

Klimaat en de oceaan: Dalend zuurstofgehalte

Gebruiksinfo voor de leerkracht

Dit document omvat een lespakket rond het thema 'Dalend zuurstofgehalte', kaderend binnen de klimaatproblematiek.

- In de sectie '**Eindtermen**' kan je nagaan aan welke eindtermen voldaan worden bij het geven van dit lespakket.
- In de sectie '**Achtergrondinformatie**' kan je je inlezen in het thema. Dit biedt de nodige achtergrond voor de leerkracht om aan de slag te gaan met het thema en kan ook als inleiding dienen voor leerlingen. Onderaan deze sectie vind je ook een aantal betrouwbare en interessante links om verder te lezen, mocht je nog informatie willen.
- De sectie '**Leerkrachteditie**' geeft de volledige ingevulde versie (schuingedrukt) van het document '**Werkbundel**' die er voor de leerlingen is. De werkbundel kan je apart downloaden op de website van PlaneetZee.
- **Videomateriaal** van experimenten is voorhanden op de website.

Klimaat en de oceaan:

Dalend zuurstofgehalte

Eindtermen

Nieuwe eindtermen tweede graad doorstroomfinaliteit – Referentienummer: Cur-20210118-11, Verschenen: 18/01/2021

6.16 De leerlingen interpreteren chemische formules in termen van atomen en moleculen.

6.46 De leerlingen analyseren materie- en energiestromen in een ecosysteem. Met inbegrip van kennis:
- C-cyclus - ecosysteemdiensten - veranderende ecosystemen onder invloed van klimaatsveranderingen.

9.1 De leerlingen situeren personen, plaatsen, patronen en processen op relevante ruimtelijke schaalniveaus. Met inbegrip van kennis
- Fysisch-geografische invalshoek: plaatranden, vulkanen, aardbevingen, Ring of Fire, zeeën, oceanen, continenten, rivieren, meren, gebergten, woestijnen, ijskappen, geologische structuren en lithologische kenmerken, drukgebieden, windsystemen, klimaat- en vegetatiezones, straalstroom, ozonlaag, troposfeer, stratosfeer, mesosfeer

9.5 De leerlingen analyseren ruimtelijke gevolgen van demografische en economische processen op verschillende ruimtelijke schaalniveaus. Met inbegrip van kennis: Milieueffecten: vermesting.

9.6 De leerlingen lichten oorzaken en gevolgen van het versterkt broeikaseffect toe. Met inbegrip van kennis: - broeikasgas – oorzaken van het versterkt broeikaseffect - gevolgen van het versterkt broeikaseffect: Verschuiven van klimaten en verspreidingsgebieden van planten en dieren.

9.9 De leerlingen analyseren klimaatveranderingen in verschillende geologische periodes. Met inbegrip van kennis: - klimaatveranderingen vanaf het begin van het Paleozoïcum - oorzaken van klimaatverandering - broeikaseffect en versterkt broeikaseffect, gevolgen van klimaatveranderingen - maatregelen in verband met het versterkt broeikaseffect

Klimaat en de oceaan: Dalend zuurstofgehalte

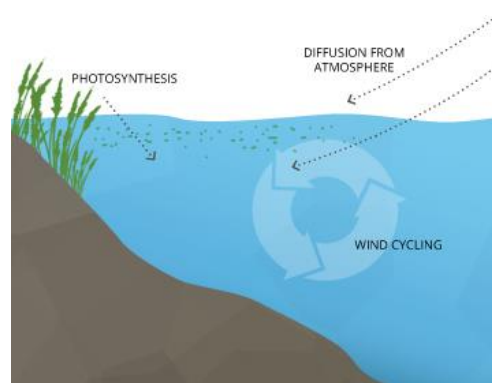
Achtergrondinformatie

Sleutelwoorden: dalend zuurstofgehalte – O₂ – oplosbaarheid gas – stratificatie – densiteit – klimaatregulatie - zuurstofcyclus – zuurstofkringloop – Dode Zones (dead zones) – fytoplankton – atmosfeer – oceaan – hydrosfeer – fotosynthese – biodiversiteit – voedselweb – klimaatverandering – klimaatopwarming – effecten op zeeleven – eutrofiering

Zuurstofgas in de oceaan

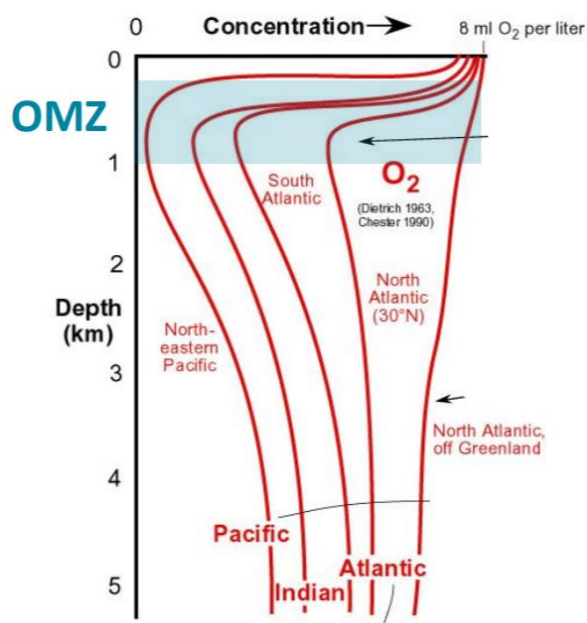
Wanneer we spreken over de longen van de aarde, zeggen we allemaal spontaan: het Amazonewoud! Helemaal volledig is dat plaatje echter niet. Zo'n 50% van de zuurstofproductie op aarde vindt plaats in de oceaan. Naast longen heeft de aarde dus als het ware ook 'kieuwen'. Net zoals groene planten aan land, zorgen bacteriën, zeegras, micro- en macro-algen in zee voor de aanmaak van zuurstofgas. Dit doen ze tijdens de fotosynthese: met behulp van licht zetten ze water en CO₂ om in suikers en – het voor de zuurstofconsumenten zo kostbare – zuurstofgas.

Daarnaast neemt de oceaan aan het oppervlak ook passief zuurstofgas op uit de atmosfeer door middel van diffusie. In diepere oceaanalagen vindt geen aanmaak van zuurstofgas plaats door het ontbreken van zonlicht. Wel zorgen zeestromingen voor de aanvoer van zuurstofrijk oppervlaktewater naar grotere diepte.



Figuur 1. Hoe komt zuurstof in de oceaan terecht? © Fondriest Learning Center

De balans tussen aanvoer (atmosfeer en productie) en verlies (zuurstofverbruik door organismen) bepaalt het zuurstofgehalte. Zoals in elk natuurlijk systeem zijn schommelingen mogelijk, vaak onschuldig en zelfregulerend, zo ook in de oceaan. De verdeling van zuurstofgas is immers niet overal gelijk. Zo zijn er minimale zuurstofzones (OMZ = oxygen minimum zone) die het resultaat zijn van hoog zuurstofverbruik naast een geringe aanvoer. Deze bevinden zich op een diepte tussen 300 en 1200 meter en zou je kunnen vergelijken met woestijnen aan land: een schraal landschap met weinig leven. De soorten die er wél leven, zijn aangepast aan de moeilijke omstandigheden.



Figuur 2. Zuurstofprofiel van de oceaan. OMZ = oxygen minimum zone © Bruce Railsback (UGA)

Daarnaast beïnvloeden ook zeestromingen de hoeveelheid zuurstofgas op een bepaalde diepte. Terwijl aan het wateroppervlak de wind een grote rol speelt, is de relatieve dichtheid of densiteit van het water verantwoordelijk voor stromingen in diepere wateren. Koud water met een hoog zoutgehalte heeft een grotere dichtheid en is bijgevolg zwaarder. Hierdoor zakt het uit de zuurstofrijke bovenste laag naar de bodem, en voorziet hiermee de dieper gelegen lagen van vers zuurstofgas. Omdat de dichtheid van zeewater afhangt van temperatuur en zoutgehalte, verschilt ook de mate van zuurstofhernieuwing in verschillende regio's op aarde.

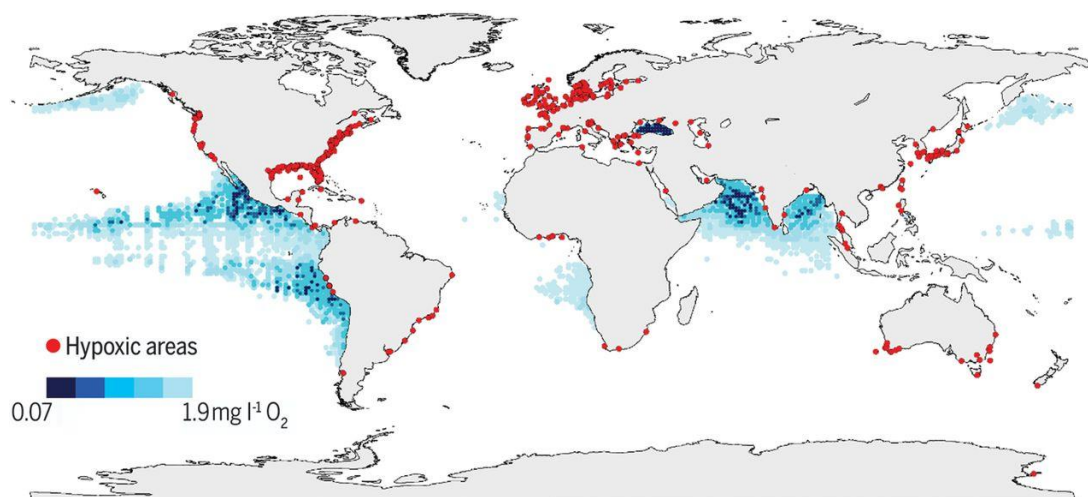
De oceaan in ademnood

Het zuurstofgehalte in de oceaan is over de voorbije vijftig jaar door klimaatwijziging en overbemesting gemiddeld met 2% gedaald. Dit lijkt niet veel, maar 2% komt overeen met zo'n 80 miljard ton zuurstofgas. Deze daling is niet gelijkmatig verdeeld, maar varieert in diepte en over de verschillende zeeën. Op een diepte van 100 tot 300 meter is het grootste effect zichtbaar. De Stille Oceaan is van de vijf oceanbekkens het meest getroffen. Onder druk van de huidige omstandigheden is de reeds bestaande minimum zuurstofzone daar fors uitgebreid, en heeft nu al de grootte van de Europese Unie.

'Dead zones' bevatten nog minder zuurstof dan de minimum zuurstofzones. Ze situeren zich voornamelijk in kustgebieden en zijn te wijten aan de afvloeien van grote hoeveelheden meststoffen (o.a. uit de landbouw), waarover later meer. Ook hier slecht nieuws van de experts: de voorbije 50 jaar zijn de 'dead zones', die dus geen leven ondersteunen, exponentieel in omvang toegenomen.

Toekomstmodellen zijn weinig rooskleurig voor de gezondheid van onze oceaan. Ze kondigen een verdere daling in zuurstofgas aan, ter waarde van min 3-4 % tegen 2100, met het grootste verlies in het bovenste deel van de waterkolom. Een van de zwaarst getroffen gebieden is het noorden van de Golf van Mexico. Deze dode zone strekt zich uit over een oppervlakte van 13.650 km², of ongeveer de helft van het Belgische grondgebied.

Zowat alle leven op aarde en in de oceaan heeft zuurstofgas nodig om te overleven. De minste daling van zuurstofgas in het water is dus iets om ons ernstige zorgen over te maken.



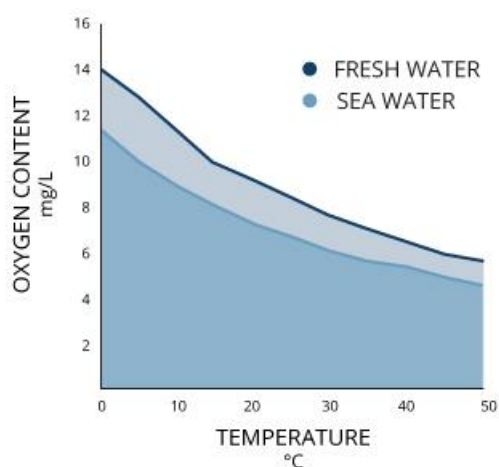
Figuur 3. Dead zones © R. Diaz - Un Intergovernmental Oceanographic Commission GO₂NE

Oorzaken en gevolgen van zuurstofdaling

Wat veroorzaakt nu precies die zuurstofdaling? Allereerst maken we een onderscheid tussen kustwater en de open oceaan. In de open oceaan is de *klimaatopwarming* de belangrijkste oorzaak van het dalend zuurstofgehalte. In kustgebieden is de daling hoofdzakelijk te wijten aan *overbemesting*, vooral dan vanuit de landbouw. Twee verschillende oorzaken met één gemeenschappelijke deler: de mens.

Klimaatopwarming als drijfveer

Drie hoofdredenen bieden zich hier aan. In een opwarmende wereld is zuurstofgas minder oplosbaar, is er een hoger zuurstofgasverbruik door organismen én stratificatie neemt toe.



De oceaan warmt op en dit heeft een rechtstreeks gevolg voor het zuurstofgehalte: simpele thermodynamica leert ons dat warmer water minder zuurstofgas bevat, omdat de oplosbaarheid van gassen daalt bij een hogere temperatuur. Hoe groter de opwarming, hoe lager het zuurstofgehalte in de bovenste laag van de oceaan. Dit verklaart ongeveer de helft van de waargenomen zuurstofdaling.

Figuur 4. Het gehalte aan opgelost zuurstofgas daalt bij een stijgende temperatuur. © Fondriest Learning Center

De hogere watertemperaturen zorgen er dan weer voor dat organismen meer zuurstofgas verbruiken. Door de opwarming stijgt het metabolisme van veel zeedieren, wat leidt tot een toenemende respiratie of zuurstofverbruik. Die hogere nood aan zuurstofgas onttrekt natuurlijk extra zuurstofgas aan de oceaan.

De verminderde productie van zuurstofgas hangt dan weer samen met de toenemende stratificatie (of gelaagdheid) van het water. De klimaatopwarming versterkt die laagvorming. Hoe kan dat een invloed hebben op het aanwezige zuurstofgas? Even opfrissen! De oceaan bestaat uit verschillende lagen, elk met hun eigen densiteit of dichtheid, bepaald door zoutgehalte en temperatuur van het water. Grosso modo kunnen we stellen dat warme, minder zoute lagen bovenaan liggen en koude, zoutere lagen daaronder. Deze dichtheidsverschillen zorgen er voor dat grotere watermassa's elk hun plaats innemen en oceaanstromingen aandrijven. Deze oceaanstromingen zijn niet alleen zeer effectief bij het herverdelen van zuurstofgas en voedingsstoffen op grote schaal, ze kunnen lokaal ook ingrijpende effecten op het klimaat hebben (lees hierover meer in de module '[Oceancirculatie](#)').

We zagen daarnet dat koud en zuurstofrijk (oppervlakte)water zinkt en de diepere lagen van zuurstofgas voorziet. Wanneer een warmere atmosfeer het oceaanooppervlak verder opwarmt, is dit transport niet meer zo vanzelfsprekend. De alsmaar warmere bovenlaag heeft een lagere dichtheid dan het diepere, koude water en blijft beter drijven. Het verschil in dichtheid zorgt voor het ontstaan van twee erg moeilijk mengbare lagen: de uitwisseling van zuurstofgas tussen oppervlak en diepere wateren verloopt moeilijker.

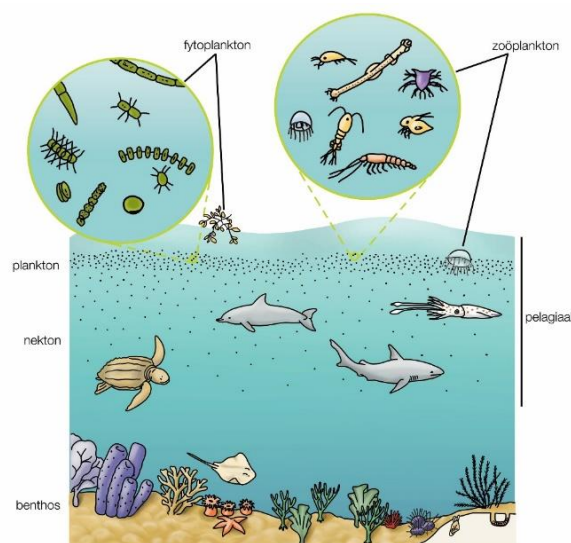
Ook in specifieke gebieden wordt dit effect merkbaar. Opwellingsgebieden langs de kusten ontstaan wanneer een koude zeestroming en een passaatwind elkaar ontmoeten. Warm oppervlaktewater beweegt hier weg van de kust en koud water uit de diepten stijgt op om die plaats in te nemen. Dit koude water is vaak nutriëntenrijk en zorgt voor heel wat leven voor de kusten van Peru, de Golf van Biskaje, Zuid-Afrika en Californië. Ook dit systeem komt op losse schroeven te staan wanneer waterlagen moeilijker mengen, door stijging van de temperatuur. Minder aanvoer van voedingsstoffen uit de diepzee naar de oppervlaktelaag, waar plankton groeit. En minder fytoplankton betekent minder zuurstofproductie.

Het smelten van de ijskappen is nog een factor die stratificatie versterkt en aldus bijdraagt tot een verminderde zuurstofhernieuwing in de diepte. Het zoetwater van de ijskappen bevat namelijk geen zout en heeft dus een lagere dichtheid dan het zoute zeewater. Hierdoor drijft de zoetwaterlaag op het zwaardere zeewater. Opnieuw stellen we vast dat hierdoor de wereldwijde oceaanstroming, inclusief de Golfstroom, verzwakt. Met een cascade aan gevolgen voor het klimaat (lees hierover meer in de module '[Oceaancirculatie](#)').

Stratificatie en fytoplankton

Fytoplankton (plantaardig plankton) speelt een belangrijke rol in de regulatie van ons klimaat. Tijdens de fotosynthese wordt CO₂ opgenomen, tot maar liefst 100 miljoen ton per dag. Wanneer het fytoplankton in de herfst en winter sterft, wordt het overgrote deel van het opgenomen CO₂ teruggegeven aan de atmosfeer, via afbraak door bacteriën. Maar, in zo'n 25% van de gevallen zinkt zo'n algje naar de oceaانبodem en geraakt de koolstof begraven voor duizenden jaren. In dit proces voert plankton dus koolstof af en maakt het 'onschadelijk' voor langere duur, wat gunstig is voor het klimaat.

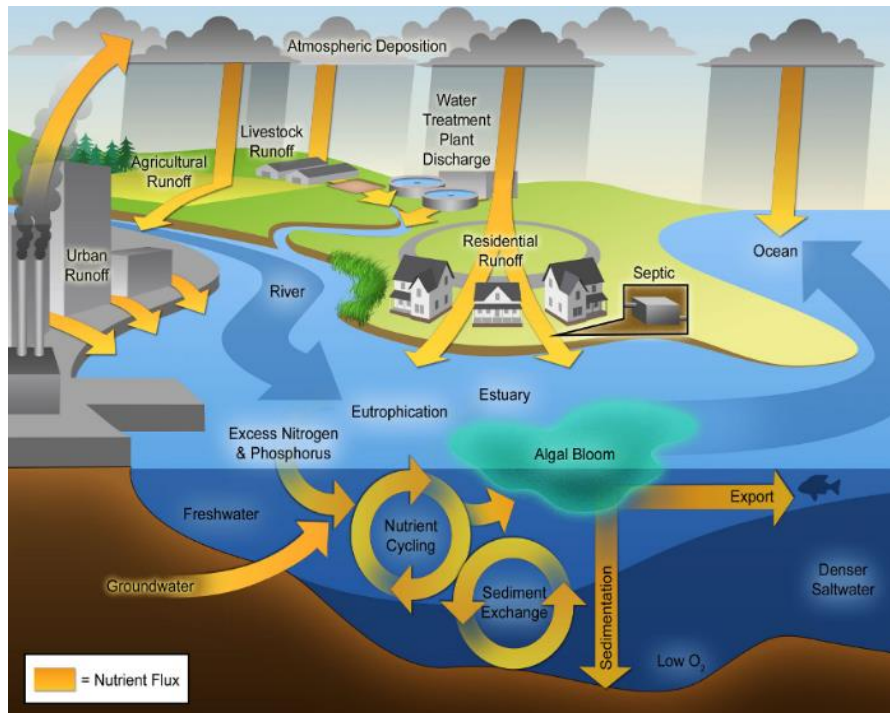
Wanneer het warme oppervlaktewater minder goed mengt met nutriëntenrijk water uit de diepzee, worden nutriënten schaars in de oppervlaktelaag en beperken ze de groei van het fytoplankton. Een achteruitgang van het fytoplankton in de oceaan zorgt dus voor een daling van het fotosyntheseprocess. Enerzijds betekent dit een daling in de zuurstofproductie zelf, anderzijds zorgt het ook voor een verminderde CO₂-opname uit de atmosfeer. Een versterkend effect dus op de huidige klimaatopwarming.



Figuur 5. Plankton is de verzamelnaam voor veelal kleine organismen die passief meedrijven in het water. Bestaat zowel uit heterotrofen ('diertjes', die dus niet aan fotosynthese kunnen doen; i.e. zoöplankton) als uit autotrofen (allerlei fotosynthetiserende algjes; i.e. 'fytoplankton).

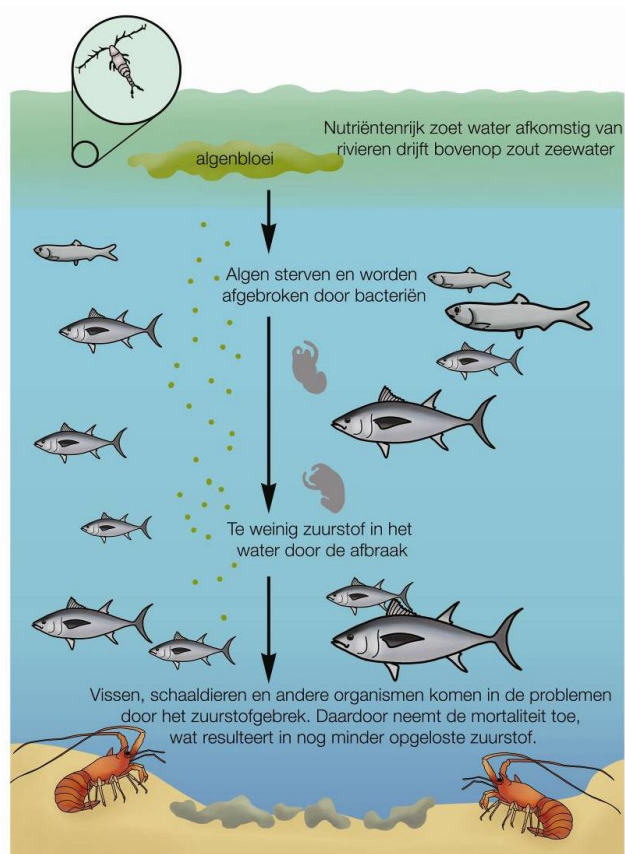
Overbemesting haalt zuurstofwaarden naar beneden

De tweede oorzaak van het dalend zuurstofgehalte, en dan voornamelijk in kustgebieden is overbemesting of eutrofiëring. De toenemende instroom van voedingsstoffen (nutriënten) is de voornaamste oorzaak van het dalend zuurstofgehalte in *kustgebieden*. Voornamelijk overbemesting vanuit de landbouw, met grote hoeveelheden stikstof en fosfor, zorgen voor eutrofiëring.



Figuur 6. Schematische weergave van hoe nutriënten in kustwateren terecht komen en leiden tot eutrofiëring en hypoxie (zuurstofloos) © Dr. Hans W. Paerl

De voedingsstoffen in meststof (die door uitspoeling in de oceaan terechtkomen) zorgen voor een sterke algengroei langs de kust, wat soms tot uiting komt in een groen uitgestrekt tapijt van algen. Wanneer deze algen sterven, zakken ze naar de oceaانبodem, waar bacteriën instaan voor hun afbraak. Die verbruiken veel zuurstofgas zodat zuurstofarme (< 2 mg/l) of zelfs zuurstofloze (0 mg/l) gebieden ontstaan met een verschuiving en/of sterfte van organismen tot gevolg. Ook zij zinken naar de bodem waar de bacteriële afbraak het zuurstoftekort nog verder versterkt.



Figuur 7. Een verhoogde instroom van nutriënten zorgt voor een algenvloei. Wanneer deze afsterven, breken bacteriën die af en gebruiken daarbij veel zuurstofgas. Dit creëert zuurstofarme/zuurstofloze gebieden met massale sterfte tot gevolg.



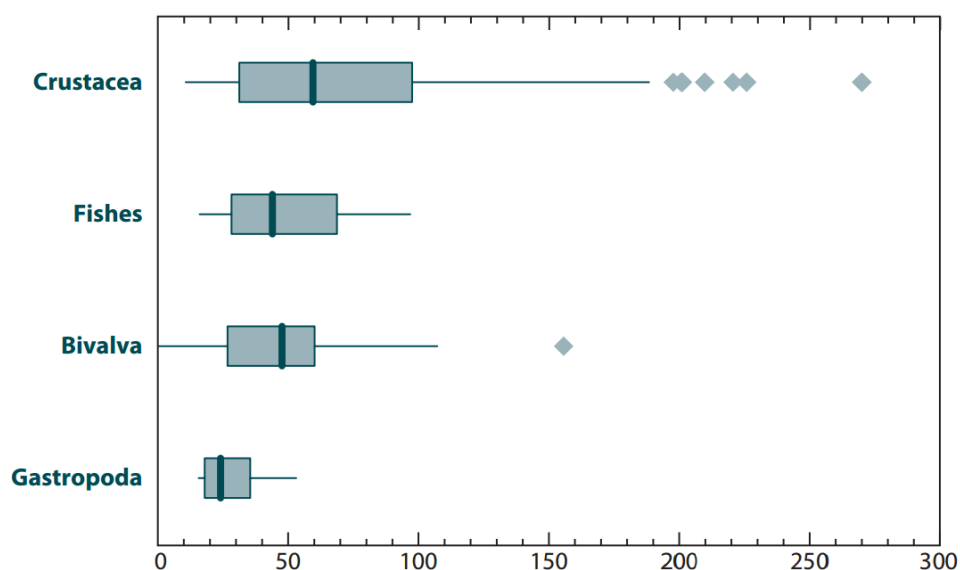
Figuur 8. Blauwgroene algenvloei in de Baltische zee (2018). © ESA/Finnish Environment Institute

Het is niet verwonderlijk dat er een sterke link is tussen menselijke bewoning (populatie-dichtheid) en het opduiken van 'dead zones'. Veel dergelijke zones situeren zich nabij dichtbevolkte gebieden met rivieren. De Golf van Mexico, de Baltische Zee, en de Oost-Chinese zee zijn enkele voorbeelden (zie figuur 3).

Daarnaast zijn er ook nog veel onbekenden. Neerslagpatronen, bijvoorbeeld, blijven niet gespaard van de klimaatopwarming. Hogere temperaturen gaan hand in hand met meer verdamping van water. Deze damp valt uiteindelijk als neerslag op aarde, maar dit gebeurt niet gelijkmatig. Zo is het voor veel klimaatmodellen moeilijk te voorspellen in welke gebieden er meer regenval zal zijn. De modellen zijn het er wel over eens dat korte, hevige regenbuien in de toekomst vaker zullen voorkomen. Deze plotse, intense buien kunnen zorgen voor meer overstromingen en modderstromen, en voor een veranderende toestroom aan voedingsstoffen naar de oceaan. Met mogelijke gevolgen zoals hierboven beschreven..

Gevolgen

De gevolgen van een verminderd zuurstofgehalte in de oceaan zijn vandaag al merkbaar. Zoals hierboven aangehaald wordt er wereldwijd een daling in de fytoplanktonproductie waargenomen. Dit zorgt voor een verminderde zuurstofproductie en een verminderd voedselaanbod voor hogere trofische niveaus aangezien fytoplankton de basis van het voedselweb vormt. Het desastreuze effect van compleet zuurstofloos water ('dead zone') ligt voor de hand. Organismen zijn in wisselende mate afhankelijk van zuurstof. Weekdieren en neteldieren vereisen doorgaans eerder lagere hoeveelheden, terwijl vissen en schaaldieren hogere zuurstofwaarden nodig hebben. Maar dat ze zuurstofgas nodig hebben, staat buiten kijf. Bij ongunstige zuurstofcondities worden ze vatbaarder voor ziektes en planten zich niet of nauwelijks meer voort.



Figuur 9. Letale dosis-mediaan zuurstofgasconcentratie ($\mu\text{mol L}^{-1}$). © Keeling et al. 2010

Wanneer het water zuurstofloos wordt, heeft een zeedier maar weinig keuze: wegtrekken uit de gevaarzone of sterven. Veel vissen kunnen wegzwemmen, maar andere organismen zoals schelpdieren, schaaldieren, jonge vissen en eitjes, overleven dit vaak niet. Recent onderzoek toont aan dat blauwe marlijnen voor de kust van Costa Rica en Guatemala opvallend meer nabij het wateroppervlak bleven

en zelden dieper dan enkele tientallen meters doken. Normaal duiken deze vissen tot bijna een kilometer diepte om hun prooi te achtervolgen. Bleek dat deze predatoren een diepe, gigantische en zich uitbreidende zone met zuurstofarm water ($< 2 \text{ mg/l}$) wilden ontwijken. Ook andere soorten worden vandaag de dag wereldwijd reeds gedwongen in steeds smaller wordende stroken zuurstofrijk oppervlaktewater: tonijn, haaien, haring, kabeljauw, zwaardvis, ...



Figuur 10. Blauwe marlijn, uitgerust met een tracker waarmee onderzoekers zijn jachtgebied in kaart brengen © B. Boyce

Het vermijden van bepaalde gebieden verkleint het leefgebied, waardoor organismen dan weer kwetsbaarder worden voor roofdieren of bevising.

Hoe zeeorganismen de dalende zuurstofhoeveelheden in de oceaan zullen overleven blijft nog maar de vraag. Bepaalde diersoorten zijn ondertussen in staat om te overleven bij lage zuurstofconcentraties. Efficiëntere zuurstofbindende moleculen, een uitbreiding van het kieuwoppervlak of simpelweg een verlaging van het metabolisme: evolutie is een immer doorgaand mechanisme. Toch is het een illusie om te denken dat veel soorten bij een relatief snel verlopende verandering evolutionair zullen kunnen volgen.

Nog andere groepen zijn al behoorlijk aangepast. Veel kwallensoorten zijn bijvoorbeeld tolerant voor lage zuurstofconcentraties. Hierdoor zijn ze vaak in enorme aantallen aanwezig in dode zones. Dit geeft hen de mogelijkheid om de resterende andere soorten weg te concurreren. Diersoorten die op kwallen jagen, zoals tonijn, zijn door het zuurstofgebrek amper aanwezig, waardoor de kwallen vrij spel hebben. Dode zones zullen stilaan als broedplaats voor kwallen dienen, wat economische kosten met zich mee kan brengen (visserij, toerisme).

De zuurstofcrisis spaart dus ook ons niet. Dode zones vormen geen rechtstreekse bedreiging voor onze gezondheid, maar onze verbondenheid met de oceaan maakt ons wel kwetsbaar. De oceaan levert ons veel ecosystemediensten zoals duurzame energie, voedsel, transport, grondstoffen, klimaatbuffer, toerisme, gezondheid, etc. Een ecosysteem is slechts veerkrachtig wanneer het stabiel is. Het dalend zuurstofgehalte in de oceaan is dus veel meer dan een louter ecologisch probleem.

Verder lezen in het Nederlands:

- UNESCO Vlaanderen – Zuurstofarmoede in de oceaan: gevaren en oplossingen.
<https://www.unesco-vlaanderen.be/unesco-in-de-kijker/achtergrond/zuurstofarmoede-in-de-oceaan-gevaren-en-oplossingen>

Verder lezen in het Engels:

- IUCN rapport “Ocean deoxygenation: Everyone’s problem. Causes, impacts, consequences and solutions”
<https://www.unitgraphics.com/deox/IUCNDeoxreportBOOK15-11-2019.pdf>
- Guest post: How global warming is causing ocean oxygen levels to fall
<https://www.carbonbrief.org/guest-post-how-global-warming-is-causing-ocean-oxygen-levels-to-fall>
- Oceans Are Losing Oxygen—and Becoming More Hostile to Life
<https://www.nationalgeographic.com/news/2015/03/150313-oceans-marine-life-climate-change-acidification-oxygen-fish/>
- Declining oxygen in the global ocean and coastal waters
<https://science.sciencemag.org/content/359/6371/eaam7240>
- The ocean is losing its breath
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265196>

Video’s:

- IUCN: A Breathless Ocean. <https://www.youtube.com/watch?v=chp3rtJLtk>
- TED-talk Nancy Rabalais | *The dead zone of the Gulf of Mexico*.
<https://www.youtube.com/watch?v=5zWmdHmJMd0>