdieren zijn vooral gedomineerd door de soorten *L. balthica* en *Ensis* in 2017 die ook in 2019 dominant zijn in cluster 1 maar in veel lagere dichtheden in cluster 4. In 2021 is de bijdrage van de schelpdieren tot de dichtheden te verwaarlozen waar het leeuwendeel van de dichtheden vertegenwoordigd is door de borstelwormen.

6.2.3 Buitenrand delta

2017: Dit gebied valt vooral onder cluster 3 met waarden van dichtheden en soortenrijkdom in de middenmoot vergeleken met de overige clusters. De totale dichtheid in cluster 3 is evenredig samengesteld uit schaaldieren en borstelworm met een gering aandeel van schelpdieren. Naast de aanwezigheid van *Ensis*, *Capitella*, *Magelona's* en *Spio martinensis* is cluster 3 gekenmerkt door hoge dichtheden van *Pontocrates altamarinus* en *Bathyporeia elegans*.

2019: Clusters 1 en 3, eerder beschreven voor de Vlake van Ameland, zijn ook typerend voor de buitenrand van de delta in 2019. Daarnaast komen clusters 2 en 4 in dit gebied voor op de suppletie. Beide clusters 1 en 3 tonen hogere dichtheden, soortenrijkdom en bijdrage van schelpdieren aan de bodemdieren dichtheid dan clusters 2 en 4. De borstelwormen domineren de dichtheid met een minimale bijdrage van de schelpdieren in beide clusters 2 en 4; de bijdrage van de schaaldieren is wel hoger in cluster 2 dan in cluster 4. Naast de aanwezigheid van de veel voorkomende borstelworm *Nephtys cirrosa* zijn de soorten *Pontocrates altamarinus*, *Magelona johnstoni*, *Bathyporeia pelagica* en *Bathyporeia elegans* (vooral cluster 2) typerend voor deze clusters. De soortensamenstelling van de clusters 1 en 3 is beschreven m.b.t. de Vlake van Ameland (2019).

2021: Vooral clusters 1 en 4 zijn aangetroffen in het gebied, inclusief binnen de suppletie. Uitgestrekt op de buitenrand van de delta, ten oosten van de suppletie bevindt zich cluster 5. Totale dichtheid en soortenrijkdom nemen af tussen cluster 5, cluster 4 en cluster 1. De bodemdierengemeenschap in cluster 4 is sterk gedomineerd door de borstelwormen, waar cluster 1 gekenmerkt is door een evenredige bijdrage van schaaldieren en borstelwormen. In cluster 5 vertegenwoordigen schelpdieren, schaaldieren en borstelwormen gelijke fractie van de bodemdichtheden. Naast de aanwezigheid in cluster 4 van relatieve hoge dichtheden aan borstelwormen *Nephtys cirrosa*, *Magelona johnstoni*, *Spiophanes bombyx* en *Spio martinensis* en *Capitella* valt ook op de aanwezigheid van *Pontocrates altamarinus* en *Bathyporeia elegans* ook goed vertegenwoordigd in cluster 1. Typisch voor cluster 5 zijn de hoge dichtheden van de zeeklit *Echinocardium* en de ermee geassocieerde ovale zeeklitschelp *Tellimya ferruginosa*, en van de borstelworm *Spio martinensis*.

In 2017 is de buitenrand gedomineerd door een bodemdieren-gemeenschap met relatief hoge dichtheden en soortenrijkdom (cluster 2) en ook met een relatief hoge bijdrage aan schelpdieren daar waar twee gemeenschappen, ook aangetroffen op de Vlake van Ameland (clusters 1 en 3), zich in dit gebied onderscheiden in 2019. Tussen de bodemdierengemeenschappen die onderscheiden zijn in dit gebied in 2017 en 2019 nemen de gemiddelde dichtheden, aantal soorten en de schelpdieren bijdrage nauwelijks af.

In 2021 komen weer twee bodemdierengemeenschappen voor met relatief hoge dichtheden en soortenrijkdom (clusters 4 en 5) op de buitenrand van de delta, respectievelijk sterk gedomineerd door borstelwormen (4) en met een meer evenwichtige taxonomische samenstelling (5). Binnen dit gebied kenmerkt de suppletie zich duidelijk in 2019 door de aanwezigheid van clusters 2 en 4, beiden met lage dichtheden en een hoge dominantie aan borstelwormen. In 2021 zijn er weer twee relatief arme bodemdierengemeenschappen, clusters 1 en 4, te vinden binnen de suppletie. Schelpdieren dragen significant bij aan de totale dichtheden op de buitenrand van de delta in 2017 (cluster 2), vooral met *L. balthica* en *Ensis*. Die soorten zijn ook in 2019 terug te vinden in dit gebied met relatief hoge dichtheden (clusters 1 en 3). In 2021 blijft een significante bijdrage van de schelpdieren op locaties van de buitenrand beperkt tot de bodemdierengemeenschappen van cluster 5 vooral met *L. balthica*, *Ensis* en het zeeklitschelpje *Tellimya ferruginosa*. Op de suppletie vallen er weinig veranderingen waar te nemen tussen 2019 (clusters 2 en 4) en 2021 (clusters 1 en 4). In beide jaren gaat het om relatief arme gemeenschappen die sterk gedomineerd zijn door borstelwormen en in mindere mate door schaaldieren.

6.2.4 Borndiep

2017: Vooral cluster 6 bevindt zich binnen dit gebied maar ook op diepe locaties in de richting van Westgat/Ebscharen/Akkepollegat. Deze cluster gekenmerkt door lage dichtheid en soorten rijkdom bestaat uit vooral uit schaaldieren en borstelwormen evenredig in verhouding. Naast *Nephtys cirrosa* is *Haustorius arenarius* de enige soort van numeriek belang in deze cluster.

2019: Waar de 'Borndiep clusters' goed traceerbaar waren op basis van hun diepte in 2017 (overigens ook in 2021), is dat niet het geval in 2019 waar de locaties in dit gebied ook clusteren samen in cluster 5 dat ook verspreid ligt tussen Westgat en Akkepollegat. De beschrijving voor cluster 5 is dus geplaatst onder het kopje Westgat/Ebscharen/Akkepollegat (2019).

2021: Cluster 7 ligt vooral in het Borndiep met 8 locaties in dit gebied en de resterende twee bij de uitmondingen van het Westgat en van Ebschaar 1. Deze cluster gekenmerkt door lage dichtheid en soortenrijkdom is sterk gedomineerd door schelpdieren (mosselen). Naast *Nephtys cirrosa*, zijn vooral *Bathyporeia pelagica* en *Pontocrates altamarinus* te vinden naast de hoge dichtheden aan mosselen.

In 2017 (cluster 6) en 2019 (cluster 5) clusteren de locaties uit het Borndiep samen met verder gelegen locaties bij Westgat/Ebscharen/Akkepollegat. Omdat de onderscheiden bodemdieren-gemeenschappen niet ruimtelijk beperkt zijn tot het Borndiep (meeste locaties buiten het Borndiep) is het niet mogelijk met de huidige benadering om tot een uitspraak te komen over de veranderingen in dit gebied tussen 2017 en 2019.

6.2.5 Westgat/Ebscharen/Akkepollegat

2017: Naast de aanwezigheid van de typische Borndiep gemeenschap (cluster 6) in de diepere delen van dit gebied onderscheiden zich clusters 4 en 5 waar cluster 4 het minst diep ligt. De dichtheden zijn hoger in cluster 5 dan 4, terwijl de soortenrijkdom niet noemenswaardig verschilt. Schaaldieren vertegenwoordigen bijna de 100 % van de totale dichtheden in cluster 5, daar waar in cluster 4 ook borstelwormen tot de gemeenschap behoren.

Bathyporeia elegans, *B. pelagica*, *Pontocrates altamarinus* en *Haustorius arenarius* zijn kenmerkend voor cluster 4. Ook in cluster 5 komen *Pontocrates altamarinus* en *Haustorius arenarius* voor en ook *Gastrosaccus spinifer*, *Pontocrates arenarius* en *Bathyporeia pelagica* zijn kenmerkend voor deze clusters.

2019: Cluster 5 die van Borndiep tot Westgat, Ebscharen, Akkepollegat reikt en de wat ondiepere cluster 6 tussen tussen Ebschaar 2 en Akkepollegat, vertegenwoordigen dit gebied. Zowel de totale dichtheid als de soortenrijkdom zijn hoger in cluster 5 dan in cluster 6. Schaaldieren vertegenwoordigen bijna 100 % van de totale dichtheden in cluster 5. In cluster 6 leveren ook naast de schaaldieren de borstelwormen een significante bijdrage aan de totale dichtheden.

Typerend voor Cluster 5 zijn de relatief hoge dichtheden van de aasgarnaal *Gastrosaccus spinifer*, het vlokreeftje *Haustorius arenarius* samen met kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica*.

Naast de aanwezigheid van het vlokreeftje *Haustorius arenarius* is Cluster 6 gekenmerkt door de relatief hoge dichtheden van de borstelworm *Scolecopsis* en de kurkentrekkerworm *Paraonis fulgens*.

2021: Het gebied is vertegenwoordigd door Cluster 3 en 6, respectievelijk in de diepere en ondiepere delen van het gebied. Dichtheid en soortenrijkdom in clusters 3 en 6 wijken niet significant af van elkaar wat ook het geval is voor de taxonomische samenstelling vooral vertegenwoordigd door schaaldieren. *Nephtys cirrosa*, *Pontocrates altamarinus*, *Scolecopsis* en *Bathyporeia pelagica* komen voor in vergelijkbare dichtheden in beide clusters 3 en 6. Wel typisch voor cluster 6 is de aanwezigheid van *Haustorius arenarius*. Typerend voor cluster 3 is de aanwezigheid van *Gastrosaccus spinifer* en hoger dichtheden aan *Bathyporeia elegans* dan cluster 6.

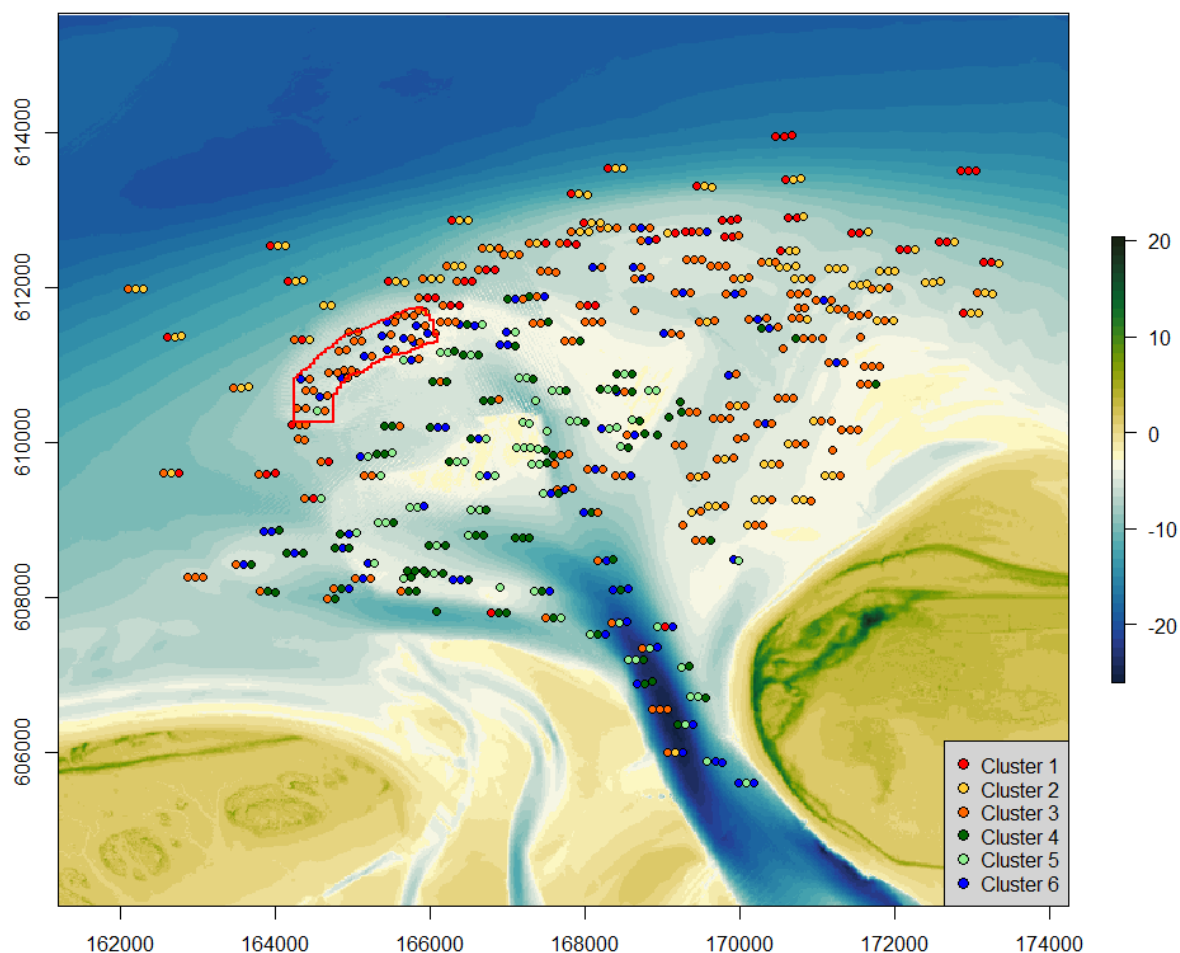
In alle jaren zijn de bodemdierengemeenschappen in dit gebied sterk gedomineerd door de kreeftachtige soorten *H. arenarius*, *P. altamarinus*, *G. spinifer*, *B. pelagica/elegans* en de borstelworm *Scolelepis*. In 2017 zijn de hoogste dichtheden (vooral schaaldieren) gevonden in ondiepe locaties (cluster 5) en in 2019 vindt dit plaats op diepe locaties. In 2021 ,lijken de bodemdieren gemeenschappen in diepe locaties (cluster 3) en ondiepe locaties (cluster 6) veel op elkaar met betrekking dichtheid, aantal soorten en soortensamenstelling.

7 Relatie met abiotische factoren

7.1 Ruimtelijke verdeling van de clusters (T0+T1+T2)

De hiërarchische clustering (Ward's D2 clustering methode) toegepast op de dissimilariteitsmatrix (Chord coëfficiënt) tussen de 597 locaties op basis van de bodemdierensamenstelling (54 taxa) levert een structuur waar 6 clusters onderscheiden zijn door de gap-statistiek. De ANOSI- toets bevestigt de statistische significantie van de groepsindeling (ANOSIM statistic R: 0.61, $p < 0.001$).

De clusters genummerd van 1 tot 6 omvatten respectievelijk 59, 94, 213, 87, 69 en 75 locaties



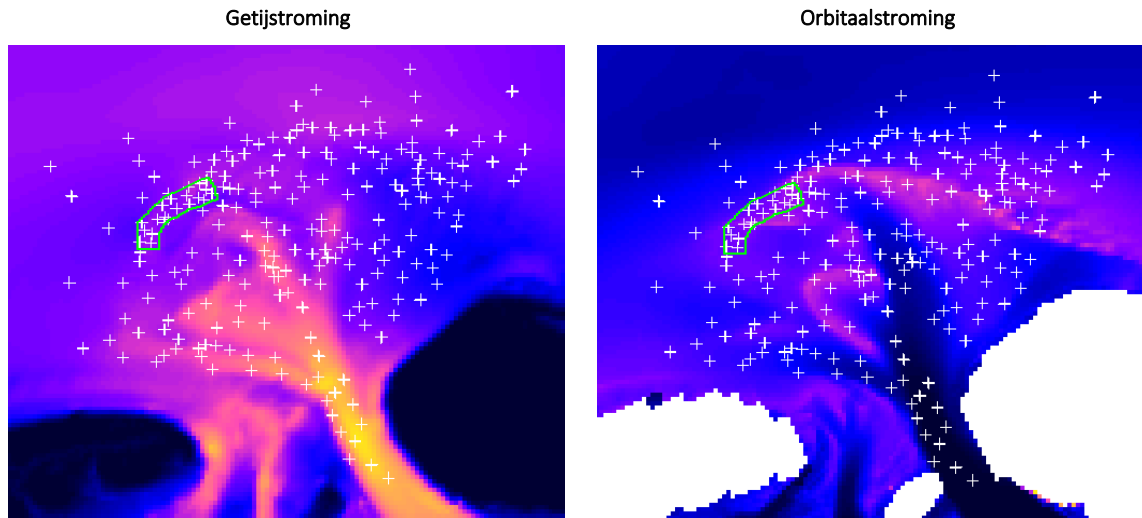
Figuur 19.-Ruimtelijke verdeling van de locaties clustering op basis van bodemdieren-soortensamenstelling (T0-T1-T2). In verband met de leesbaarheid zijn de symbolen per locatie weergegeven van links naar rechts als volgt 2017 (T0)–2019 (T1)–2021 (T2). De rode polygoon staat voor het suppletie gebied.

Kenmerkend voor de kaart als resultaat van de clusteranalyse uitgevoerd op de drie jaren samen (Figuur 19) is de jaar-tot-jaarvariatie in de clusterindeling van dezelfde locaties (reeks van symbolen met verschillende kleuren op de kaart).

7.2 Relatie tussen de clustering en omgevingsfactoren (T0+T1+T2)

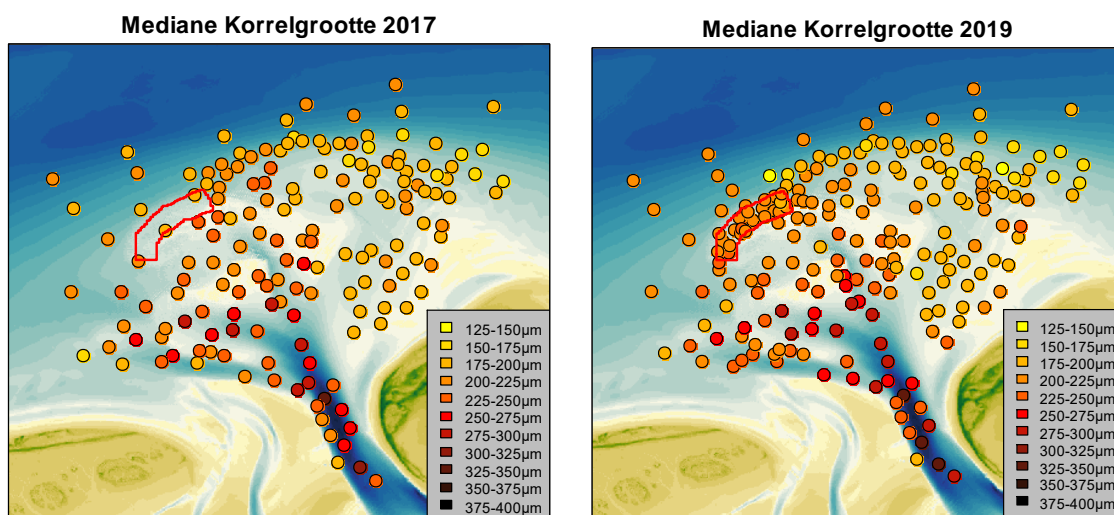
7.2.1 Overzicht van de omgevingsfactoren gebruikt in de analyse

Voor de hydrodynamica te weten de getijstroomsnelheid (SSp99ms, 99^{ste} percentiel van de stroomsnelheid in m/s) en orbitale stroomsnelheid onder golven (OrbiS_ms, gemiddelde snelheid in m/s) is gebruik gemaakt van datasets beschikbaar gemaakt door Deltares. Het gaat echter om slecht één modeluitvoer per hydrodynamische variabele (zie § 3.1) die daardoor niet representatief kan zijn voor de jaar-tot-jaarverandering in de buitendelta.



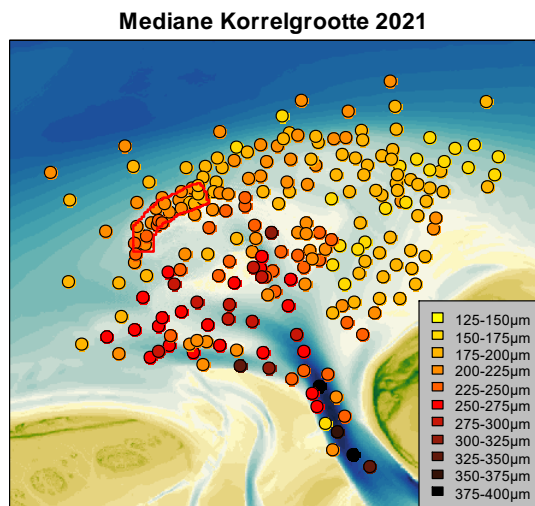
Figuur 20.-Rasters van modeluitvoer van de hydrodynamische variabelen (Getijstroom, Orbitaalstroom, beiden m/s, van blauw naar geel voor toenemende snelheid).

De korrelgrootteverdeling van het sediment behoort tot de standaardmetingen uitgevoerd tijdens de metingen waardoor een actuele waarde beschikbaar voor elke monsterpunt. Er is in deze studie gebruik gemaakt van de mediane korrelgrootte als variabele voor sedimentsamenstelling. Voor de diepte (meters t.o.v. NAP) is gebruik gemaakt van de RWS-vaklodingen van de jaren 2017, 2019 en 2021.



Figuur 21.-Mediane korrelgrootte (µm) op elke monsterlocaties in 2017 en 2019.

De intensiteit van de getijstromen bij het Borndiep, het Westgat, de twee ebscharen en het Akkepollegat is duidelijk zichtbaar op de modeluitvoer (Figuur 20). De intensiteit van de golven is duidelijk op de buitenrand van de delta, bij de suppletie en verder binnen de delta langs de Akkepollegat.

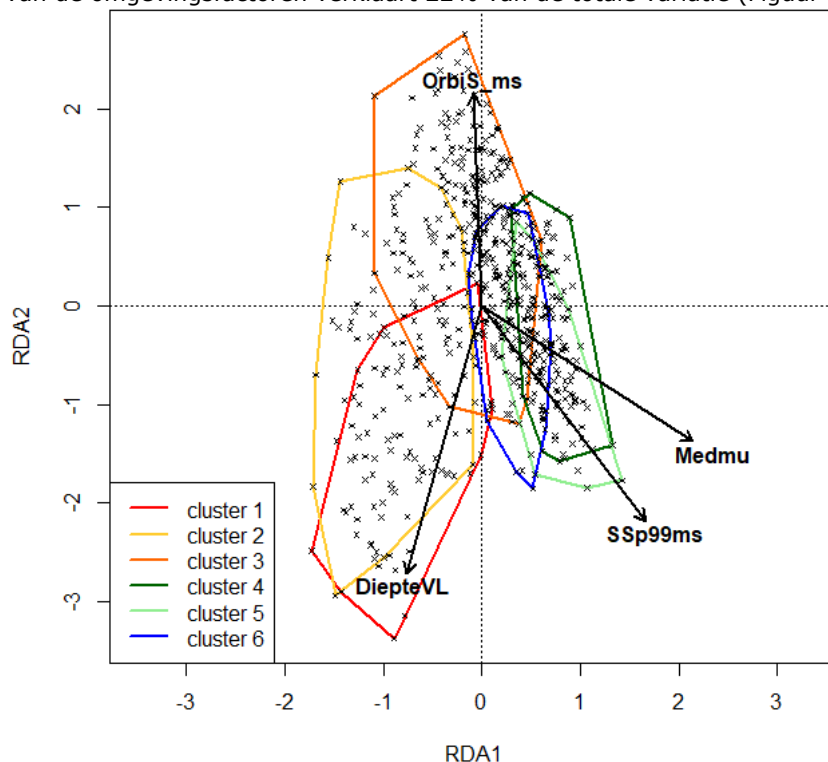


Figuur 22.-Mediane korrelgrootte (µm) op elke monsterlocaties in 2021.

Het sediment is het grofst bij het Borndiep en wordt fijner naar buiten met minimale waarden van de mediane korrelgrootte op de Vlake van Ameland (Figuur 21 en Figuur 22).

7.2.2 Statistische analyse

De projectie van de bodemdierengemeenschappen in de RDA-plot waar de assen lineaire functies zijn van de omgevingsfactoren verklaart 22% van de totale variatie (Figuur 23).



Figuur 23.-Projectie van de eerste twee assen van een RDA verkregen op basis van de bodemdierengemeenschappen voor T0, T1, T2 samen met weergave van de begrenzing van de clusters en de pijlen voor de contributie van de omgevingsfactoren op de RDA assen. (DiepteVL: Diepte t.o.v. NAP uit de jaarlijkse vaklodingen, SSp99ms: Maximale stroomsnelheid, Medmu: mediane korrelgrootte µm, OrbiS_ms: Orbitale snelheid door golven)

De horizontale as (RDA1) correleert aan de positieve (rechtse) kant met de mediane korrelgrootte (**Medmu** pijl gericht naar rechts) en, maar wel in mindere mate, met de getijstroomsnelheid (**SSp99ms**).

De verticale as (RDA2) is aan de positieve (boven) kant gecorreleerd met de orbitale stroomsnelheid door golven (**OrbiS_ms** pijl gericht naar boven). Aan de negatieve (onder) kant is RDA2 gecorreleerd met de diepte en met de getijstroomsnelheid (pijlen van **DiepteVL** en **SSp99ms** gericht naar beneden).

Samengevat:

- Aan de rechtse kant van de diagram wordt het sediment grover en dus fijner aan de linkse kant.
- Aan de bovenkant van de diagram zijn de ondiepe locaties blootgesteld aan de golvendynamiek en aan de onderkant de diepe locaties die te maken hebben met getijstrooming.

Van links naar rechts wisselen de clusters elkaar af (1 & 2 → 3 → 6 → 4 & 5) met het grover worden van het sediment.

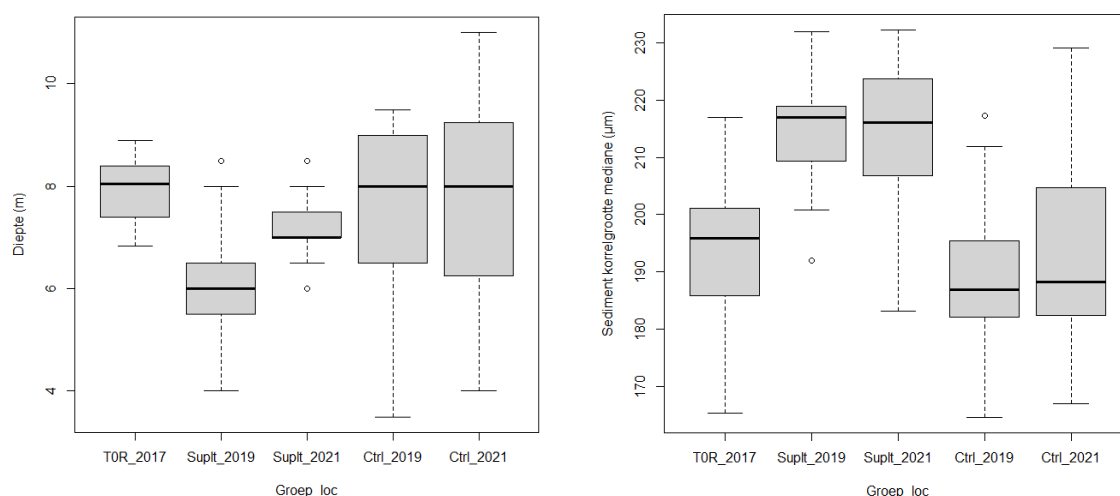
Van boven naar beneden ontstaat de volgende successie (3 → 2 & 4 & 5 & 6 → 1) met toenemende diepte en de afname van de golfintensiteit.

8 Veranderingen in de bodemdieren-gemeenschappen binnen de suppletiegebieden 1 en 3 jaar na de suppletie

8.1 Veranderingen in de abiotische omstandigheden

Gezien het gebrek aan specifieke model-uitvoer voor elke monsterjaar is het niet zinvol om de waarden van hydrodynamische variabelen te vergelijken tussen de monsterjaren.

De vergelijking blijft dus beperkt tot de diepte en de mediane korrelgrootte van het sediment, beide direct gemeten tijdens de bemonstering.



Figuur 24.-Links: Diepte (m t.a.v. NAP) en Rechts: korrelgrootte van het sediment (mediane korrelgrootte, µm) gemeten op de T0_R-locaties in 2017 (vóór het aanleg), op de locaties verzameld binnen het suppletiegebied ná het aanleg in 2019 (Suplt_2019) en 2021 (Suplt_2021) en op de locaties uit de T0_R locaties verzameld buiten het suppletiegebied in 2019 (Ctrl_2019) en 2021 (Ctrl_2021).

Dieptes in suppletiegebied t.o.v. referentie

De diepte laat een duidelijk afname zien na de aanleg van de suppletie met gemiddelde waarden van 8.0 m (\pm sd 0.6) in T0_R_2017 en 6.0 m (\pm sd 1.1) in Suplt_2019. Vier jaar na de suppletie nemen de dieptes weer toe tot een gemiddelde van 7.2 m (\pm sd 0.6) in Suplt_2021. Deze verhoging van de zeebodem tussen 2017 is een directe gevolg van het aanleg en de toename in diepte tussen 2019 en 2021 is een illustratie van de erosie van de suppletie.

Dieptes in controlegebied t.o.v. referentie

De controledataset (buiten de suppletie) Ctrl_2019 en Ctrl_2021 is gekenmerkt door grote variaties in dieptes wat misschien te maken heeft met de locaties van de monsters op de rand van de buitendelta, tegenaan de helling. De gemiddelde waarden van dieptes voor Ctrl_2019 (7.6 \pm sd 1.8 m) en Ctrl_2021 (7.7 \pm sd 2.1 m) zijn wel goed vergelijkbaar met de waarden waargenomen in het referentie gebied T0_R_2017.

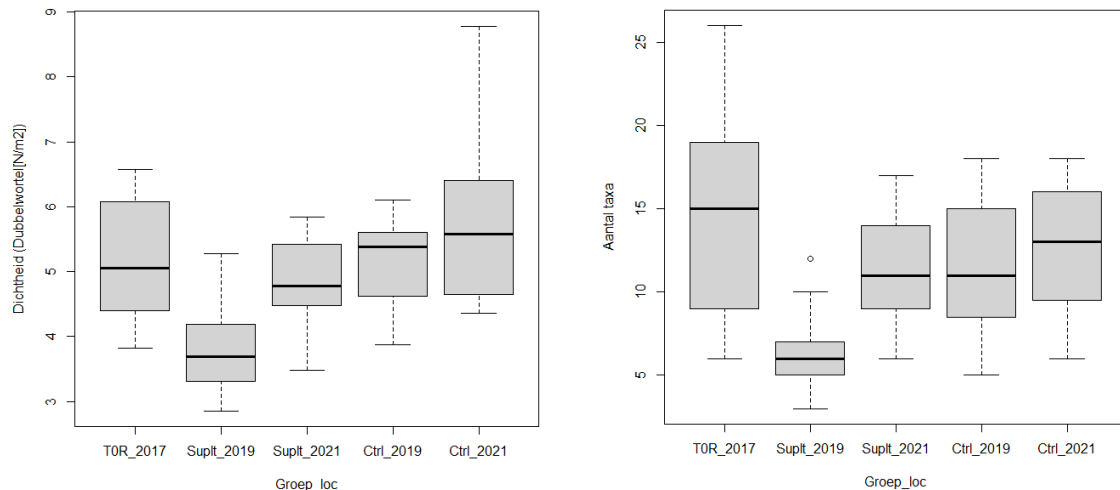
Sedimentsamenstelling in suppletiegebied t.o.v. referentie

De mediane korrelgrootte (mediane μm) toont een duidelijk toename tussen de referentiewaarden waargenomen in T0_R_2017 (193 \pm sd 13 μm) en beide meetjaren in de suppletie: Suplt_2019 (214 \pm sd 9 μm) en Suplt_2021 (213 \pm sd 14 μm).

Sedimentsamenstelling in controlegebied t.o.v. referentie

De sedimentsamenstelling gemeten buiten het suppletiegebied in Ctrl_2019 (188 \pm sd 16 μm) en Ctrl_2021 (196 \pm sd 20 μm) toont geen noemenswaardige veranderingen vergeleken met de referentiewaarden in T0_R_2017 (195 \pm sd 18 μm).

8.2 Veranderingen in dichtheid en diversiteit



Figuur 25.-Links: totale dichtheid en Rechts: soortenrijkdom (r) gemeten op de T0_R-locaties in 2017 (vóór het aanleg), op de locaties verzameld binnen het suppletiegebied ná het aanleg in 2019 (Suplt_2019) en 2021 (Suplt_2021) en op de locaties uit de T0_R-locaties verzameld buiten het suppletiegebied in 2019 (Ctrl_2019) en 2021 (Ctrl_2021).

Totale dichtheden in suppletiegebied t.o.v. referentie

De totale dichtheid laat een duidelijk afname zien na de aanleg van de suppletie met gemiddelde waarden van 852 N.m⁻² (\pm sd 529) in T0_R_2017 en 255 N.m⁻² (\pm 186) in Suplt_2019. Vier jaar na de suppletie nemen de dichtheden weer toe met een gemiddelde van 604 N.m⁻² (\pm sd 308) in Suplt_2021.

Totale dichtheden in controlegebied t.o.v. referentie

De totale dichtheid gemeten buiten het suppletiegebied in Ctrl_2019 (751 N.m⁻² \pm sd 345) toont geen noemenswaardige veranderingen vergeleken met de referentiewaarden in T0_R_2017 (852 \pm sd 529 μm). Vier jaar na het aanleg zijn de totale dichtheid gemeten buiten het suppletiegebied in Ctrl_2021 (1492 N.m⁻² \pm sd 1567) aan de hogere kant vergeleken met de andere groepen van locaties maar nog steeds binnen dezelfde ordegrrootte.

Soortenrijkdom in suppletiegebied t.o.v. referentie

Zoals voor de dichtheden vindt een sterke afname in de soortenrijkdom plaats tussen T0_R_2017 (14.0 \pm sd 6.0) en Suplt_2019 (6.2 \pm sd 2.2). Ook hier neemt, vier jaar na de suppletie, de soortenrijkdom weer toe met een gemiddelde van 11.5 (\pm sd 3.0) in Suplt_2021.

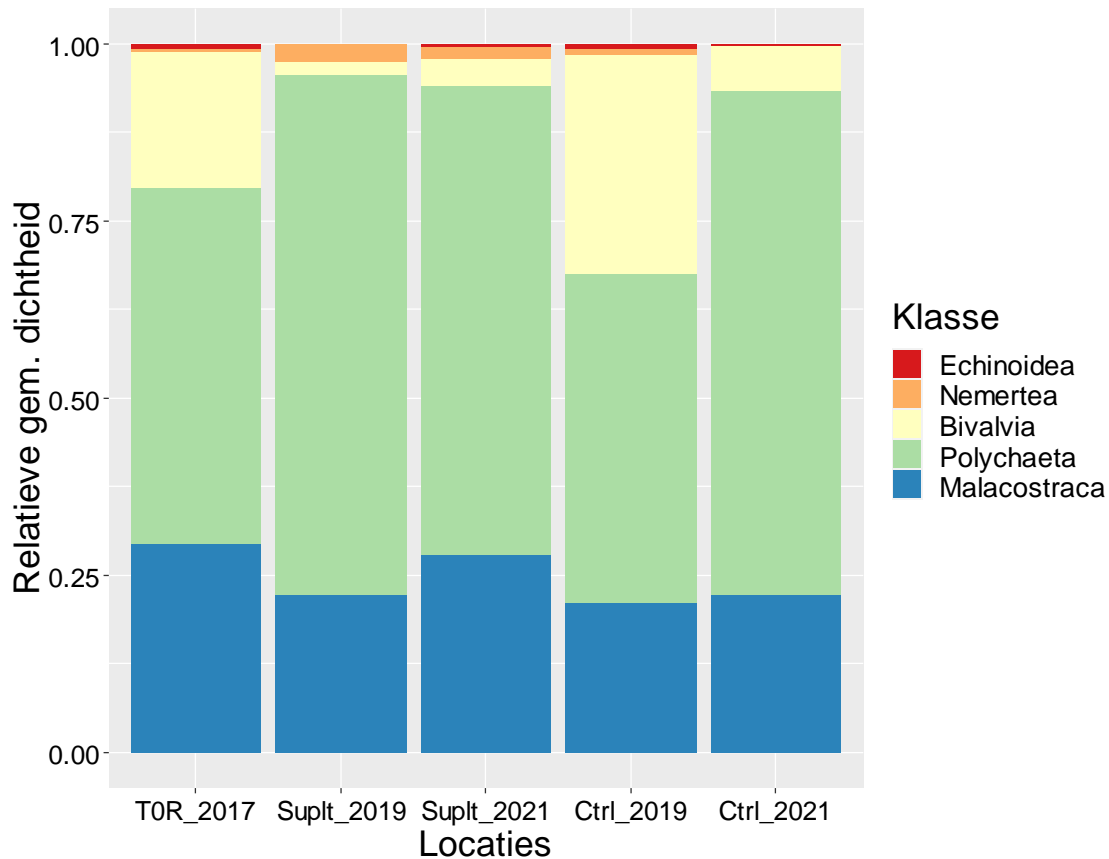
Soortenrijkdom in controlegebied t.o.v. referentie

In de monsters verzameld in het controlegebied in 2019 en 2021 blijft de soortenrijkdom wel aan de lage kant met gemiddelde waarden van 11.3. (\pm sd 3.9) en 12.8 (\pm sd 3.9) in Ctrl_2019 en Ctrl_2021 vergeleken met 14 (\pm sd 5.5) in T0_R_2017.

Relatieve bijdrage van taxonomische klassen aan de totale dichtheden

De relatieve bijdrage van de volgende dominante taxonomische klassen aan de totale dichtheden is weergegeven in Figuur 26: Bivalvia (schelpdieren), Malacostraca (schaaldieren) en Polychaeta (borstelwormen).

De gemeenschap in T0_R_2017 bestaat voor 50% uit borstelwormen, 29% uit schaaldieren en 19% uit schelpdieren. Na het aanleg (Suplt_2019) gaat de afname in dichtheid van 852 N.m⁻² tot 255 N.m⁻² (zie Figuur 25) gepaard met een relatieve toename van de borstelwormen tot 73 % van de totale dichtheid ten koste van de schelpdieren die slechts 2% van de dichtheid vertegenwoordigen in 2019. Ook de schaaldieren zien hun bijdrage afnemen van 29% in 2017 tot 22% in 2019. Tussen 2019 en 2021 nemen de bijdragen van de schelpdieren en schaaldieren licht toe tot respectievelijk 4% en 26 % van de totale dichtheid; tegelijkertijd gaat de bijdrage van de borstelwormen iets omlaag maar ligt nog met 67% van de totale dichtheid beduidend hoger dan in 2017.

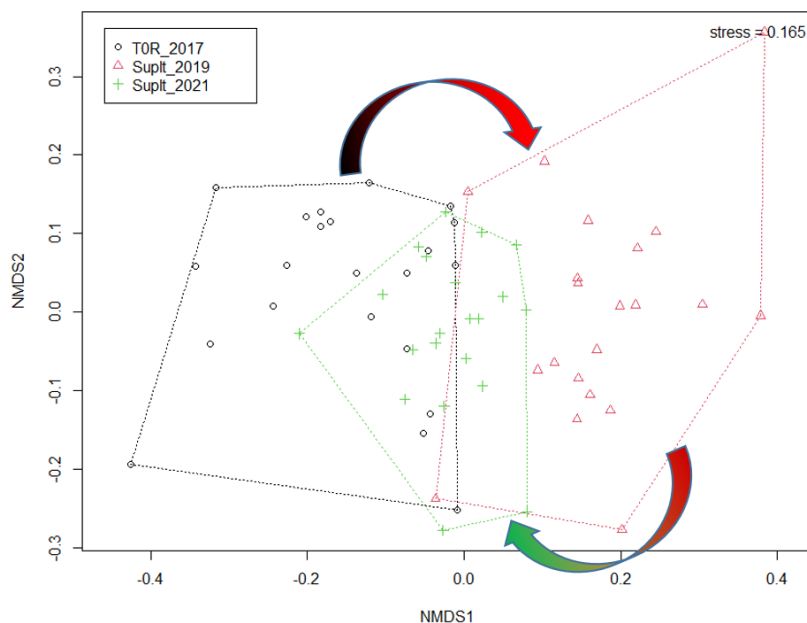


Figuur 26.-Relatieve bijdrage van taxonomische klassen aan de bodemdieren dichtheden gemeten op de T0_R locaties in 2017 (vóór het aanleg), op de locaties verzameld binnen het suppletiegebied verzameld ná het aanleg in 2019 (Suplt_2019) en 2021 (Suplt_2021) en op de locaties uit de T0_R locaties verzameld buiten het suppletie gebied in 2019 (Ctrl_2019) en 2021 (Ctrl_2021).

De locaties in Ctrl_2019 zijn gekenmerkt door de hoge bijdrage van de schelpdieren (31%) aan de totale dichtheid, vooral als gevolg van een toename aan mesheften dit jaar. Tussen 2019 en 2021 neemt die bijdrage drastisch af tot slechts 6% van de totale dichtheid. Het leeuwendeel (71%) van de bodemdichtheid bestaat in 2021 uit borstelwormen.

8.3 Multivariate descriptoren

Bodemdierengemeenschappen in suppletiegebied t.o.v. referentie



Figuur 27.-nMDS-plot met weergave van de monsters op de T0_R locaties in 2017 (vóór het aanleg) en de locaties verzameld binnen het suppletiegebied verzameld ná het aanleg in 2019 en 2021. De pijlen wijzen op de temporele verschuivingen in de soortensamenstelling tussen de jaren

In de nMDS plot (Figuur 27) zijn de monsters verzameld in de drie groepen van locaties T0_R_2017, Suplt_2019 en Suplt2021 zo geplaatst dat de relatieve afstand tussen alle locatie de verschillen in de soortensamenstelling (de waarde van de dissimilariteitsindex) weerspiegelt. Monsters die veel op elkaar lijken, zullen dus dicht bij elkaar liggen op de nMDS plot.

De kwaliteit van de huidige weergave gemeten met een stresswaarde van 0.165 (0 tot 0.1 uitstekend, 0.1 tot 0.2 acceptabel, groter dan 0.2 twijfelachtig in Clarke et al., 2014) maakt het mogelijk om significant structuren in de bodemdierengemeenschappen te duiden.

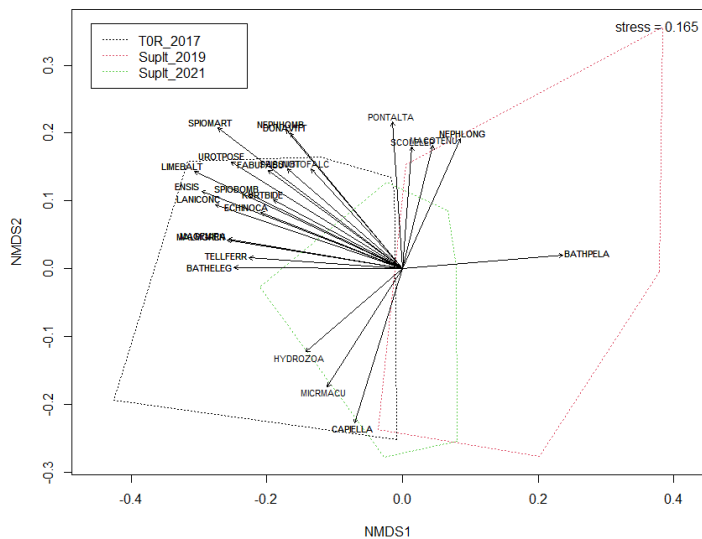
Er is weinig overlap tussen de monsters van T0_R_2017 en Suplt_2019. De Suplt_2021 monsters bevinden zich ertussen en overlappen met de overige groepen. Een ANOSIM-test bedoeld om de verschillen tussen de groepen statistisch te toetsen levert een significante waarde van R: 0.3672 ($p < 0.001$).

In deze plot zien we dus de bodemdierengemeenschap sterk veranderen na de aanleg (Suplt_2019) om twee jaar later (Suplt_2021) terug te gaan in de richting van de oorspronkelijke gemeenschap (T0_R_2017). Deze evolutie komt ook goed overeen met de patronen waargenomen voor de totale dichtheid en de soortenrijkdom.

Van de 60 soorten aanwezig in de 64 monsters in deze dataset wijst de Envfit-routine naar een selectie van 24 soorten die significant ($p < 0.01$) bijdragen aan de verspreiding van de locaties op nMDS plot. Het weergeven van de soorten in de nMDS-plot tussen de locaties geeft een indicatie over de verschuivingen in de bodemdierengemeenschappen tussen de verschillende gebieden op deze plot (Figuur 28).

In de huidige plot zien we bij voorbeeld de vlokreeftjes *Bathyporeia pelagica* (BATHPELA) en *Bathyporeia elegans* (BATHELEG) respectievelijk wijzen naar Suplt_2021 (rechter zijde) en naar T0_R_2017 (linker zijde). Van die soorten is wel bekend dat hun aanwezigheid sterke gebonden is aan de omgevingsfactoren met een verschuiving van *B.pelagica* naar *B.elegans* voor het dieper en minder geëxposeerd aan de invloed van golven. Zo'n gradiënt vindt inderdaad plaats tussen Sup_2021 en T0_R_2017.

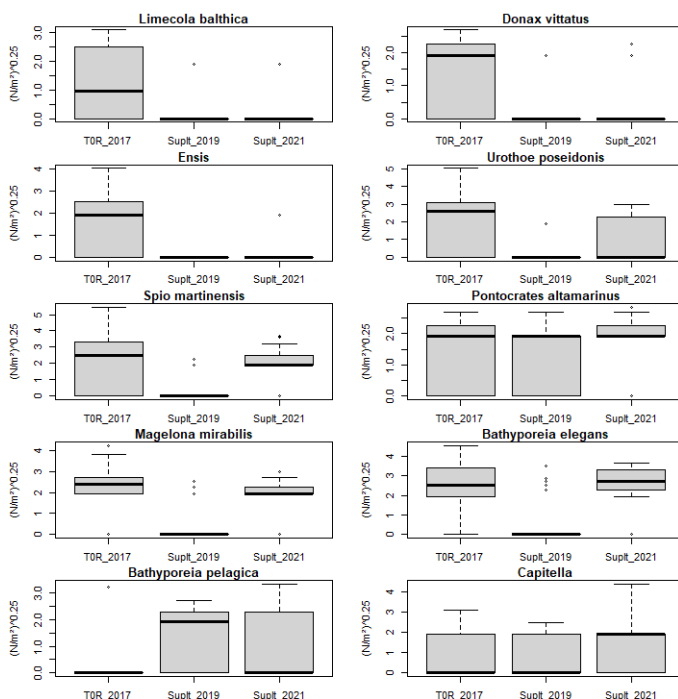
De aanwezigheid van o.a. het nonnetje *Limecola balthica* (LIMEBALT) en *Ensis* aan de kant van de referentielocaties (T0_R_2017) komt ook overeen met de aanwezigheid daar van fijner sediment op meer beschutte locaties vergeleken met de situatie in het suppletiegebied.



Figuur 28.-NMDS-plot met weergave van de monsters op de T0_R locaties in 2017 (vóór het aanleg) en de locaties verzameld binnen het suppletiegebied verzameld ná het aanleg in 2019 en 2021. De pijlen wijzen op de 24 soorten die significant bijdragen aan de verspreiding van de locaties in de NMDS-plot.

Van de 24 soorten die significant bijdragen aan de verdeling van de monsters in de NMDS plot is een selectie gemaakt van 10 soorten die tenminste in een groep van locaties hoge gemiddelde dichtheden bereiken (Figuur 29).

De evolutie in dichtheden tussen de groepen van locaties wijst voor vele soorten op het negatieve effect van de zandsuppletie. Schelpdieren zoals *Limecola balthica*, *Donax vittatus* en *Ensis* die goed vertegenwoordigd zijn in de T0_R_2017 monsters komen nauwelijks meer voor in de suppletie monsters in 2019 en 2021 (Figuur 29). De borstelwormen *Spio martinensis* en *Magelona mirabilis* tonen, na een sterke afname in 2019 een terugkeer in de suppletie locaties in 2021. De respons van de schaaldieren op de suppletie varieert verschillend: *Bathyporeia pelagica*, zo goed als afwezig in de T0_R_2017-monsters bereikt hoge dichtheden op de suppletie in 2019 en verdwijnt weer in 2021. Het tegenovergestelde is waargenomen voor *Bathyporeia elegans* met hoge dichtheden in de T0_R_2017-monsters en een terugkeer op de suppletie in 2021 na de verdwijning in 2019. *Pontocrates altamarinus* blijft op onveranderd met hoge dichtheden in de T0_R_2017 monsters alsook op de suppletie in 2019 en 2021.

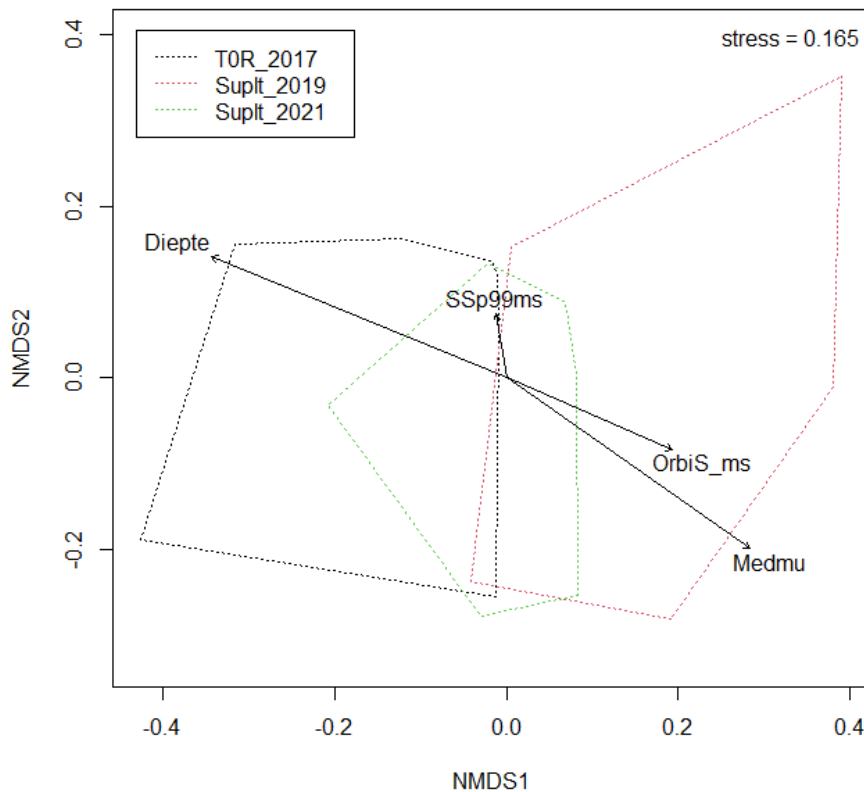


Figuur 29.-Dichtheden van de 10 dominante soorten die bijdragen aan de NMDS-plot op de T0_R locaties in 2017 (vóór het aanleg) en de locaties verzameld binnen het suppletiegebied verzameld ná het aanleg in 2019 en 2021.

Relatie tussen de bodemdierengemeenschappen en de omgevingsfactoren

Deze analyse is uitgevoerd op basis van de dataset T0_R_2017 / Suplt_2019 / Suplt_2021 waarvoor duidelijke verschillen waargenomen zijn tussen de monsters van de referentiedataset T0_R uit 2017 en de monsters binnen het suppletiegebied in 2019 en 2021 (Figuur 27).

De envfit-routine (Vegan R-package) zoekt de overeenkomsten tussen de verspreiding van de locaties in de nMDS-plot op basis van de bodemdierengemeenschap en de waarden van omgevingsfactoren (slechts één modeluitvoer met stroom- en orbitaalsnelheden beschikbaar): Diepte, getij-stroomsnelheden (SSp99ms), orbitaalsnelheden door golven (OrbiS_ms) en de mediane korrelgrootte van het sediment (Medmu).



Figuur 30.-N-MDS-plot met weergave van de monsters op de T0_R locaties in 2017 (vóór het aanleg) en de locaties verzameld binnen het suppletiegebied verzameld ná het aanleg in 2019 en 2021. De pijlen wijzen op de 4 omgevingsfactoren die beschikbaar waren bij het schrijven van deze rapportage: Diepte, Getij-stroomsnelheden (SSp99ms), orbitaalsnelheden van golven(OrbiS_ms) en de mediane korrelgrootte van het sediment (Medmu).

De 'projectie' van de omgevingsfactoren op de nMDS-plot (Figuur 30) wijst naar een eenduidige relatie tussen de richting van de verschuivingen in de bodemdierengemeenschappen tussen T0_R_2017, Suplt_2019 en Suplt_2021 en de omgevingsfactoren.

De veranderingen in bodemdierengemeenschappen tussen T0_R_2017 en Suplt_2019 gaan gepaard met een afname van de diepte en een toename van de korrelgrootte en van de expositie op de golvenwerking. Tussen Suplt_2019 en Suplt_2021 wijst de verschuiving in de bodemdierengemeenschappen naar de tegenovergestelde richting en dus naar het dieper worden van de locaties samen het fijner worden van het sediment en een vermindering van de golvenwerking intensiteit.

9 Discussie en conclusies

Op basis van de huidige resultaten kunnen de onderzoeksvragen beantwoord worden, zij het met een aantal beperkingen wegens het ontbreken van sommige gegevens:

- Door het gebrek aan een goede T0-meting in het suppletiegebied in het najaar 2017 is er gebruik gemaakt van een reconstructie voor de bodemdierengemeenschappen in het suppletiegebied op basis van 2017-monsters genomen op locaties met zo mogelijk vergelijkbare omgevingsfactoren als de locatie op de zandsuppletie.
- Er was maar één modeluitvoer beschikbaar met stroom- en orbitaalsnelheden beschikbaar. Deze is gebruikt voor alle jaren bij de analyse tussen de bodemdieren en de omgevingsfactoren en ook bij de selectie van de locaties voor de reconstructie (T_{0R}) van de T0 situatie op de zandsuppletie.

De invloed van dergelijke benaderingen blijft moeilijk te kwantificeren en daar zal rekening gehouden moeten worden bij de interpretatie en verder gebruik van de huidige resultaten m.b.t. het effect van de zandsuppletie op de bodemdieren en de relatie tussen deze organismen en hydrodynamica.

Bodemdieren-gemeenschappen in de buitendelta van het Ameland Zeegat vóórdat de suppletie plaats vindt (T=0)

Zoals beschreven door Holzhauer et al (2022) tonen de bodemdieren-gemeenschappen een sterke differentiatie tussen de volgende geomorfologische eenheden in de buitendelta:

- Vlake van Ameland met hoge dichtheden en soortenrijkdom. Er is een evenwichtige taxonomische samenstelling met onder andere de rechtsgestreepte platschelp *Fabulina fabula* en de schelpkokerworm *Lanice conchilega* als typische soorten
- Centraal Bornrif met gemiddelde dichtheden en soortenrijkdom, en vooral gedomineerd door borstelwormen (*Magelona mirabilis*) en schepdieren (*Ensis*).
- Buitenrand van de delta met matige dichtheden en soortenrijkdom en evenwichtige taxonomische samenstelling. Verder gekenmerkt door hoge dichtheden van het kniksprietkreeftje *Bathyporeia elegans*, samen met het vlokreeftje *Pontocrates altamarinus*.
- Geulenranden bij Westgat, de Ebscharen en Akkepollegat met twee verschillende gemeenschappen (cluster 4 en 5), beiden met lage soortenrijkdom en gedomineerd door schaaldieren. Cluster 5 wordt gekenmerkt door hoge dichtheden (vlokreeftjes *Pontocrates altamarinus*, *P. arenarius* en *Haustorius arenarius*, aasgarnaal *Gastrosaccus spinifer* en kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica*). De dichtheden in cluster 4 zijn laag en vooral vertegenwoordigd door het kniksprietkreeftje *Bathyporeia elegans*, samen met het vlokreeftje *Pontocrates altamarinus*.
- In de geulen bij Borndiep Westgat, de Ebscharen en Akkepollegat bevinden zich de laagste dichtheden en soortenrijkdom van alle clusters bestaand uit borstelwormen (*Nephtys cirrosa*) en schaaldieren (*Haustorius arenarius*).

Deze ruimtelijke verdeling van de bodemdieren gemeenschappen in de buitendelta van Ameland-, gecontroleerd door de geomorfologische structuren en de daarmee gepaard sterke gradiënten in hydrodynamische omstandigheden, komt overeen met eerdere observaties in de Noordzeekustzone van Ameland en Schiermonnikoog (Holzhauer et al., 2020) bij de zandmotor (Herman et al. 2021) en langs de Belgische kust (Breine et al. 2018)

Temporele variatie in de bodemdiorgemeenschappen

Waar de ruimtelijke verdeling van de clusters op T0 een duidelijke scheiding van de gemeenschappen tussen de geomorfologische eenheden van de buitendelta toonde, bleek deze structuur zwakker te worden in 2019 met: 1.-Het afsplitsen van de Vlake van Ameland in twee clusters, 2.-het 'verdwijnen' van de buitenrand onder dezelfde clusters als de Vlake van Ameland, 3: Het afsplitsen van Centraal Borndiep in twee clusters ook gevonden op de Vlake van Ameland en op de buitenrand.

Het jaar 2019 werd begin januari gekenmerkt door noordwesterstormen waarbij op Terschelling golven tot 8 m werden gemeten. In combinatie met het spontaan verschuiven van geulen en platen (Elias, 2020) en het aanleg van de zandsuppletie in 2018, kan niet uitgesloten worden dat die stormen

deels verantwoordelijk waren voor grote veranderingen in de bathymetrie en sedimentsamenstelling van het gebied (van Hal et al, 2021). De toename van soorten die ingespeeld zijn op dynamische omstandigheden tussen 2017 en 2019 werd ook toegeschreven door Schellekens & Verduin (2020) aan de grilligheid van het systeem.

In 2021 lijkt het erop dat de ruimtelijke indeling van de bodemdierengemeenschappen in de buitendelta aan het terugschuiven is in de richting van wat het was in 2017, met het weer homogeen worden van de gemeenschappen op de Vlake van Ameland en op Centraal Bornrif. Deze ontwikkeling betekent ook niet een herstel van de situatie van 2017 waar in beide gebieden de dichtheden van schelpdieren sterk afnemen tussen 2019 en 2021.

Effecten van de zandsuppletie op de bodemdierengemeenschappen na 1 en 3 jaar

Ondanks het feit dat er in 2017 niet voldoende bemonsterd is in het suppletiegebied biedt de huidige benadering de gelegenheid om een grove schatting te maken van de vermoedelijke effecten van de zandsuppletie ca 1 en 3 jaar na het aanleg. Deze resultaten mogen slechts beschouwd worden als grove indicaties m.b.t. de mogelijke effecten van de zandsuppletie op de bodemdieren van de buitendelta van Ameland.

De hogere waarden van de mediane korrelgrootte van het sediment in het suppletiegebied in de jaren 2019 en 2021 vergeleken met de waarden gemeten vóór de suppletie op de T0_R-locaties en na de suppletie op de controlelocaties in 2019 en 2021 onderschrijven de validiteit van het huidige BACI-design. De behandeling, hier het aanleg van de suppletie, die getraceerd kan worden op basis van de verhoogde mediane korrelgrootte blijft inderdaad beperkt tot het suppletiegebied waar het controlegebied daarvan bespaard blijft.

De bodemdierengemeenschap reageert ook op de suppletie door een sterke afname in dichtheid en soortenrijkdom in 2019 gevolgd door een toename tot 'referentie niveaus' in 2021. Deze heen-en-weerbeweging naar een verstoorde toestand kort na het aanleg en een begin van herstel 4 jaar later is ook het beeld getoond door de bodemdierensoortensamenstelling waar het jaar 2019 vooral gekenmerkt is door een algemene verarming van de bodemdierengemeenschap met als enige opkomer het kniksprietkreeftje *Bathyporeia pelagica*.

In 2021 worden de typische soorten voor dit gebied (buitenrand delta), namelijk het kniksprietkreeftje *Bathyporeia elegans* samen met het vlokreeftje *Pontocrates altamarinus* weer dominant. De dynamiek waarmee dit herstel blijkt plaats te vinden in het suppletiegebied wijst op het opportunisme van soorten in gebieden die van natuur blootgesteld zijn aan sterke fysieke verstoringen. Dit herstel blijft wel voorlopig beperkt tot de schaaldieren waar schelpdieren in lage dichtheden blijven in 2019 én 2021.

Relatie tussen het voorkomen van de verschillende bodemdierengemeenschappen in de buitendelta van Ameland en de abiotische factoren

De beschikbare abiotische factoren gebruikt in de multivariate analyse (diepte, korrelgrootte, stroom- en orbitaalsnelheid) verklaren 22% van de variantie wat lager is dan het niveau van 38% verkregen door Holzhauer et al (2020) in de analyse van de bodemdieren langs de Noordzeekust van Ameland en Schiermonnikoog.

In die laatste studie werd, naast diepte, helling en sedimentsamenstelling ook gebruik gemaakt van een kleinschalige morfologische kenmerken (zoals ruggen en troggen) wat, volgens Holzhauer et al (2020), het gros van de soortensamenstelling kon verklaren. De afwezigheid van dergelijke kleinschalige descriptoren in de huidige dataset samen met het gebrek aan jaar-waarnemingen voor de hydrodynamische factoren en de interne dynamiek van het systeem (Elias, 2020) draagt vermoedelijk bij aan het lagere percentage dat kan worden verklaard door de omgevingscondities. De soortensamenstelling toont wel een eenduidige relatie met de omgevingsfactoren en bevestigt de rol ervan in de ruimtelijke indeling van de bodemdieren gemeenschappen zoals eerder beschreven door Holzhauer et al. (2022) tussen de geomorfologische eenheden in de buitendelta: Diepe Bornrif met gering invloed van golven en stromingen; ondiepe Centraal Bornrif onder sterk invloed van golven en geulen(randen) met sterk invloed van stromingen in Borndiep Westgat, de Ebscharen en Akkepollegat.

Algemene conclusie

Uit de huidige studie kunnen we concluderen dat de autonome morfologische dynamiek van het systeem zoals beschreven in Elias (2020) samen met de actie van meteorologische factoren sterk bepalend is voor de bodemdierengemeenschappen. Het jaar 2017 waar de ruimtelijke verdeling van de bodemdierengemeenschappen een goede afspiegeling vormt van de geomorfologische deelgebieden (Holzhauer et al., 2022), staat in schril contrast met de jaren 2019 en 2021 waar dergelijke harmonie ver te zoeken is. Een gedeeltelijk herstel lijkt plaats te vinden tussen 2019 maar dat is zeker niet het geval voor de schelpdieren die de dichtheden van 2017 lang niet benaderen. Dergelijke omstandigheden maken het toetsen van de effecten van de suppletie niet eenvoudig des te meer in afwezigheid van een T0 meting. Uit de huidige resultaten blijken schaaldieren, de dominante groep in deze dynamische omgeving, in staat om efficiënt gebruik te maken van de suppletie; waar voorlopig geen uitspraak gemaakt kan worden over de geschiktheid ervan voor schelpdieren.

Aanbeveling

Rekening gehouden met de intensiteit van de hydrodynamica door getijstromen en golven en de daarmee gepaard snelle veranderingen in de morfologie van de buitendelta vraagt een gedegen analyse van de bodemdierengemeenschappen in de buitendelta om (minimaal) jaarlijkse uitdraaien van hydrodynamische modellen (bodemschuifspanning door golven en getijstromen) gekoppeld aan de actuele vaklodingen. De steile gradiënten in dit systeem (ook rondom de suppletie) vragen ook om een fijne ruimtelijke resolutie voor deze modellen.

10 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.

Literatuur

Breine, T.; De Backer, A.; Van Colen, C.; Moens, T.; Hostens, K.; Van Hoey, G. (2018). Structural and functional diversity of soft-bottom macrobenthic communities in the Southern North Sea. *Est., Coast. and Shelf Sci.* 214: 173-184.

Clarke, K.R., Gorley, R.N., Somerfield, P.J., Warwick, R.M. (2014). *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*, 3rd edition. PRIMER-E: Plymouth

Craeymeersch, J.A., Hamerlynck, O., Hostens, K., Vanreusel, A. en Vincx, M. (1990). De ekologische ontwikkeling van de Voordelta. Deelrapport 1. De huidige ekologische situatie van de Voordelta. Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek - Rijksuniversiteit Gent, Sectie Mariene Biologie. 92 pp.

Degraer, S., Wittoeck, J., Appeltans, W., Cooreman, K., Deprez, T., Hillewaert, H., Hostens, K., Mees, J., vanden Berghe, E. en Vincx, M. (2006). *The Macrobenthos Atlas of the Belgian Part of the North Sea*. Brussels, Belgium: Belgian Science Policy.

de Jong, M.F., Baptist, M.J., Lindeboom, H.J., Hoekstra, P. (2015). Relationships between macrozoobenthos and habitat characteristics in an intensively used area of the Dutch coastal zone. *ICES J. Mar. Sci. J. du Cons.* 72, 2409–2422.

Degraer, S., Volckaert, A., Vincx, M. (2003). Macrobenthic zonation patterns along a morphodynamical continuum of macrotidal, low tide bar/rip and ultra-dissipative sandy beaches. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 56, 459–468.

Dunn, J. C. (1974). Well-Separated Clusters and Optimal Fuzzy Partitions. *Journal of Cybernetics* 4 (1): 95–104.

Elias, E., van der Spek, A.J.F., Wang, Z., Pearson, S. (2020). Technisch advies rol en mogelijkheden buitendelta's voor het kustbeheer : ten behoeve van beleidsadvies Kustgenese 2.0. RWS/1220339-009-ZKS-0006.

Escaravage V., van der Heijden L. (2021). Ruimtelijke patronen van het benthos in de buitendelta van de Westerschelde. Een studie i.h.k.v. een mogelijke pilotsuppletie. Wageningen Marine Research rap CO50/21. 53 pp.

van Hal, R., J. Wijsman, L. van den Bogaart en M. J. Baptist (2018) Meetplan 2019 Ameland Zeegat, T1 ecologie buitendelta. Wageningen Marine Research, C108/18, 39 pp.

van Hal R.; Volwater J., Aarts G., Brasseur S., Glorius S. (2021). Ecologische effecten van een pilotsuppletie in het Ameland Zeegat. Wageningen Marine Research, C004/21, 108.

Herman PMJ, Moons JJS, Wijsman JWM, Lijndijk AP and Ysebaert T (2021). A Mega-Nourishment (Sand Motor) Affects Landscape Diversity of Subtidal Benthic Fauna. *Front. Mar. Sci.* 8:643674. doi: 10.3389/fmars.2021.643674

Holzhauser, H. (2017) Meetlocaties benthos, bemonstering van de buitendelta van Ameland in september 2017 voorafgaand aan de proefsuppletie. versie 1.1, rapportage Universiteit Twente. 20 pp.

Holzhauser, H. (2019). Habitatkaart 2019 Ameland Zeegat ihkv benthosbemonstering september 2019. Deltares, 11204720-002-ZKS-0002

Holzhauser, H., B. W. Borsje, J. A. Van Dalfsen, K. M. Wijnberg, S. J. Hulscher en P. M.J. Herman (2020). Benthic species distribution linked to morphological features of a barred coast. *Journal of Marine Science and Engineering* 8: 16

Holzhauser H., B.W. Borsje, P.M.J. Herman, C.A. Schipper, K.M. Wijnberg (2022). The geomorphology of an ebb-tidal-delta linked to benthic species distribution and functionality. *Ocean and Coastal Management* 216

Mulder, J.P.M. (2000). Zandverliezen in het Nederlandse kustsysteem. Advies voor Dynamische Handhaven in de 21e eeuw. RIKZ, rap. 2000.36. 55 pp.

Rasmussen, E. (1973). Systematics and ecology of the Isefjord marine fauna(Denmark). *Ophelia*. 11(1): 1-507

Röell K. (2021). Mapping the spatial and temporal variations in the hydrodynamics for ecological analysis on the Ameland ebb-tidal delta, the Netherlands. Utrecht Universiteit. 81pp.

Rijkswaterstaat, 2020. Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust. 107 pp.
[https://puc.overheid.nl/doc/PUC_635416_31/1]

Schellekens, T., E. Verduin (2020) T-1 monitoring Amelander Zeegat, Rapportage Benthos box corer. Eurofins AquaSense. 86 pp.

Schipper C., van Dalfsen, J. (2017). Meetstrategie T-nulmeting Ecologie Pilotsuppletie Buitendelta Amelander Zeegat (Deel 1), Meetprogramma Ecologie Buitendelta Ameland, Rijkswaterstaat.

Tibshirani T., W. Guenther, T. Hastie (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *J. R. Statist. Soc. B.* **63**-2. 411:423.

van Dalfsen J.A. (2020). Meetplan buitendelta Amelander Zeegat, T2 metingen, Bodemfauna (en vis). Nature Based report. Projectnummer NB2020-002.

van der Wal, D., Lambert, G.I., Ysebaert, T., Plancke, Y.M.G., Herman, P.M.J. (2017). Hydrodynamic conditioning of diversity and functional traits in subtidal estuarine macrozoobenthic communities. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 197, 80–92.

van Hoey, G., Degraer, S., Vincx, M. (2004). Macrobenthic community structure of softbottom sediments at the Belgian Continental Shelf. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 59, 599–613.

Verduin, E., Leewis, L. (2018) T-nulmeting Benthos buitendelta Amelander Zeegat 2017. Rapportage Benthos box corer. Eurofins AquaSense, 49 pp.

Verduin E., Olie, R. (2019). T-1 meting Benthos buitendelta Amelander Zeegat 2019, uitvoeringsplan voor veldwerkzaamheden, rapportage Eurofins AquaSense, 19 pp.

Ysebaert, T., Herman, P.M.J. (2002). Spatial and temporal variation in benthic macrofauna and relationships with environmental variables in an estuarine, intertidal soft-sediment environment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 244, 105–124.

Verantwoording

Rapport C088/22

Projectnummer: 4313100183

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: dr. Ir. JWM Wijsman

Handtekening:



Datum : 20 december 2022

Akkoord: Drs. J. Asjes
Manager Integratie

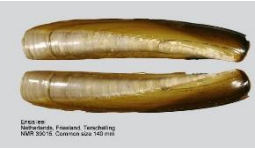






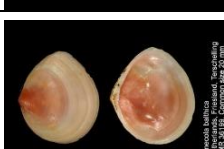



Handtekening:


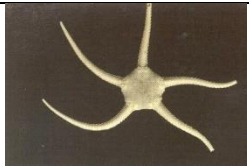










Datum: 20 december 2022

Bijlage 1 Soortenlijst met Latijnse en Nederlandse benamingen en foto

Latijnse naam	Nederlandse naam	Foto*
<i>Abra alba</i>	Witte dunschaal	
<i>Anthozoa</i>	Bloemdier	
<i>Bathyporeia</i>	Kniksprietkreeftje	
<i>Bathyporeia elegans</i>	Kniksprietkreeftje	
<i>Bathyporeia guilliamsoniana</i>	Kniksprietkreeftje	
<i>Carcinus maenas</i>	Strandkrab	
<i>Clitellata</i>	Regenwormachtig	
<i>Diogenes pugilator</i>	Klein heremietkreeftje	
<i>Donax vittatus</i>	Zaagje	
<i>Echinocardium cordatum</i>	Zeeklit	

Latijnse naam	Nederlandse naam	Foto*
<i>Ensis leei</i>	Amerikaanse zwaardschede	
<i>Fabulina fabula</i>	Rechtsgestrepte platschelp	
<i>Gastrosaccus</i>	Aasgarnaal	
<i>Glycera lapidum</i>	Borstelworm	
<i>Heteromastus filiformis</i>	Rode draadworm	
<i>Kurtiella bidentata</i>	Tweetandschelpje	
<i>Lagis</i>	Goudkammetje	
<i>Limecola balthica</i>	Nonnetje	
<i>Liocarcinus navigator</i>	Gewimperde zwemkrab	
<i>Nephtys cirrosa</i>	Zandzagers	
<i>Nephtys hombergii</i>	Zandzagers	

Latijnse naam	Nederlandse naam	Foto*
<i>Ophelia limacina</i>	Borstelworm	
<i>Ophiura albida</i>	Kleine slangster	
<i>Ophiura ophiura</i>	Gewone slangster	
<i>Pagurus bernhardus</i>	Gewone heremietkreeft	
<i>Portumnus latipes</i>	Breedpootkrab	
<i>Spiophanes bombyx</i>	Noordelijke zandkokerworm	
<i>Spisula elliptica</i>	Ovale strandschelp	
<i>Spisula solida</i>	Stevige strandschelp	
<i>Spisula subtruncata</i>	Halfgeknotte strandschelp	
<i>Urothoe poseidonis</i>	Vlokreeftje	

*De foto's in deze tabel zijn geïmporteerd uit WoRMS (marinespecies.org)

Bijlage 2 Soortenlijst met weergave van de codes gebruikt in de analyse

Soortnaam	Soortcode	Soortnaam	Soortcode	Soortnaam	Soortcode	Soortnaam	Soortcode
Abludomelita obtusata	ABLUOBTU	Echinocardium	ECHINOCA	Microtopopus maculatus	MICRMACU	Polynoidae	POLYNOID
Abra alba	ABRAALBA	Echinodermata	ECHINODE	Microphthalmus	MICROPHT	Pontocrates altamarinus	PONTALTA
Alcyonium	ALCYONI	Echinoidea	ECHINOID	Myrianida	MYRIANID	Pontocrates arcticus	PONTARCT
Ampithoe	AMPITHOE	Empty sample	EMPTSAMP	Mysida	MYSIDA	Pontocrates arenarius	PONTAREN
Animalia	ANIMALIA	Ensis	ENSIS	Mytilus edulis	MYTIEDUL	Pontocrates	PONTOCRA
Aora gracilis	AORAGRAC	Eteone	ETEONE	Mytilidae	MYTILIDA	Portumnus latipes	PORTLATI
Aoridae	AORIDAE	Eteoninae	ETEONINA	Nemertea	NEMERTEA	Portunidae	PORTUNID
Arenicola	ARENICOL	Eurydice pulchra	EURYPULC	Neomysis americana	NEOMAMER	Processa modica	PROCMODI
Asbjornsenia pygmaea	ASBJPYGM	Eusyllis blomstrandii	EUSYBLOM	Nephtys assimilis	NEPHASSI	Pseudocumatidae	PSEUDOCU
Astropecten irregularis	ASTRIRRE	Fabulina fabula	FABUFABU	Nephtys caeca	NEPHCAEC	Pygospio elegans	PYGOELEG
Austrominius modestus	AUSTMODE	Gammarus	GAMMARUS	Nephtys cirrosa	NEPHCIRR	Schistomysis	SCHISTOM
Bathyporeia elegans	BATHELEG	Gastropoda	GASTROPO	Nephtys hombergii	NEPHHOMB	Scoloplos armiger	SCOLARMI
Bathyporeia guilliamsoniana	BATHGUIL	Gastrosaccus	GASTROSA	Nephtys longosetosa	NEPHLONG	Scolecipis	SCOLELEP
Bathyporeia nana	BATHNANA	Gastrosaccus spinifer	GASTSPIN	Nephtys	NEPHTYS	Scyphozoa	SCYPHOZO
Bathyporeia pelagica	BATHPELA	Glycera	GLYCERA	Nereididae	NEREIDID	Sigalion	SIGALION
Bathyporeia	BATHYPOR	Haustorius arenarius	HAUSAREN	Nototropis falcatus	NOTOFALC	Sigalion mathildae	SIGAMATH
Bivalvia	BIVALVIA	Hydrozoa	HYDROZOA	Nototropis swammerdamei	NOTOSWAM	Spio	SPIO
Bodotriidae	BODOTRII	Idotea	IDOTEA	Ophelia	OPHELIA	Spiophanes bombyx	SPIOBOMB
Branchiostoma lanceolatum	BRANLANC	Idotea linearis	IDOTLINE	Opheliidae	OPHELIID	Spio decorata	SPIODECO
Bryozoa	BRYOZOA	Kurtiella bidentata	KURTBIDE	Ophiura	OPHIURA	Spio goniocephala	SPIOGONI
Capitella	CAPIELLA	Lagis koreni	LAGIKORE	Owenia	OWENIA	Spio martinensis	SPIOMART
Capitellidae	CAPILDAE	Lanice conchilega	LANICONC	Pagurus bernhardus	PAGUBERN	Spionidae	SPIONIDA
Carcinus maenas	CARMAEN	Leucothoe incisa	LEUCINCI	Paguridae	PAGURIDA	Spisula subtruncata	SPISSUBT
Caridea	CARIDEA	Limecola balthica	LIMEBALT	Paraonis fulgens	PARAFULG	Spisula	SPIsula
Cirratulidae	CIRRATUL	Liocarcinus	LIOCARCH	Paraonidae	PARAONID	Tanaissus lilljeborgi	TANALILL
Corophiidae	COROPHII	Lutricia lutricia	LUTRILUTR	Parasagitta setosa	PARASETO	Tellima ferruginosa	TELLFERR
Corystes cassivelaunus	CORYCASS	Macomangulus tenuis	MACOTENU	Pariambus typicus	PARITYPI	Tellina	TELLINA
Crangon crangon	CRANCRAN	Magelona johnstoni	MAGEJOHN	Perioculodes longimanus	PERILONG	Tellinidae	TELLINID
Crangon	CRANGON	Magelona	MAGELONA	Pharidae	PHARIDAE	Thenaria	THENARIA
Crangonidae	CRANGONI	Magelona mirabilis	MAGEMIRA	Philocheras trispinosus	PHILTRIS	Tryphosa nana	TRYPNANA
Crepidula fornicata	CREPFORM	Malmgrenia	MALMGREN	Phyllococe	PHYLOCOCE	Tryphosella sarsi	TRYPARS
Diastylidae	DIASYLI	Megaluropus agilis	MEGAAGIL	Phyllococidae	PHYLODCD	Tubificoides benedii	TUBIBENE
Diogenes pugilator	DIOGPUGI	Melita	MELITA	Pinnotheres pisum	PINNPISU	Urothoe brevicornis	UROTBREV
Donax vittatus	DONAVITT	Mesopodopsis slabberi	MESOSLAB	Poecilochaetus serpens	POECSERP	Urothoe	UROTHOE
				Polydora cornuta	POLYCORN	Urothoe poseidonis	UROTPOSE

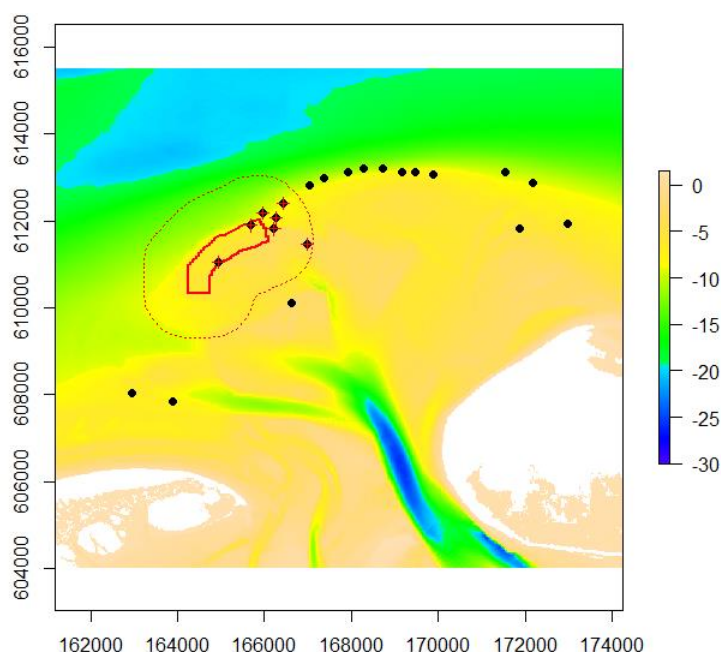
Bijlage 3 Selectie van de locaties voor het toetsen van het effect van de suppletie op de bodemdieren-gemeenschappen 1 (2019) en 3 (2021) jaar na het aanleg

De selectie van de T_{0R}-locaties uit de monsters verzameld in 2017 buiten het suppletiegebied gebeurt vervolgens, voor de vier omgevingsvariabelen, voor waarden van omgevingsvariabelen tussen de 5^{de} en de 95^{ste} percentielen van deze referentiewaarden. Voor de twee hydrodynamische variabelen is wel één overschrijding toegestaan (<5^{de} percentiel dan wel >95^{ste} percentiel) om voldoende locaties in de selectie te krijgen (Tabel 2).

Tabel 2.- Statistische waarden voor de omgevingsvariabelen waargenomen binnen het suppletiegebied in 2018 en gebruikt bij de selectie van de T_{0R} locaties uit de monstercampagne van 2017.

Dataset	Statistiek	Mediaan (µm)	Diepte (m)	Getijstroom (99ste perctl m/s)	Orbitaal stroomsnelheid (m/s)
Suppletie gebied 2018	5 ^{de} percentiel	165.1	6.8	0.73	0.57
	Mediaan	181.2	7.9	0.79	0.64
	95 ^{ste} percentiel	217.0	9.0	0.89	0.70
T _{0R}	5 ^{de} percentiel	172.0	7.0	0.63	0.36
	Mediaan	195.8	8.1	0.83	0.46
	95 ^{ste} percentiel	208.3	8.7	0.89	0.70

De T_{0R}-selectie levert 22 locaties op, met 20 locaties buiten het suppletiegebied en de twee locaties die in 2017 wel in het suppletiegebied bemonsterd waren (Figuur 31).



Figuur 31.-Ruimtelijke verdeling van de T_{0R} locaties (2017) geselecteerd op basis van de waarden van omgevingsvariabelen. Suppletie-gebied binnen de rode doorgetrokken lijn; gebied mogelijk onder direct invloed van het aanleg binnen een gebied van 1000 m rondom het suppletie gebied (rode stippellijn). Alle locaties (7) binnen het invloed gebied (doorgekruist) zijn uitgesloten van de controle selectie voor de jaren 2019 en 2021.

De 15 monsters verzameld op de T_{0R} locaties met uitzondering van de 7 monsters binnen het invloed gebied van het aanleg (1000 m rondom het suppletie gebied, zie Figuur 31 in 2019 ('Ctrl_2019') én in 2021 ('Ctrl_2021')).

Veertien van de tweeëntwintig T0_R-locaties liggen op de buitenrand van de buitendelta, verdeeld tussen de Oostzijde van de suppletie en het Bornrif en twee locaties liggen binnen het suppletiegebied (Figuur 31).

De overige zes locaties liggen verspreid over het gebied met, van West naar Oost, twee locaties ten zuiden van het Westgat, twee aan beide kanten van het Akkepollegat en twee op centraal Bornrif (Figuur 31).

De huidige analyse is opgebouwd volgens een BACI-design (**B**efore en **A**fter waarnemingen in **C**ontrol en **I**mpact gebieden) met een vergelijking tussen:

- T0_R-selectie met 22 monsters verzameld in 2017 ('T0_R_2017'):
- Suppletie met de 21 monsters bemonsterd binnen het suppletiegebied in 2019 ('Suplt_2019') én in 2021 ('Suplt_2021').
- Controle met 15 monsters verzameld in 2019 en 2021 op de locaties uit de T0_R-selectie met uitzondering van de 7 monsters binnen het invloed gebied van het aanleg ('Ctrl_2019', 'Ctrl_2021').

Waar de vergelijking tussen T0_R_2017 en (Suplt_2019, Suplt_2021) informeert over de effecten (Before / After) van de suppletie, laat de vergelijking tussen T0_R_2017 en (Ctrl_2019, Ctrl_2021) toe om, voor dezelfde periode (voor en na het aanleg), autonome ontwikkelingen waar te nemen.

Bijlage 4 Selectie van de soorten om mee te nemen in de analyse op basis van 'soorten_BD_Allyears_mached.xlsx' (Holzhauer, pers.comm)

Samengevoegde taxa	
ScientificName_accepted	samenvoegen als
Echinocardium cordatum	Echinocardium
Ophiura	Ophiura
Ophiura ophiura	Ophiura
Ensis	Ensis
Ensis leei	Ensis
Nemertea	Nemertea
Tubulanus polymorphus	Nemertea
Cirratulidae	Cirratulidae
Bodotriidae	Bodotriidae
Diastylidae	Diastylidae
Pseudocumatidae	Pseudocumatidae
Corophiidae	Corophiidae
Gammarus	Gammarus
Phyllodoce	Phyllodoce

Uitgesloten taxa

Animalia
Tubificoides benedii
Capitellidae
Magelona
Nephtys
Eteoninae
Phyllodocidae
Polynoidae
Sigalion
Eusyllis blomstrandii
Poecilochaetus serpens
Spionidae
Polydora cornuta
Spio
Spio decorata
Spio gonioccephala
Opheliidae
Paraonidae
Austrominius modestus
Ampithoe
Aoridae
Aora gracilis
Nototropis swammerdami
Bathyporeia
Bathyporeia nana
Abludomelita obtusata
Melita
Periculodes longimanus
Pontocrates
Tryphosa nana
Tryphosella sarsi
Urothoe brevicornis
Urothoe

Caridea
Carcinus maenas
Portunus latipes
Corystes cassivelaunus
Crangon
Philocheras trispinosus
Crangonidae
Paguridae
Pagurus bernhardus
Liocarcinus
Liocarcinus holsatus
Liocarcinus navigator
Portunidae
Processa modica
Eurydice pulchra
Idotea
Idotea linearis
Mysida
Gastrosaccus
Mesopodopsis slabberi
Neomysis americana
Tanaissus lilljeborgi
Bryozoa
Conopeum
Conopeum reticulum
Einhornia crustulenta
Electra monostachys
Electra pilosa
Alcyonidium albidum
Arachnidium fibrosum
Hypophorella expansa
Parasagitta setosa
Branchiostoma lanceolatum

Thenaria
Alcyonium
Hydrozoa
Anthoathecata
Hydractiniidae
Leuckartiara octona
Leptothecata
Campanulariidae
Clytia hemisphaerica
Obelia
Obelia bidentata
Eucheilota maculata
Phialella quadrata
Sertulariidae
Sertularia
Scyphozoa
Astropecten irregularis
Echinoidea
Echinodermata
Bivalvia
Pharidae
Tellinidae
Asbjornsenia pygmaea
Tellina
Lutraria lutraria
Spisula
Crepidula fornicata
Gastropoda

Wageningen Marine Research
T: +31 (0)317 48 09 00
E: marine-research@wur.nl
www.wur.nl/marine-research

Bezoekers adres:

- 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.



Wageningen Marine Research is onderdeel van Wageningen University & Research. Wageningen University & Research is het samenwerkingsverband tussen Wageningen University en Stichting Wageningen Research en heeft als **missie**: 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'
