

# Klimaat en de oceaan:

## Oceaanverzekering

### Gebruiksinfo voor de leerkracht

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

- 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 op de Planeet Zee website downloaden.
- **Videomateriaal** van experimenten is voorhanden op de website.

## Klimaat en de oceaan:

### Oceaanverzuring

#### Eindtermen

**Huidige eindtermen tweede graad ASO – Referentienummer: Cur-20201013-10,**

**Verschenen: 13/10/2020**

B12 Aan de hand van voorbeelden het belang van biodiversiteit in ecosystemen aantonen.

**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.

6.31 De leerlingen leggen een verband tussen de zuurtegraad van een oplossing en de protonen- en hydroxideconcentraties. Met inbegrip van kennis: pH, onderscheid tussen een zure, een basische en een neutrale oplossing, pH-begrip als zuurtegraad, protonen- en hydroxideconcentratie, pH-schaal.

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

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

9.6 De leerlingen lichten oorzaken en gevolgen van het versterkt broeikaseffect toe. Met inbegrip van kennis: - broeikasgas – koolstofcyclus - oorzaken van het versterkt broeikaseffect - gevolgen van het versterkt broeikaseffect.

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, koolstofcyclus, gevolgen van klimaatveranderingen - maatregelen in verband met het versterkt broeikaseffect

# Klimaat en de oceaan:

## Oceaanverzuring

### Achtergrondinformatie

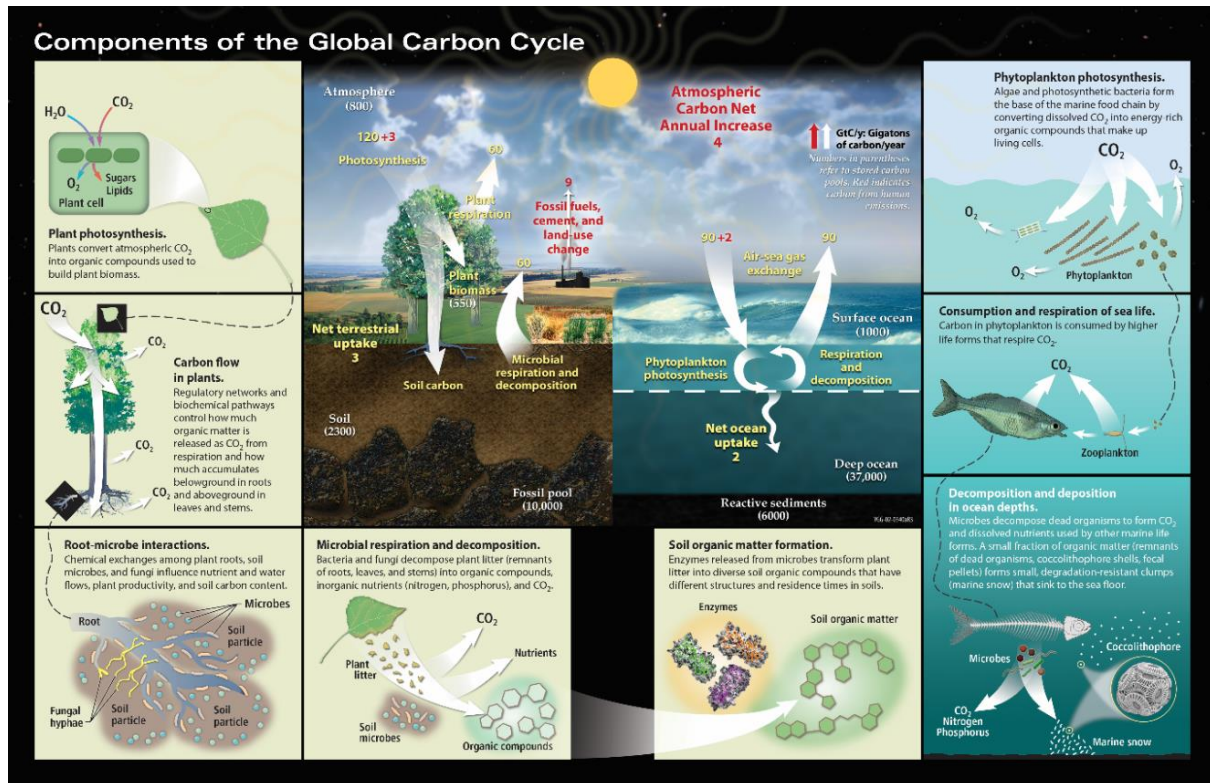
**Sleutelwoorden:** koolstofdioxide – CO<sub>2</sub> – koolstofcyclus – koolstofkringloop – fysische pomp – biologische pomp – atmosfeer – oceaan – hydrosfeer – fossiele brandstoffen – pH – zuurtegraad – verzuring – klimaatopwarming – effecten op zeeleven – kalkskeletten

#### Oceaanverzuring? Wat is dat nu weer?

Door de uitstoot van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer warmt het klimaat op, verplaatsen organismen zich naar koudere gebieden en stijgt de zeespiegel. Maar er is meer. De oceaan zelf heeft er ook onder te lijden. Ze snakt naar adem (zuurstofverlies) en “verkramp”. De verbranding van fossiele brandstoffen zorgt voor een verstoring van de koolstofcyclus en deze leidt tot meer CO<sub>2</sub> in de oceaan, wat de oceaan doet verzuren. Maar laat ons eerst beginnen met de basis van dit alles, de koolstofcyclus.

#### De koolstofcyclus

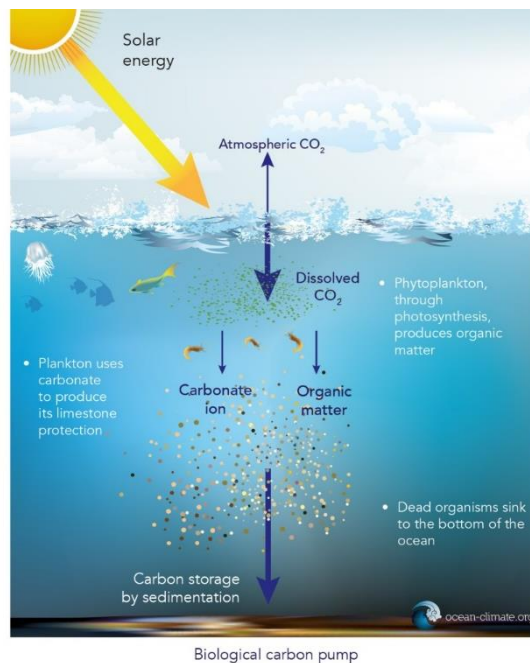
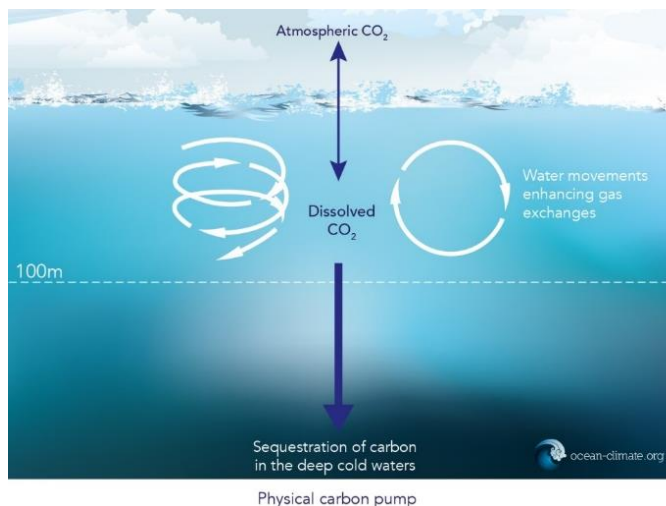
De koolstofcyclus of koolstofkringloop (Figuur 1) is een biogeochemische kringloop die de processen beschrijft waarin het element koolstof in en rond de aarde circuleert, in verschillende gedaanten (lees: chemische verbindingen). Koolstof tref je aan in de atmosfeer (lucht), hydrosfeer (water), lithosfeer (gesteenten) en biosfeer (levende organismen), in quasi constante hoeveelheden. Koolstof is een van de belangrijkste elementen op aarde omdat het aan de basis ligt van het leven.



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

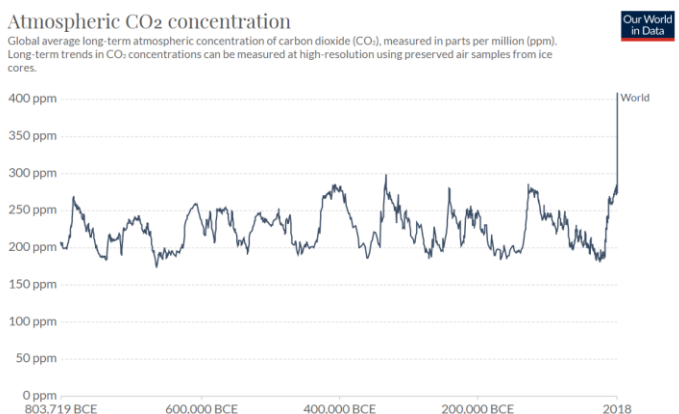
Koolstof in de vorm van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) wordt uitgewisseld tussen de atmosfeer en de oceaan. Zeestromingen en biologische processen transporteren CO<sub>2</sub> naar de diepzee. Deze vormen een fysische en biologische pomp (Figuur 2). De fysische koolstofpomp is het gevolg van oceancirculatie (zie aparte [lesmodule](#)). In poolgebieden zinkt koud en zwaarder (denser) water naar de zeebodem en neemt zo opgelost koolstof vanuit het oppervlaktewater met zich mee. De biologische pomp doet in se hetzelfde. Door aan fotosynthese te doen, neemt plantaardig plankton (fytoplankton) CO<sub>2</sub> op afkomstig uit de atmosfeer. Wanneer dit plankton sterft, dwarrelt het deels neer op de zeebodem en raakt het daar bedolven. Ook ander zeeleven dat sterft en begraven raakt, vormt zo een reservoir voor koolstof. Beide pompen zijn natuurlijke mechanismen die koolstof wegpompen naar diepere regionen.

Onder natuurlijke omstandigheden is de neerwaartse flux van koolstof naar de zeebodem in evenwicht met een omgekeerde opwaartse beweging van CO<sub>2</sub> via stromingen en upwelling naar het oppervlaktewater en vervolgens tot in de atmosfeer. Daarnaast komt koolstof ook via vulkanische activiteit uit de bodem opnieuw terecht in de atmosfeer. Een systeem dat lange tijd in evenwicht was en bepalend voor het klimaat op aarde.



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

Sinds de start van de industriële revolutie oefent de mens een sterke invloed uit op het klimaat door de verbranding van fossiele brandstoffen, door cementproductie en door ontbossing. Grote hoeveelheden CO<sub>2</sub>, die eerder voor miljoenen jaren weggestopt zaten in de lithosfeer, komen zo in een recordtempo in de atmosfeer terecht. De snelheid van de huidige CO<sub>2</sub>-stijging ligt honderdmaal hoger dan de natuurlijke stijging bij de overgang van een ijstijd naar een tussenijstijd. De concentraties aan CO<sub>2</sub> in de atmosfeer fluctueerden over de voorbije honderdduizenden jaren grofweg tussen de 180 en 280 ppm (parts per million, deeltjes per miljoen). De laatste 150 jaar is die concentratie gestegen tot meer dan 400 ppm, een concentratie die veel hoger ligt dan wat het natuurlijke klimaat over meer dan 800.000 jaar kende (Figuur 3). In de atmosfeer zorgt dit broeikasgas voor de ons wel bekende opwarming van het klimaat.

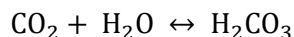


Figuur 3. Globale CO<sub>2</sub>-concentraties uitgedrukt in ppm (parts per million) doorheen de tijd (BCE = before common era). Bron: NOAA.

De oceaan heeft de voorbije 200 jaar ongeveer de helft van de door de mens uitgestoten CO<sub>2</sub> geabsorbeerd en mildert zo de opwarming van ons klimaat. Dat klinkt als goed nieuws, niet? Maar zoals eerder aangehaald, wordt een oceaan die extra CO<sub>2</sub> opneemt ook zuurder.

## Maak kennis met oceaanverzuring

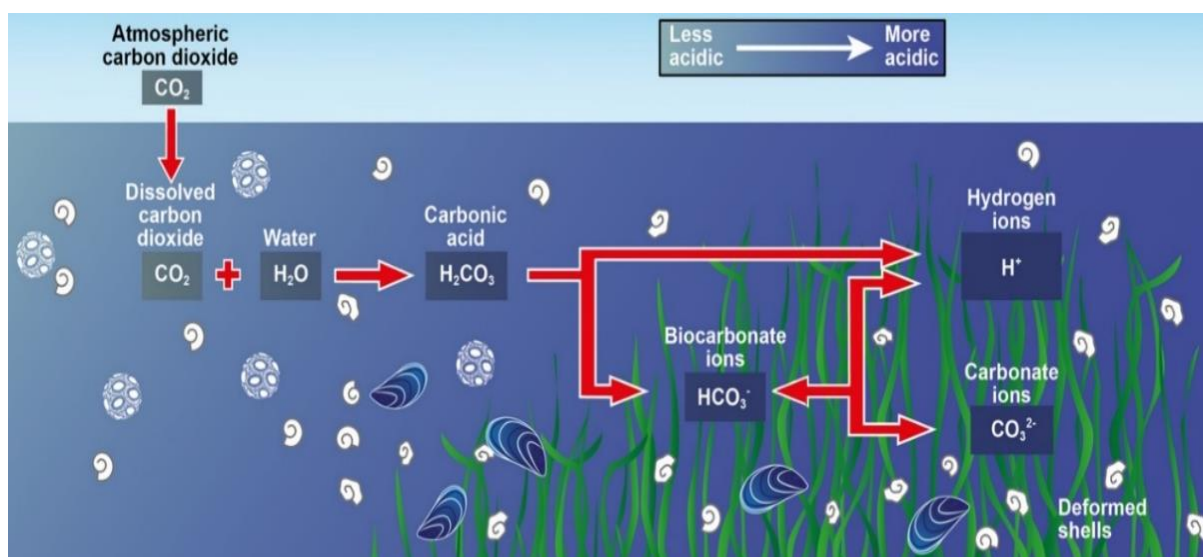
We bekijken dit eerst even chemisch (Figuur 4). In de atmosfeer is  $\text{CO}_2$  een chemisch inert gas, maar wanneer het oplost in zeewater, reageert het met watermoleculen en vormt zo waterstofcarbonaat ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ).



Dit zwakke zuur staat waterstofionen ( $\text{H}^+$ ) af (dissocieert) en vormt zo andere types opgelost anorganisch koolstof. Zo vormt er bicarbonaat ( $\text{HCO}_3^-$ ) en carbonaat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).



De chemische samenstelling van de oceaan verandert dus. Onder de huidige omstandigheden is bicarbonaat ( $\text{HCO}_3^-$ ) het meest voorhanden, gevolgd door carbonaat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) en dan opgelost  $\text{CO}_2$ .



Figuur 4. Oceaanverzuring: chemisch uitgelegd. Bron: Plymouth Marine Laboratory.

De chemische reacties tonen aan dat  $\text{CO}_2$ -opname vanuit de atmosfeer zorgt voor een hogere concentratie aan waterstofionen ( $\text{H}^+$ ) in de oceaan. Hoe hoger die concentratie, hoe lager de pH van een systeem (zie kaderstuk, Figuur 5 en 6). We krijgen met andere woorden een daling van de pH of een verzuring van de oceaan.

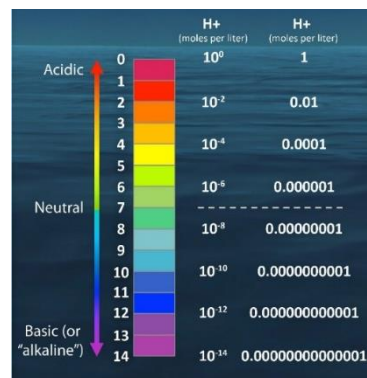
De pH-waarde is niet overal gelijk in de oceaan, deze schommelt in ruimte en tijd. De pH van de oceaan is nu gemiddeld 8,1 maar is sinds de start van de industriële revolutie globaal gezien met 0,11 eenheden gedaald. Dit lijkt misschien een kleine daling, maar vergis je niet, want pH wordt gemeten op een logaritmische schaal.

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$$

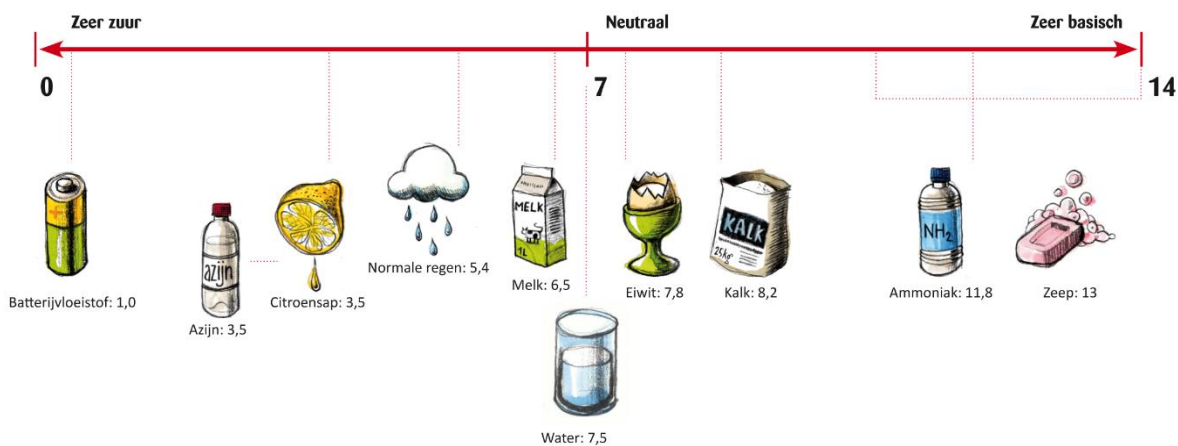
Een daling van één eenheid komt op een logaritmische schaal overeen met een vertienvoudiging van de concentratie aan waterstofionen. Die pH-daling van 0,11 eenheden staat dus voor een stijging van de concentratie aan waterstofionen van 30%!

### pH in klare taal

pH is een maat voor de concentratie aan waterstofionen in een oplossing (Figuur 5). De schaal loopt van 0 tot 14 waarbij 7 neutraal is, waarden kleiner dan 7 zuur en waarden groter dan 7 basisch of alkalisch (Figuur 6) zijn. Hoe groter de concentratie aan waterstofionen, hoe lager de pH, hoe zuurder de oplossing. Omgekeerd: hoe lager de concentratie aan waterstofionen, hoe hoger de pH en hoe basischer de oplossing.



Figuur 5. pH-schaal met concentratie aan waterstofionen (mol/liter). Bron: NOAA.



Figuur 6. pH-schaal van 0 t.e.m. 14, geïllustreerd met voorbeelden van producten uit het dagelijkse leven.

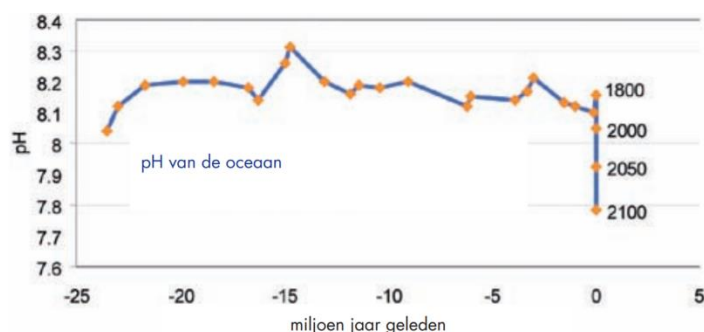
### Moeten we ons zorgen maken om die kleine pH-daling?

Helaas is het antwoord van wetenschappers volmondig: "Ja".

Heel wat organismen zijn gevoelig aan kleine schommelingen in pH. Laat ons gewoon nog maar eens kijken naar onszelf. De pH van ons slagaderlijk bloed schommelt tussen de 7,35 en 7,45. Wanneer die ondergrens overschreden wordt (een verzuring dus), kan dit ernstige gezondheidsproblemen veroorzaken, zoals hartritme stoornissen. Ook heel wat mariene organismen zijn gevoelig voor directe en indirecte gevolgen van een zuurder wordende oceaan.

De huidige snelheid van oceaanverzuring is tienmaal sneller dan wat de oceaan kende gedurende de voorbije 55 miljoen jaar. Wanneer de menselijke CO<sub>2</sub>-uitstoot de huidige trends blijft volgen, verwachten wetenschappers een pH-daling met 0,5 eenheden tegen 2100 (Figuur 7). Ofwel een verdrievoudiging van de waterstofionen in vergelijking met pre-industriële condities. Die pH-daling zou honderdmaal groter zijn dan natuurlijke dalingen en de pH zou lager zijn dan wat de oceaan gekend heeft voor miljoenen jaren. Bijkomend probleem is dat verzuring quasi onomkeerbaar is. Bij een beter

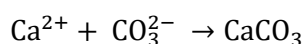
beheer zal het nog tienduizenden jaren duren vooraleer de oceaan weer een zuurtegraad heeft bereikt die vergelijkbaar is met pre-industriële condities.



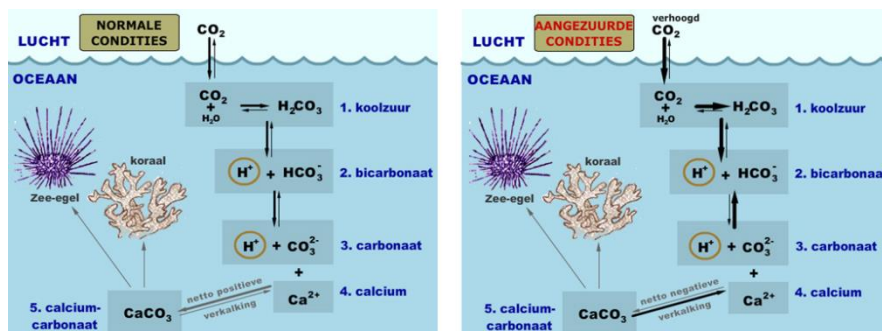
Figuur 7. Zuurtegraad of pH van de oceaan over de voorbije >20 miljoen jaar, inclusief voorspellingen tot 2100.

### Gevolgen van de verzuring

De directe en indirecte gevolgen van die verzuring begrijpen in een complex systeem zoals de oceaan, is uitdagend. Er zijn wel al onomstotelijke aanwijzingen dat verzuring het verkalkingsproces van levende organismen beïnvloedt. Coccolithoforen, koralen, schelpdieren (oesters, mosselen,...), inktvissen, enz. gebruiken calcium- en carbonaationen om hun skelet van calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>) te vormen.



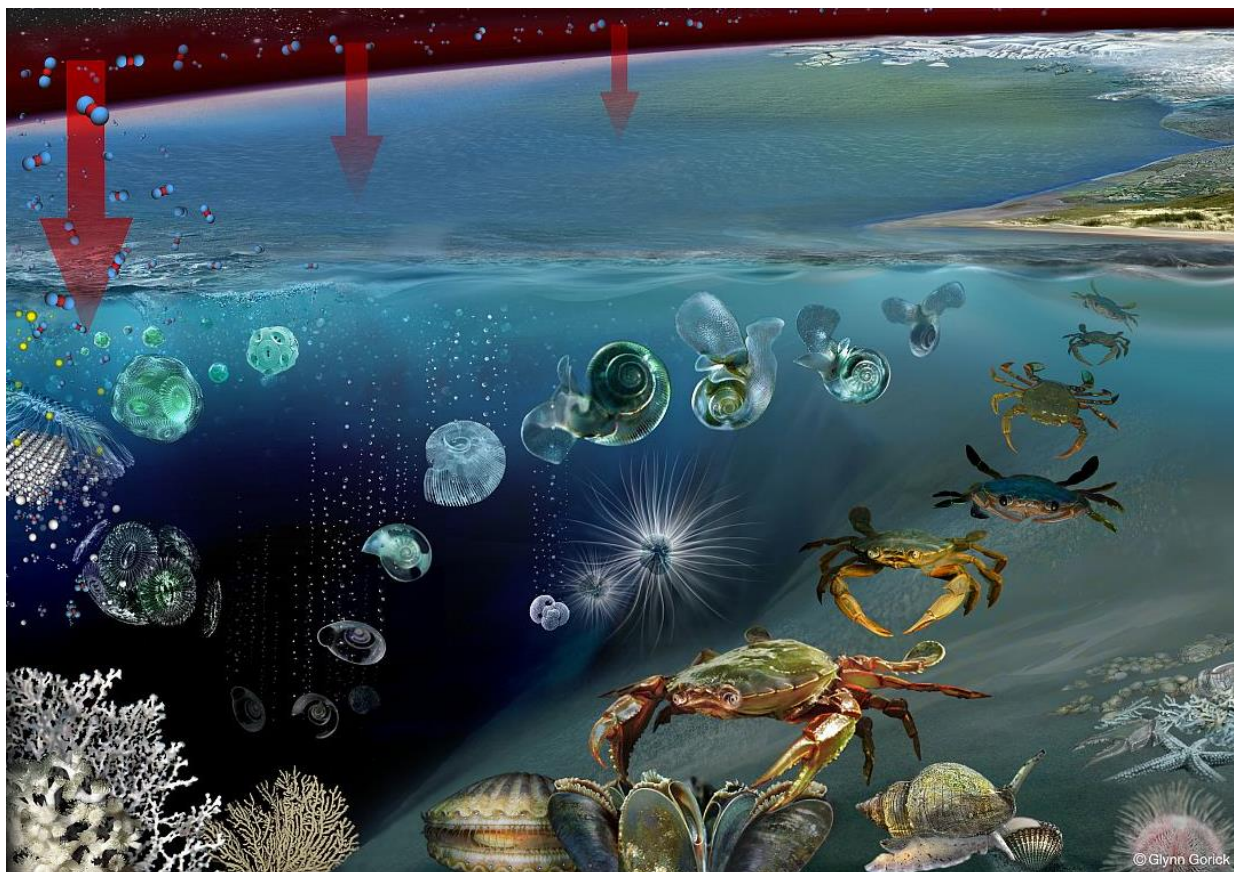
De extra waterstofionen die zijn vrijgekomen bij de reactie van CO<sub>2</sub> tot H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, binden met die carbonaationen waardoor zeedieren minder carbonaat beschikbaar hebben voor hun skeletopbouw (Figuur 8).



Figuur 8. Onder aangezuurde condities (rechts) reageert er meer carbonaat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) tot bicarbonaat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) waardoor het minder beschikbaar is om met Ca<sup>2+</sup> calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>) te vormen. Dit is een probleem voor zeedieren die een kalkskelet vormen.

Veel dieren zijn in beperkte mate in staat om de vorming van calciumcarbonaat te stimuleren bij een pH die lager ligt dan hun optimum. Dat kost hen echter wel energie, wat hen ecologisch kwetsbaar maakt. Een verdere verzuring lost kalkskeletten zelfs op (Figuur 9). Vleugelslakken of ‘zeevlinders’ zijn een indicatorsoort voor verzuring. Wanneer deze in zeewater geplaatst worden met een pH van 7,6 (voorspelde pH-waarde 2100), lossen de schelpen op binnen 45 dagen. Calciumcarbonaat lost op in water wanneer het water te lage concentraties carbonaat bevat (wanneer het water dus niet verzadigd of gesatureerd is). Een sombere toekomst voor deze dieren die een belangrijk deel uitmaken van het voedselweb.





Figuur 9. Mariene organismen zoals koralen, coccolithoforen, vleugelslakken, schelpdieren en krabben kunnen moeilijker hun kalkskeletten vormen in een zuurdere oceaan. Bron: Glynn Gorick.

En dat zal de mens ook voelen. Ook wij zullen niet gespaard blijven van de gevolgen. Denk maar aan aquacultuur en visserij. Oesterkwekers aan de Amerikaanse kusten ondervinden vandaag de dag al dat hun oesterlarven heel gevoelig zijn aan de pH van het water (Figuur 10). De kwekerijen pompen zeewater op en moeten de pH nauwlettend meten en bijstellen omdat bij een te lage pH de schelpen onvoldoende groeien en de oesters ongeschikt zijn voor verkoop.



Figuur 10. De oesterteelt aan de Amerikaanse kust vraagt om constante metingen van de zuurtegraad van het water.

In de aquacultuur kan de mens nog enigszins ingrijpen. De visserijsector kan dat natuurlijk niet. Zeker voor koraalriffen en velen die ervan afhankelijk zijn, kunnen de gevolgen desastreus zijn. Koraalriffen kennen een enorme biodiversiteit (denk aan de films *Finding Nemo* en *Finding Dory*), bieden voedsel, zorgen voor bescherming van het achterliggende land tegen stormen en tegen erosie, creëren heel wat werkgelegenheid en ecotoerisme. Er zijn dus heel wat ecosystemediensten gelinkt aan koraalriffen. En deze dreigen zwaar onder druk te komen van oceaanverzuring.

## Gevolgen waar je niet meteen zou aan denken

De gevolgen voor kalkvormende organismen zijn één ding. Maar wist je dat er nog heel wat andere gevolgen zijn die veel minder voor de hand liggen?

De overleving van veel zeedieren hangt af van hoe succesvol de larven zijn in het vinden van een geschikt habitat om zich te vestigen. Clownvissen bijvoorbeeld gebruiken hun reukvermogen om als larve vanuit de open oceaan een geschikt rif en zeeanemoon te vinden. Ze pikken moleculen op die andere vissen en zeeanemonen afgeven. Experimenten tonen aan dat larven bij een pH van 7,6 aangetrokken worden door geuren die ze in normale omstandigheden net vermijden. Bij een verdere pH-daling reageren ze zelfs niet meer op geurprikkelers. Deze vissen zullen dus veel moeilijker een geschikt habitat, een geschikte thuis, vinden in een verzurende oceaan.

Natuurlijk zijn er ook zeeorganismen die zich wel zullen kunnen aanpassen en uit de verslechterende omstandigheden zelfs een competitief voordeel kunnen halen. Dat tonen althans experimenten met Californische zee-egels aan. Het is echter onwaarschijnlijk dat de verzuring de biodiversiteit ten goede zal komen. Tevens vormt oceaanverzuring een stressfactor bovenop overbevissing, vervuiling, opwarming en zuurstofdaling. Tijd om in actie te schieten en onze CO<sub>2</sub>-uitstoot drastisch te doen dalen.

### Verder lezen in het Nederlands:

- Testerep Magazine. Ines Tavernier. Broeikasgassen en de zee, meten is weten. [www.vliz.be/testerep/nl/2021-01-broeikasgassen-en-de-zee-meten-is-weten](http://www.vliz.be/testerep/nl/2021-01-broeikasgassen-en-de-zee-meten-is-weten)
- Global Change Ecology. Eric Struyf. 136 jaar later: unieke studie toont gevolgen van oceaanverzuring. <https://globalchangeecology.blog/2020/03/02/136-jaar-later-unieke-studie-toont-gevolgen-van-oceaanverzuring/>

### Verder lezen in het Engels:

- NOAA. What is ocean acidification? [www.pmel.noaa.gov/co2/story/What+is+Ocean+Acidification%3F](http://www.pmel.noaa.gov/co2/story/What+is+Ocean+Acidification%3F)
- National Geographic. Ed Yong. Losing Nemo – acid oceans prevent baby clownfish from finding home. [www.nationalgeographic.com/science/article/losing-nemo-acid-oceans-prevent-baby-clownfish-from-finding-home](http://www.nationalgeographic.com/science/article/losing-nemo-acid-oceans-prevent-baby-clownfish-from-finding-home)
- Ocean acidification: bringing information on ocean acidification to scientists, policymakers and the public. <http://ocean-acidification.net/>

### Video's:

- ACE Science Short: Ocean Acidification. [www.youtube.com/watch?v=6SMWGV-DBnk](http://www.youtube.com/watch?v=6SMWGV-DBnk)