

Klimaat en de oceaan:

De koolstofcyclus

Gebruiksinfo voor de leerkracht

Dit document omvat een lespakket rond het thema 'koolstofcyclus'.

- In de sectie '**Leerplannen**' kan je nagaan aan welke leerplandoelstellingen 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 op de Planeet Zee website downloaden.
- **Videomateriaal** van experimenten is voorhanden op de website.

Klimaat en de oceaan:

De koolstofcyclus

Leerplannen

Aardrijkskunde B 2e graad D-finaliteit II-Aar-d D/2021/13.758/005

LPD 1 De leerlingen leggen de klimaatregulering als interactie tussen de biosfeer, atmosfeer, geosfeer, hydrosfeer uit. De rol van de koolstofcyclus, energieomzetting, natuurlijk broeikaseffect.

Leerplan tweede graad secundair onderwijs – GO! – Basisvorming: doorstroom - Leerplannummer: 2021/001

ET NR 9.6 De leerlingen analyseren oorzaken en gevolgen van het versterkt broeikaseffect.

Conceptuele kennis: koolstofcyclus

Klimaat en de oceaan:

De koolstofcyclus

Achtergrondinformatie

Sleutelwoorden: koolstofcyclus – koolstofkringloop – reservoirs – atmosfeer – hydrosfeer – lithosfeer – biosfeer – koolstof – trage koolstofcyclus – snelle koolstofcyclus – chemische verwerking – tektonische activiteit – vulkanisme – fysische pomp – biologische pomp – fotosynthese – respiratie – carbonaatpomp – koolstofsequestratie – verstoring – natuurlijk broeikaseffect – versterkt broeikaseffect – CO₂-uitstoot – fossiele brandstoffen – klimaatmitigatie – klimaatadaptatie

Het belang van het element koolstof

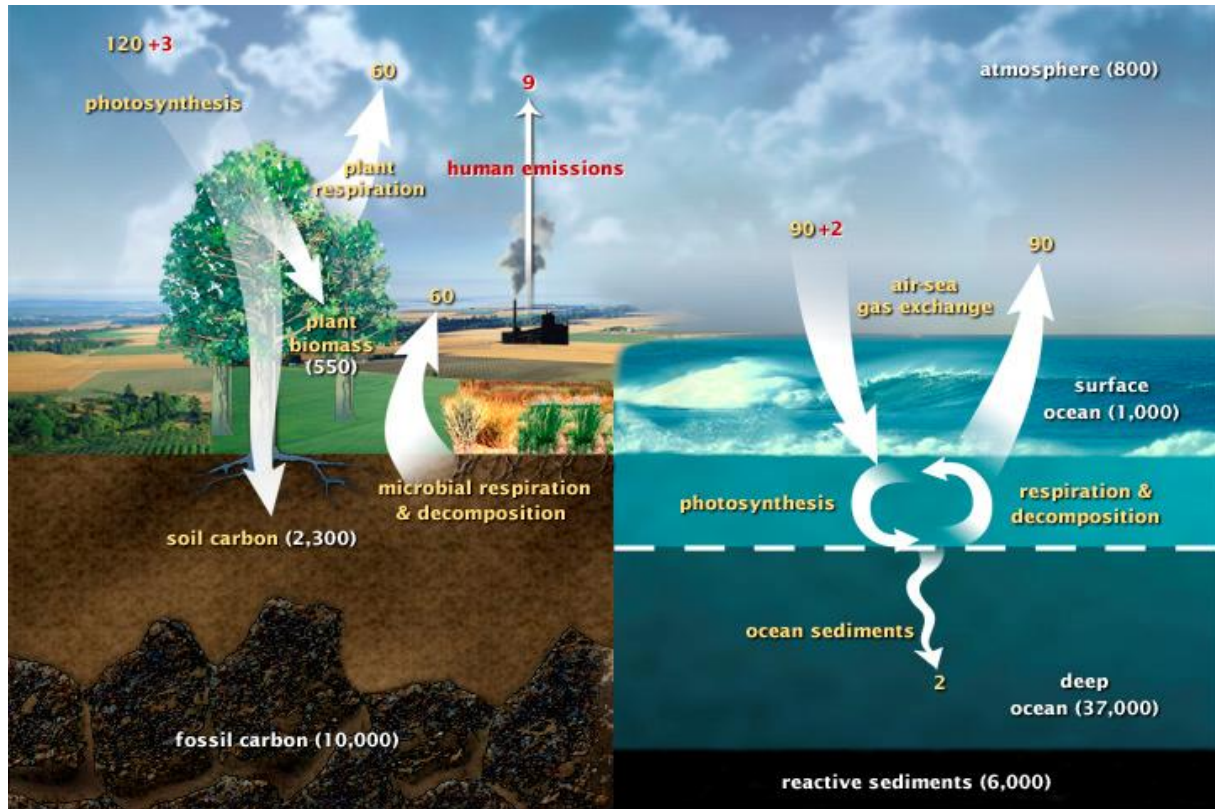
Waarom koolstof (C) zo'n belangrijk element is? Het ligt aan de basis van het leven. Koolstof kan complexe en stabiele koolstofverbindingen vormen zoals koolhydraten en proteïnen die de fundamentele bouwstenen van het leven vormen. Alle levende wezens zijn deels opgebouwd uit koolstof, eten voedsel dat koolstof bevat en hun voornaamste energievoorzieningen draaien op koolstof. In ons zonnestelsel is dit het vierde meest voorkomende element (na waterstof, helium en zuurstof).

De globale koolstofcyclus in een notendop

De koolstofcyclus of koolstofkringloop (Figuur 1) is een biogeochemische kringloop die de processen beschrijft waarin het element koolstof in en rond de aarde circuleert, in verschillende gedaanten (lees: chemische verbindingen). Koolstof tref je aan in vier verschillende *reservoirs*: de atmosfeer (lucht), hydrosfeer (water), lithosfeer (gesteenten) en biosfeer (levende organismen), in verschillende maar quasi constante hoeveelheden. Dat laatste betekent dat de hoeveelheid die vrijkomt uit een reservoir van nature hetzelfde is als de hoeveelheid die opgenomen wordt in dat reservoir.

We onderscheiden een *trage* en een *snelle koolstofcyclus*. De *trage koolstofcyclus* beschrijft hoe koolstof er miljoenen jaren over doet om door middel van chemische en tektonische activiteit zich te verplaatsen van reservoir naar reservoir. De *snelle koolstofcyclus* beschrijft dan weer hoe koolstof zich op veel kortere termijnen door de biosfeer verplaatst door middel van fotosynthese en respiratie. Landplanten, macrowieren en fytoplankton (plantaardig plankton) zijn hier de sleutelfiguren. Bij deze snelle koolstofcyclus doet het element koolstof er geen miljoenen jaren over om te circuleren maar slechts de levensduur van organismen. De uitwisselings- en residentietijden van de reservoirs variëren dus van enkele tot miljoenen jaren.

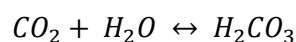
We kunnen het belang van de koolstofcyclus niet onderschatten. Al miljoenen jaren op aarde bepaalt ze mee het klimaat en wordt daarom als een natuurlijke thermostaat gezien. En door verbranding van fossiele brandstoffen, cementproductie en ontbossing oefent de mens een sterke invloed uit op die koolstofcyclus. Hoe? Daar gaan we straks dieper op in.



Figuur 1. Koolstofcyclus. Bron: U.S. Department of Energy Genomic Science program <https://genomicscience.energy.gov>

De trage koolstofcyclus

Tektonische activiteit en chemische reacties zorgen ervoor dat koolstof zich over tientallen tot enkele honderden miljoenen jaren tijd verplaatst tussen de lithosfeer, hydrosfeer en atmosfeer. Koolstof verplaatst zich van de atmosfeer naar de lithosfeer onder andere via neerslag. CO_2 uit de atmosfeer vormt zo met regenwater waterstofcarbonaat (H_2CO_3), een zwak zuur dat rotsen erodeert.



Dit proces heet chemische verwerking (*chemical weathering*). Hierbij komen ionen, zoals Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ en Na^+ vrij die via rivieren naar de oceaan stromen. De calcium- en magnesiumionen die zo in de oceaan terechtkomen, reageren met carbonaationen (CO_3^{2-}) tot calciumcarbonaat of kalk (CaCO_3) en magnesiumcarbonaat (MgCO_3).



Ook andere koolstofhoudende gesteenten vormen zich op de zeebodem. De opeenstapeling van allerlei organisch materiaal en sedimenten veroorzaakt een toenemende druk en temperatuur die de lagen samendrukt tot sedimentair gesteente zoals schalie. Onder specifieke omstandigheden – wanneer dat organisch materiaal sneller ophoopt dan reductanten het kunnen afbreken – vormt zich aardolie en aardgas. Koolstofvormen komen dus vast te zitten in de lithosfeer voor miljoenen jaren. Het vastleggen van koolstof noemen we *koolstofsequestratie*. De lithosfeer vormt het grootste reservoir binnen de koolstofcyclus en is – omwille van de lange residentietijd van het koolstof – ook het meest inactieve.

Na miljoenen jaren keert koolstof terug naar de atmosfeer via tektonische processen en vulkanisme. Bewegende tektonische platen recombineren gesteenten tot silicaatmineralen waarbij CO₂ gevormd wordt. Wanneer een vulkaan uitbarst, komt dit CO₂ opnieuw in de atmosfeer terecht. Koolstofrijke gesteenten verschuiven ook door die bewegende tektonische platen en kunnen door opstuwing opnieuw blootgesteld worden aan de atmosfeer. Chemische verwerking kan dan in werking treden.

De snelle koolstofcyclus

De *snelle koolstofcyclus* beschrijft dan weer hoe koolstof zich over veel kortere termijnen door de biosfeer verplaatst door middel van fotosynthese en respiratie. Landplanten, macrowieren en fytoplankton (als onderdeel van de biosfeer) zijn hier de sleutelfiguren. Bij deze snelle koolstofcyclus doet het element koolstof er geen miljoenen jaren over om te circuleren maar slechts de levensduur van organismen.

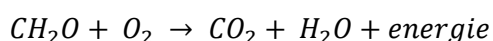
Door aan fotosynthese te doen, nemen planten CO₂ op en fixeren zo koolstof in hun cellen in de vorm van energierijke suikers. Algemeen stellen we:



waarbij CH₂O een suikermolecule voorstelt die bestaat uit koolstof, waterstof en zuurstof in een 1:2:1 verhouding (vaak wordt algemeen glucose, C₆H₁₂O₆ voorgesteld).

Koolstof kan via de biologische pomp en de carbonaatpomp (zie verder) wegzinken naar de diepzee en daar voor langere tijd “onschadelijk” worden gemaakt.

Omgekeerd kan koolstof ook opnieuw in de atmosfeer terechtkomen via de respiratiereactie, de tegenhanger van fotosynthese, wanneer organismen suikers verbranden om aan energie te komen en er terug CO₂ vrijkomt. Ook bij de afbraak van organisch materiaal door bacteriën en schimmels en bij bosbranden komt CO₂ vrij in de atmosfeer. Steeds komt dit op dezelfde chemische reactie neer:



De oceaan binnen de koolstofcyclus

De oceaan vormt het grootste actieve reservoir binnen de koolstofcyclus. Vanuit de koolstofcyclus beschouwd kunnen we de oceaan indelen in twee watermassa's: (1) het oppervlaktewater waar rechtstreekse uitwisseling van CO₂ tussen atmosfeer en oceaan plaatsgrijpt, en waar fytoplankton door fotosynthese CO₂ vastlegt in suikers; en (2) de diepzee, waar door gebrek aan licht geen fotosynthese plaatsvindt en ook de rechtstreekse interactie met de atmosfeer een heel stuk moeilijker ligt.

CO₂-uitwisseling tussen de atmosfeer en het oceaanoppervlak gebeurt door diffusie, warmtestromen, advectie en wind-gedreven circulatie. Oppervlaktestromingen transporteren water (en koolstof) van lage naar hogere breedtegraden waarbij het afkoelt. Omdat kouder water meer CO₂ kan bevatten (dubbel zoveel in water van 1°C versus 20°C), kan hier meer atmosferisch CO₂ het oppervlaktewater 'binnendringen'. Binnen het jaar bereikt die oppervlaktelaag een evenwicht met de atmosfeer.

Eens in de oceaan zijn de CO₂-moleculen een verschillend lot beschoren. Via fysische en biologische processen kunnen ze terug in de atmosfeer terecht komen óf naar de diepzee en oceanobodem getransfereerd worden. Daarbij onderscheiden we een *fysische pomp* en een *biologische pomp* – beide cruciaal binnen de koolstofcyclus.

De fysische pomp

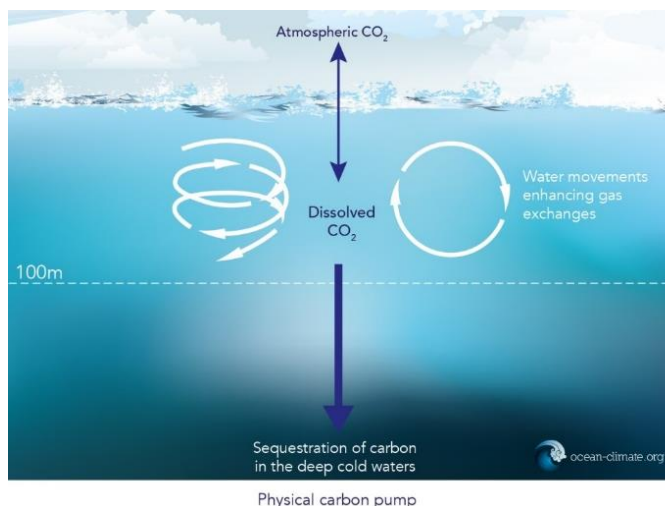
Wind-gedreven oppervlaktestromingen kunnen CO₂ maar moeilijk naar de diepzee transporteren omwille van de gelaagdheid (stratificatie) van de oceaan. De thermohaliene circulatie (waar we dieper op ingaan in de aparte [lesmodule](#) over oceanocirculatie) kan dit wél op specifieke plaatsen in de wereldzeeën en vormt zo een *fysische pomp* (Figuur 2). Het zijn de wind, temperatuur en zoutgehalte die deze oceanostromingen aansturen. In poolgebieden zinkt koud en zwaarder (denser) water naar de zeebodem (diepwatervorming) en neemt zo opgelost koolstof vanuit het oppervlaktewater met zich mee. Eens in dieper water stroomt dit dense water in alle oceanobassins en vervangt er geleidelijk aan 'oud' diepwater, dat uiteindelijk op andere plaatsen weer aan het oppervlak komt via opwelling. De *fysische pomp* onttrekt zo koolstof voor honderden tot duizenden jaren aan de atmosfeer.

De biologische pomp

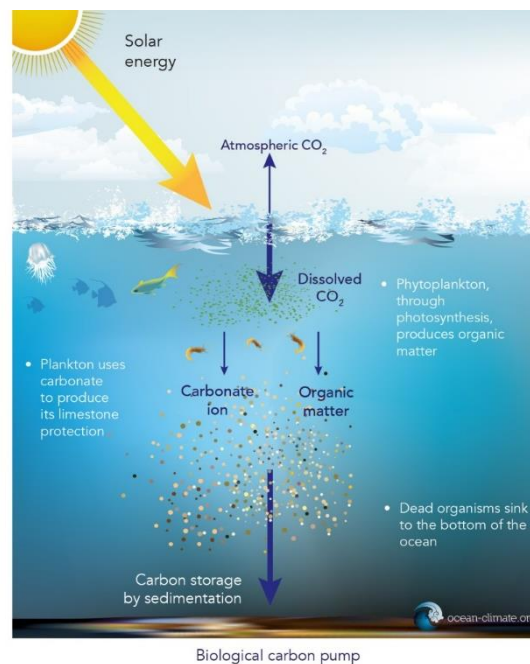
De *biologische pomp* omvat alle processen waarbij levende organismen koolstof naar de diepzee transporteren waar het niet meer uitwisselbaar is met de atmosfeer op korte termijn (Figuur 2). Alles begint bij het fytoplankton dat in de fotische zone, de laag oppervlaktewater waar voldoende zonlicht doordringt, via fotosynthese koolstof vastlegt in de vorm van suikers. Alle leven gaat vroeg of laat dood en een klein deel van die koolstof dwarrelt neer tot op de zeebodem. Dit deel wordt aangevuld met uitwerpselen van planteneters, die zich tegoed hebben gedaan aan datzelfde fytoplankton. Die neerdwarrelende organismen vormen samen met deze uitwerpselen 'zeesneeuw': zinkende koolstofbevattende deeltjes die op hun weg naar de oceanobodem aangroeien tot vlokjes. Dit proces verwijderd koolstof uit het oceaanoppervlak en stelt het ter beschikking in diepere lagen voor remineralisatie (bij afbraak door bacteriën) of consumptie door heterotrofe organismen. Ook verticaal

migrerend zoöplankton (dierlijk plankton) speelt hierbij een rol: deze voeden zich 's nachts in het oppervlaktewater met fytoplankton en keren overdag terug naar de diepzee. Zo nemen ze koolstof uit het oppervlaktewater mee naar de diepzee. De *biologische pomp* transfereert dus CO₂ van het oppervlaktewater naar de diepzee, wat resulteert in een onderverzadiging van CO₂ in dat oppervlaktewater (en een oververzadiging in de diepzee) wat de instroom van CO₂ uit de atmosfeer stimuleert en koolstof voor lange tijd wegstopt in de oceanbodembodem (de lithosfeer).

De *carbonaatpomp* is een onderdeel van de *biologische pomp*. De term slaat op de vorming van kalkskeletten door mariene organismen zoals koralen, oesters, mosselen, zeesterren, kreeftachtigen en sommige fytoplanktonsoorten zoals coccolithoforen. Bij deze organismen vormt zich een skelet van calciumcarbonaat. Na afsterven zinkt dit dichtere calciumcarbonaat naar diepere oceanlagen, zonder dat het onderweg kan geremineeraliseerd worden. Het 'lost enkel op' (splitst opnieuw in ionen) in waters die onderverzadigd zijn aan calciumcarbonaat. Na verloop van tijd worden deze kalkskeletten en sedimenten aan elkaar gecementeerd en vormt zich kalksteen.



Figuur 2. De fysische (links) en biologische pomp (rechts) transporteren CO₂ uit de atmosfeer naar de diepzee. Bron: Ocean and Climate Platform.



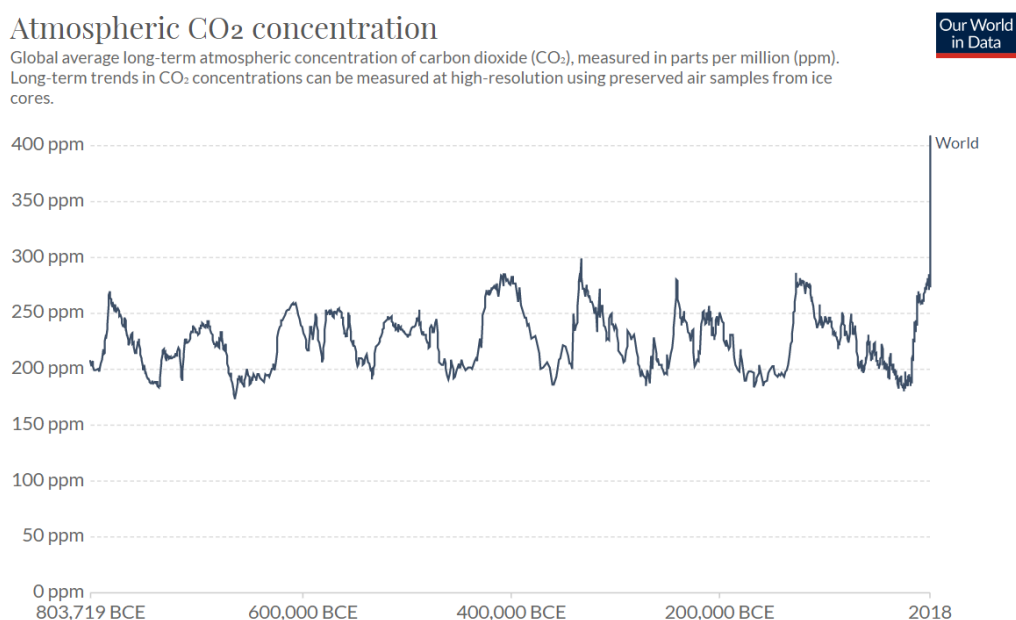
Verstoring van de koolstofcyclus

De totale hoeveelheid koolstof in de koolstofcyclus is constant. Dat betekent dat een verandering die koolstof uit één reservoir haalt, extra koolstof in een ander reservoir brengt. Onder natuurlijke omstandigheden zijn de fluxen van koolstof tussen de verschillende reservoirs (atmosfeer, hydrosfeer, lithosfeer, biosfeer) in een dynamisch evenwicht. Sinds de start van de industriële revolutie echter, verstoort de mens de koolstofcyclus. De verbranding van fossiele brandstoffen zorgt ervoor dat grote hoeveelheden CO₂, die eerder voor miljoenen jaren weggestopt zaten in de lithosfeer, aan een recordtempo in de atmosfeer terechtkomen. En elk jaar stoten we meer CO₂ uit dan het voorgaande jaar. Tussen 2000 en 2011 was er een jaarlijkse toename van 2,0 ppm CO₂ (parts per million, deeltjes

per miljoen). Van 2011 tot 2019 was dit reeds 2,4 ppm. De jaarlijkse uitstoot bedraagt nu 40 gigaton koolstof. Ook ons grondgebruik en met name de ontbossing, verstoort de koolstofcyclus. Bossen moeten op grote schaal plaatsmaken voor landbouw, of hout wordt gerooid voor brandstof of constructie.

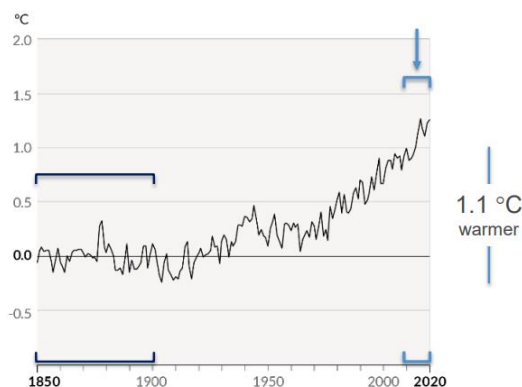
Gevolgen voor onze planeet

De antropogene (of menselijke) verstoring van de koolstofcyclus heeft een invloed op het klimaat. Onder natuurlijke omstandigheden op aarde kenmerken ijstijden en tussenijstijden het klimaat van de laatste twee miljoen jaar. In die periode fluctueerden de CO₂-concentraties in de atmosfeer grofweg tussen 180 en 280 ppm. Ondertussen is die concentratie, onder invloed van de mens, gestegen tot meer dan 400 ppm (Figuur 3).



Figuur 3. Globale CO₂-concentraties uitgedrukt in ppm (parts per million) voor de voorbije >800.000 jaar (BCE = before common era). Bron: NOAA.

De uitstoot van broeikasgassen zorgt voor een klimaatopwarming. Het land en de oceaan absorberen zonne-energie die onze aarde bereikt en stralen dit terug uit onder de vorm van infrarood licht. Broeikasgassen houden de meerderheid van dat infrarode licht vast wat zorgt voor een natuurlijke opwarming. Het *natuurlijk broeikaseffect* zorgt ervoor dat er leven op aarde mogelijk is, dat onze planeet verwarmd wordt tot een comfortabele gemiddelde 15°C. Zonder broeikasgassen zou onze planeet onleefbaar zijn: het meeste water zou bevroren zijn. Het *versterkt broeikaseffect* heeft er echter voor gezorgd dat de gemiddelde temperatuur op aarde sinds 1880 reeds is gestegen met 1,1°C (Figuur 4).



Figuur 4. Veranderingen in globale oppervlaktetemperatuur t.o.v. 1850-1900. Bron: IPCC AR6-rapport.

Het recent gepubliceerde IPCC-rapport (augustus 2021) wordt een ‘code rood voor de mensheid’ genoemd. Hierin stellen klimaatwetenschappers duidelijk dat de klimaatopwarming sneller gaat dan verwacht, nu al wijdverspreid is en intenser wordt. De klimaatverandering wordt ook steeds tastbaarder. Wat houdt dat precies in voor ons en onze planeet?

De oceaan heeft zo’n 25% van het door de mens uitgestoten CO₂ opgenomen en mildert zo de opwarming van ons klimaat. Meer nog, de voorbije 20 jaar neemt de oceaan meer CO₂ op dan ze eerder deed. Maar een oceaan die extra CO₂ opneemt, wordt ook zuurder (zie aparte [lesmodule](#) over oceaanzuurdering). En dit heeft gevolgen voor het verkalkingsproces van kalkhoudende organismen waar we bij de *biologische pomp* over spraken. Het zal hen meer energie kosten om dit skelet aan te maken wat hen ecologisch kwetsbaar maakt.

En natuurlijk zorgt een opwarmende atmosfeer ook voor een opwarmende oceaan met hogere watertemperaturen, smeltend ijs en een zeespiegelstijging tot gevolg (zie aparte [lesmodule](#) over zeespiegelstijging). Die hogere watertemperaturen zorgen er dan weer voor dat heel wat mariene soorten op zoek zijn naar frisser water en noordelijker gaan migreren (zie aparte [lesmodule](#) over soortenverschuiving). En dat warmer water is ook minder in staat om zuurstofgas vast te houden. De oceaan verkeert meer en meer in ademnood (zie aparte [lesmodule](#) over dalend zuurstofgasgehalte).

Het nieuwe IPCC AR6-rapport stelt ook dat extreme hitte en hevige regen intenser zullen worden en vaker zullen voorkomen, dat droogte zal toenemen in bepaalde regio’s en dat bosbranden frequenter zullen voorkomen. Het is dus duidelijk dat de menselijke ingreep in de koolstofcyclus verregaande gevolgen heeft.

In het klimaatakkoord van Parijs (2015) beloofden wereldleiders om de klimaatopwarming beperkt te houden tot ‘ruim onder de twee graden Celsius en liefst tot anderhalve graad’. Die anderhalve graad bereiken we in de komende twintig jaar en tegen 2050 zal onze planeet met 1,6°C opgewarmd zijn. Maar wat daarna komt, hebben we grotendeels zelf in handen. Dat is het goede nieuws. Klimaatwetenschappers benadrukken dat elk tiende van een graad een verschil maakt. Een opwarming van 1,6°C is beter dan een opwarming van 1,7°C. Hoog tijd dus om actie te ondernemen.

De oceaan als bondgenoot bij de klimaatverandering

Het is cruciaal dat de mens zijn CO₂-uitstoot beperkt en overschakelt op een koolstofarme economie. Wist je dat de oceaan een sleutelrol kan spelen in deze strijd? Elk jaar neemt de oceaan zo'n 25% van de door de mens uitgestoten CO₂ op. Maar de oceaan heeft nog heel wat meer troeven, denk maar aan de grote hoeveelheid beschikbare ruimte voor offshore hernieuwbare energie (golven, getijden, stromingen) etc. Deze kunnen we inzetten voor *klimaatmitigatie*: acties die de uitstoot van broeikasgassen inperken. Verschillende van deze klimaatmitigerende benaderingen zijn zelfs realiseerbaar op onze Noordzee.

We moeten natuurlijk realistisch zijn en er rekening mee houden dat als we erin slagen de opwarming van onze planeet te beperken, dat we nog altijd te maken zullen hebben met klimaatstress en schade. *Klimaatmitigatie* kunnen we dus niet loskoppelen van *klimaatadaptatie* zoals kustverdediging (zie aparte [lesmodule](#) over zeespiegelstijging), watervoorziening, hitte resistente maatregelen etc. Het is een uitdaging waar we met zijn allen, hand in hand, aan moeten werken om onze planeet leefbaar te houden voor onze kinderen.

Verder lezen in het Engels:

- Carlson et al. (2001) *In*: Encyclopedia of Ocean Sciences, volume 1, p. 390-400. Carbon cycle.
- Earth Observatory NASA – The carbon cycle.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>
- National Ocean Service NOAA – What is marine snow?
<https://oceanservice.noaa.gov/facts/marinesnow.html>
- Frontiers for young minds – Capturing and reusing CO₂ by converting it to rocks.
<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2020.592018>
- Frontiers for young minds - Protecting our climate by turning CO₂ into stone.
<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2021.579895>
- Frontiers for young minds - Removing harmful greenhouse gases from the air using energy from plants.
<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2015.00014>
- Frontiers for young minds - What is blue carbon and why is it important?
<https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2019.00154>
- Nature. Ocean circulation drove increase in CO₂ uptake.
www.nature.com/articles/542169a
- IPCC AR6 Climate Change 2021
www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport

Video's:

- The carbon cycle. World Meteorological Organization. www.youtube.com/watch?v=U7DbEeBXQBQ
- What is the carbon cycle? Usoceangov. www.youtube.com/watch?v=0-DtXqr-gPQ