

TANGO – Het inschatten van kantelpunten in de leefbaarheid van Antarctische benthische ecosystemen onder toekomstige klimaatveranderingsscenario's

Het Westelijk Antarctisch Schiereiland (WAP) ondergaat snelle en ingrijpende veranderingen in mariene ecosystemen, die voor een groot deel afhankelijk zijn van ijs. Vooral een toenemende variatie in de duur van het zee-ijsseizoen, versnelde terugtrekking van gletsjers op land, het afbreken van ijskappen, opwarming van het oppervlaktewater en verschuivingen in lokale primaire productiviteit zijn hier een gevolg van. Deze effecten zijn rechtstreeks gelinkt aan klimaatverandering en vormen de kern van het door BELSPO gefinancierde project TANGO (*Estimating Tipping points in habitability of Antarctic benthic ecosystems under GLObal future climate change scenarios*). Binnen dit project onderzochten we hoe kustnabije, ondiepe mariene ecosystemen kunnen veranderen als gevolg van opwarming.

Om de impact van klimaatverandering op kustecosystemen te bestuderen, zowel huidige als toekomstige effecten, maakten we gebruik van een longitudinale gradient. Hierbij werden vijf onderzoekslocaties bestudeerd die gespreid zijn over een afstand van ongeveer 600 kilometer langs het WAP, van zuid naar noord. Deze locaties worden steeds minder afhankelijk van zee-ijs, in het noorden waar de winterse zee-ijsduur korter is, maar ook in de zuidelijke stations waar veranderingen het meest extreem zijn. Op deze locaties voerden we een geïntegreerde ecologische studie uit. Daarbij combineerden we biogeochemische metingen met focus op de koolstofcyclus – van de atmosfeer, door de waterkolom tot in het sediment – met voedselwebanalyse en gedetailleerde habitatkartering.

Het project had drie hoofddoelen: het detecteren van vroege indicaties voor ecologische kantelpunten, het kwantificeren van de impact van klimaatgerelateerde veranderingen in zee-ijs en temperatuur op voedselwebben en koolstofluxen, en het beoordelen van de leefbaarheid en langetermijn-stabiliteit van Antarctische kustecosystemen. We onderzochten de effecten van klimaatverandering op verschillende organisatieniveaus, van individuele organismen en soortinteracties tot processen, functies en hele ecosystemen. De resultaten van het ene niveau dienden steeds als input voor het volgende niveau, waardoor we een holistisch beeld kregen van de dynamiek in deze ecosystemen.

Twee veldcampagnes, TANGO 1 en TANGO 2, vonden plaats aan boord van de RV Australis, een klein en wendbaar schip met een lage ecologische impact. Dit stelde ons in staat om gebieden te bereiken die voorheen niet in kaart waren gebracht en relevant zijn voor dit project. Om een representatieve noord-zuidgradient te bemonsteren, richtten de expedities zich op vijf eilandsystemen: Dodman Island en Blaiklock Island tijdens TANGO 1, en Melchior Island, Hovgaard Island en Føyn Harbor tijdens TANGO 2, respectievelijk in februari-maart 2023 en 2024. De verzameling van stalen en data gebeurde met behulp van ROV-videotransecten met beeldanalyse, sediment- en benthosbemonstering door wetenschappelijke duikers, en zee-ijs- en waterbemonstering vanaf het schip of een kleine zodiac. Daarnaast werden sedimentvallen op verschillende locaties geplaatst. Experimenteel werk vond plaats op locatie of op nabijgelegen Antarctische onderzoeksstations.

In het eerste werkpakket concentreerden we ons op sleutelsoorten om het relatieve belang van omgevingsvariabelen zoals temperatuur en voedselbronnen voor hun fysiologische prestaties te begrijpen. Een belangrijke eerste stap was het aanvullen van referentiedatabanken, wat essentieel is voor moleculaire identificatie van sleutelsoorten, maar ook voor microbiom-analyse en microbieel DNA-onderzoek naar de Antarctische biodiversiteit. Met nieuwe benaderingen wisten we de bestaande schattingen van soortrijkdom met ten minste een grootteorde te verhogen in vergelijking

met traditionele morfologische identificaties. Zo genereerden we 110 nieuwe DNA-barcodes die meerdere sleutelsoorten identificeerden, voornamelijk binnen de taxa Echinodermata, Mollusca, Polychaeta en Crustacea. Onze DNA-barcodinganalyse bracht minstens tien nieuwe soorten aan het licht en detecteerde verschillende gevallen van potentiële cryptische diversiteit.

Een lange termijn-experiment over verschillende generaties onderzocht de fysiologische aanpassingen van de Antarctische sleutelsoort zeester *Odontaster validus*. Uit dit onderzoek bleek dat blootstelling aan hogere temperaturen de populatie niet voorbereidt op opwarming. Integendeel, de nakomelingen van deze adulte zeesterren vertoonden een verminderde overleving, groei en gestagneerde larvale ontwikkeling. Als dergelijke intergenerationele effecten van verhoogde temperaturen veel voorkomen bij verschillende soorten, kan dit wijzen op een grotere verstoring van het ecosysteem dan eerder werd aangenomen. Bovendien bleek dat de darmmicrobiota van sleutelsoorten ruimtelijk varieert, wat een verborgen laag van biodiversiteit toevoegt die cruciaal is voor de veerkracht van de gastheer en hun fysiologische respons vormgeeft. Microben kunnen organismen helpen omgaan met extreme omstandigheden, maar hun rol onder snelle klimaatverandering is nog slecht begrepen.

Het tweede werkpakket richtte zich op de eigenschappen van het voedselweb en de trofische flexibiliteit van sleuteltaxa onder veranderende milieuomstandigheden. Darminhoudsanalyse van enkele abundante benthische taxa toonde een frequent voorkomen van diatomeeën bij meerdere gastheersoorten, wat aansluit bij de gekende ecologische rol van diatomeeën binnen Antarctische voedselwebben. Verschillende soorten stekelhuidigen vertoonden echter ook bewijs van trofische connectiviteit met macroalgen via hun afbraakmateriaal of detritus, ook wel het “bruine voedselweb” genoemd. Daarnaast bleek de diversiteit aan koolstofbronnen die worden gebruikt hoger in rotsachtige habitats dan in zachte sedimentomgevingen, waarschijnlijk door de opname van macroalgen-afgeleide koolstof in rotsachtige gebieden. In sedimentaire habitats lijkt het voedselweb vooral gekoppeld aan de afbraak van organisch materiaal en assimilatie door microfytobenthos.

Ondanks regionale verschillen langs het WAP blijft de verticale trofische structuur grotendeels behouden. Zowel zee-ijsalgen als benthische algen dragen bij aan de koolstofbronnen die door benthische consumenten over verschillende habitats heen worden gebruikt. De diversiteit aan voedselbronnen is daarom ook gekoppeld aan veranderingen in zee-ijsbedekking. Opwarming zal diepgaande effecten hebben op de eigenschappen van het voedselweb, met name op de hoeveelheid, diversiteit en oorsprong van primaire koolstofbronnen. Omdat een toename in biomassa en diversiteit van macroalgen en niet-lineaire veranderingen in planktonische en sympagische productie worden voorspeld, kunnen voedselwebben in zachte-bodemhabitats verschuiven van afhankelijkheid van de primaire productie in de waterkolom naar een sterkere afhankelijkheid van de benthische productie. We observeerden verder dat sommige benthische ongewervelde soorten waarschijnlijk voldoende plastisch zijn in hun dieet om zich aan deze veranderingen aan te passen, terwijl veel soorten dat echter niet zijn. Drastische veranderingen in benthische diversiteit en voedselwebben kunnen daarom in de nabije toekomst optreden.

Een voedselwebmodel in een gebied van gletsjerterugtrekking van zee naar land toonde aan dat het afsmelten van gletsjers niet alleen de totale beschikbaarheid van primair geproduceerde koolstof vermindert. Het systeem wordt minder afhankelijk van autotrofe benthische productie en interne recyclage, en meer afhankelijk van detritus invoer en opportunistische taxa. Dit wijst op een functionele herorganisatie van het benthische voedselweb onder intensievere afsmelting. Naarmate

de gletsjerterugtrekking langs het Antarctisch Schiereiland versnelt, zullen dergelijke verschuivingen waarschijnlijk toenemen, waardoor de structuur van bentische gemeenschappen verandert, de koolstoflux afneemt en de energieuitwisseling in ondiepe Antarctische fjorden wordt gewijzigd.

Het derde werkpakket onderzocht de primaire productie, pelagische export, bentische opslag en koolstofstroom langs de klimaatgradient. Het zee-ijs, dat alleen aanwezig was op de zuidelijke stations, bleek significante concentraties chlorofyl a te bevatten in zogenaamde 'gap layers': poreuze, zeewatergevulde lagen in smeltend zee-ijs die vooral aan het eind van de zomer worden gevonden. In overeenstemming hiermee waren de chlorofylconcentraties in de waterkolom twee tot drie keer hoger in het zuiden, met name op Dodman en Blaiklock Island, dan in het noorden, zoals op Melchior en Hovgaard Island en Føyn Harbor. De aanwezigheid van zee-ijs bleek ook te leiden tot een grotere verticale flux van organisch materiaal naar de zeebodem, wat een duidelijk verschil gaf tussen noordelijke en zuidelijke stations. Deze verschillen in depositiesnelheden hingen echter niet samen met verschillen in bentische mineralisatiesnelheden of sedimenteigenschappen. Totale mineralisatiesnelheden gemeten in de sedimenten waren vooral afhankelijk van de nabijheid van gletsjerafzettingen.

Microfytobenthos speelt een belangrijke rol in de bentische nutriëntenkringloop in deze ondiepe sedimentaire habitats, wat over het algemeen leidt tot een grotere retentie van voedingsstoffen in de zeebodem tijdens perioden van fotosynthetische activiteit. De fijnste sedimenten, het dichtst bij gletsjeruitstromen, vertoonden de hoogste ophopingssnelheden van poriewatermengsels en een indicatie van een gereduceerde omgeving. Op bijna alle stations waren de gemeten methaanfluxen uit het sediment boven het gemiddelde dat eerder rond Antarctica werd gemeten. Waarnemingen van oppervlaktewater, die een geïntegreerd beeld zouden moeten geven van de biogeochemische processen eronder, toonden aan dat de vraag naar opgeloste anorganische koolstof door waterkolom- en bentische primaire producenten ervoor zorgt dat het WAP tijdens Antarctische zomers fungeert als een omgeving waar koolstof bezinkt. De fijnkorrelige aard van de bezochte locaties, waar anoxische mineralisatie naar verwachting de afbraak van organisch materiaal domineert, en de aanwezigheid van broeikasgassen in subglaciale afvoer, maken het WAP ook een seizoensgebonden bron van broeikasgassen zoals methaan en N_2O .

Het vierde werkpakket ging over ecosysteemcomplexiteit en -functioneren op verschillende ruimtelijke schalen langs de klimaatgradient. Macroalgen zijn op verschillende ruimtelijke schalen belangrijk voor de structuur van ondiepe Antarctische bentische gemeenschappen: als indicatoren van zee-ijsomstandigheden, habitatproductiviteit en complexiteit op grote schaal, en als ecosysteemingieurs op kleinere schaal. Bovendien benadrukken onze resultaten het belang van ijsdynamiek voor de samenstelling van bentische gemeenschappen op meerdere ruimtelijke schalen. Uit Bayesian network-analyse gebaseerd op ROV-videotransecten is niet direct duidelijk hoe toekomstige afname in zee-ijsbedekking bentische gemeenschappen zal beïnvloeden, maar we kunnen de statistische afhankelijkheden tussen macroalgen en andere taxa gebruiken om mogelijke indirecte veranderingen in fauna-samenstelling af te leiden als gevolg van veranderingen in macroalgenabundantie. Daarnaast bleken de benthosgemeenschappen niet alleen afhankelijk van omgevingsfactoren, maar ook het gevolg van soortinteracties die in belang kunnen variëren.

Op basis van onze bevindingen formuleerden we enkele specifieke aanbevelingen. De belangrijkste is om de effecten van gletsjerafvoer en sedimentaire broeikasgasemissies verder te onderzoeken om de Antarctische koolstofbudgetten te verfijnen. We bevelen ook aan geïntegreerde beheerplannen te

hanteren die rekening houden met schaalgevoelige kenmerken zoals soortinteracties en habitatcomplexiteit, en die brede klimaateffecten meenemen. Via het Antarctisch Verdrag en het IPCC kunnen onze bevindingen worden geïntegreerd in klimaatmodellen en mitigatiestrategieën.