

## Samenvatting

Erik T. Buitenhuis, Hein J. W. de Baar

De oceanen bedekken 71 procent van het oppervlak van onze planeet en Oceaan zou een beter passende naam zijn dan Aarde. De buitenkant van de Aarde noemen we de biosfeer waar alle levende organismen een nauwe relatie hebben met hun omgeving: de chemische stoffen in de bodem, de lucht en het water. Het belang van de oceanen wordt duidelijk wanneer we kijken waar sommige stoffen zich bevinden in de biosfeer. Zo bevindt zich 97,2 % van het water ( $H_2O$ ) in de oceanen, 2,15 % als landijs in de grote ijskappen van Groenland en Antarctica, ongeveer 0.63 % als grondwater op het land, en slechts 0,017 % als alle water in meren en rivieren.

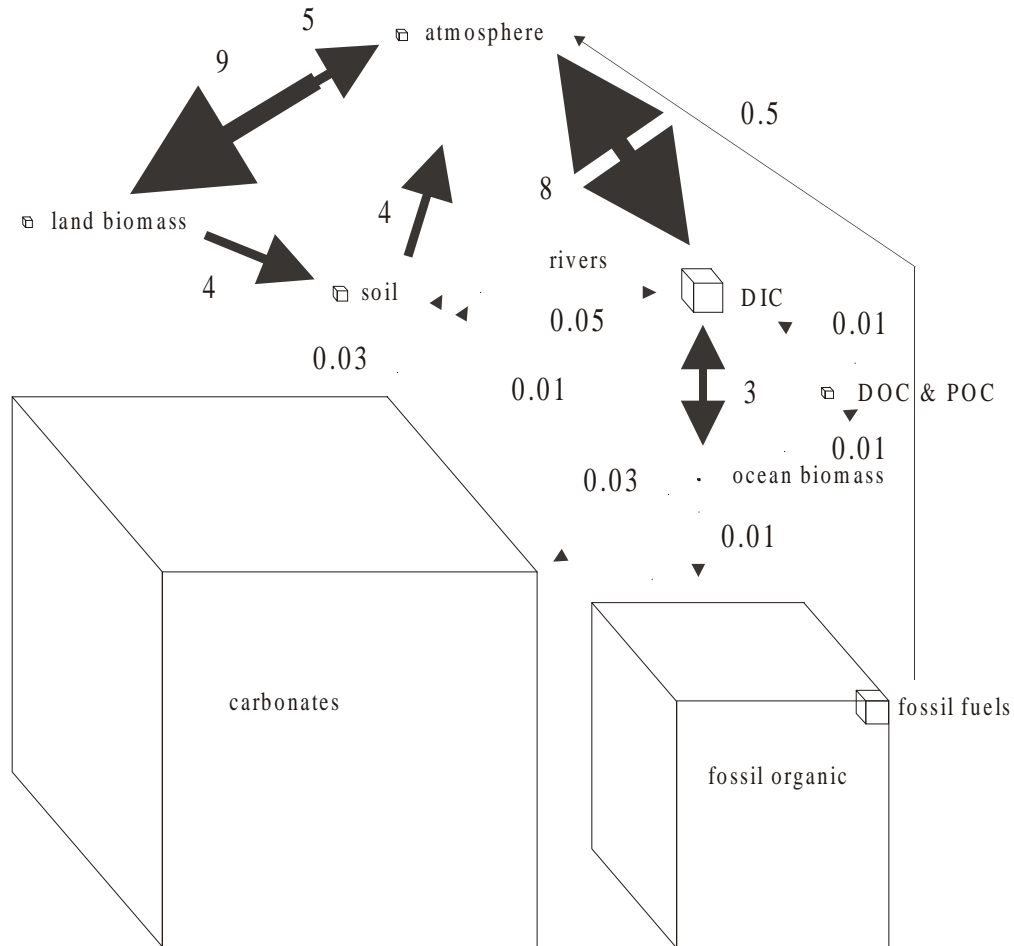
Zoals in figuur 0.2 te zien is, is welliswaar de meeste koolstof op aarde aanwezig in de sedimenten, maar de oceaan speelt een belangrijke rol in de meer actieve reservoirs. Ongeveer de helft van de uitwisseling van  $CO_2$  met de atmosfeer vindt plaats met de oceaan. Dit  $CO_2$  lost op in het zeewater, waar het, door chemische evenwichten met het water ( $H_2O$ ) zelf, vooral voorkomt als bicarbonaat ( $HCO_3^-$ ) en carbonaat ( $CO_3^{2-}$ ). Deze chemische vormen ( $CO_2$ ,  $HCO_3^-$  en  $CO_3^{2-}$ ) en hun onderlinge chemische evenwichten vormen het opgelost anorganisch koolstof systeem uit de titel van dit proefschrift (DIC in figuur 0.2). Er zijn twee belangrijke biologische processen waarbij dit anorganisch koolstof wordt omgezet in vaste koolstof vormen, waaruit alle planten, dieren en bacteriën ter land ter zee en in de lucht bestaan.

Het eerste proces is de fotosynthese, waarbij planten de energie van zonlicht invangen en deze energie gebruiken om  $CO_2$  om te zetten in organisch koolstof (C) en zuurstof ( $O_2$ ). De planten in de oceanen zijn vrijwel allemaal eencellig en noemen we algen of fytoplankton. Een deel van het organische algenmateriaal zinkt naar de zeebodem. Het grootste deel van dit materiaal wordt afgebroken, maar een klein deel gaat uiteindelijk het organische deel van het sediment vormen (fossil organic in figuur 0.2)

Het tweede proces is de vorming van kalk ( $CaCO_3$ ) door samenvoeging van opgeloste calcium met opgelost anorganisch koolstof. De kalkvorming kan zijn als schelpjes van sommige dieren (zoals koralen en verschillende groepen in de open oceaan zwevende diertjes), of als kalkplaatjes die door sommige algen (fytoplankton) worden gemaakt. Ook een deel van deze kalk zinkt naar de zeebodem, en ook wordt het grootste deel van de kalk afgebroken tijdens haar reis naar of aangekomen op de zeebodem, waar het de fossiele carbonaten in het sediment gaat vormen (carbonates in figuur 0.2).

Deze twee processen zijn al miljarden jaren aan de gang en hebben tot een semi-stabiele toestand geleid, waarbij de meeste koolstof in de sedimenten aanwezig is er ongeveer 100 miljoen jaar over doet tussen gevormd worden en weer in de actieve reservoirs terecht komen, waar het dan snel even een heleboel rondjes draait tussen land, zee en lucht, om vervolgens weer een hele tijd in het sediment door te brengen. Er verandert ook wel eens wat op aarde, doordat de zon wat harder gaat schijnen of doordat er een soort plant of dier uitsterft of bijkomt, en sinds kort is daar de mens die bezig is in een nog nooit vertoond tempo fossiele brandstof te verbranden tot  $CO_2$  (de pijl uiterst rechts in figuur 0.2 van de fossiele brandstoffen naar de atmosfeer) Sinds ongeveer 1780 is het verbranden van fossiele brandstoffen flink toegenomen, en als gevolg daarvan is het percentage  $CO_2$  in de lucht gestegen van 0.028 % in het jaar 1780 tot 0.037 % in het jaar 2000. Met de economische groei versnelt ook de toename van  $CO_2$  in de lucht en gecombineerde modellen van economie en klimaat voorspellen een verdubbeling van  $CO_2$  in de lucht rond het jaar 2040. Overigens is de toename in de atmosfeer slechts ongeveer 50 % van de  $CO_2$  uitstoot, ongeveer 30% wordt door de oceanen opgenomen, en 10% wordt door landplanten opgenomen (door onzekerheden in het koolstofbudget komt dit niet op 100% uit).

## Samenvatting



**Figuur 0.2** De wereldwijde koolstofcyclus. DIC = opgelost anorganisch koolstof, DOC & POC = opgelost & particeel organisch koolstof, fossil carbonates = kalk in de sedimenten, fossil organic = organisch materiaal in de sedimenten. Uitwisselingssnelheden tussen reservoirs in  $10^{15}$  mol per jaar (overgenomen uit IPCC 1992), voor reservoirgroottes zie figuur 1.1.

In 1824 al concludeerde Fourier dat de atmosfeer als een broeikas zou werken, en in 1896 publiceerde Arrhenius nauwkeurige berekeningen van het effect van  $\text{CO}_2$  op de warmtebalans van de planeet Aarde. (De vergelijking met een broeikas gaat overigens enigszins mank, omdat de atmosfeer van de aarde warmte vasthoudt doordat gassen (voornamelijk water en ook kooldioxide) zonlicht doorlaten en de infrarode straling van de aarde absorberen, terwijl dit effect van weinig belang is voor een broeikas, die warmte vasthoudt door menging van opgewarmde lucht met koudere omgevingslucht te belemmeren.) Arrhenius rekende aan de warmteabsorptie van  $\text{CO}_2$  omdat hij naar een verklaring voor de ijstijden zocht. Oorzaken en gevolgen van ijstijden,  $\text{CO}_2$  en temperatuur zijn nog steeds onderwerp van veel discussie.

Op dit moment wordt in elk geval bijna al het sediment onder de oceanen gevormd, voor een groot deel uit de resten van mariene planten en dieren, en dus spelen de oceanen en hun biologie een sleutelrol in de wereldwijde koolstofcyclus. Algen leggen met hun fotosynthese het zonlicht vast dat het voedselweb van energie voorziet door het produceren van organische

(koolstof-)verbindingen uit anorganische voedingsstoffen (zoals  $\text{CO}_2$ ). Onder de algen is een groep die naast fotosynthese ook het andere proces uitvoeren dat opgeloste koolstof omzet in vaste koolstof: de vorming van kalk. Deze groep algen zijn de coccolithophoriden, d.w.z. de makers van coccolieten, dat zijn kleine geometrisch vormgegeven plaatjes kalk. Binnen deze groep coccolithophoriden is er weer een soort die volgens recente bevindingen welliswaar niet de meeste kalk produceert, maar die numeriek althans de meeste kalkplaatjes maakt: *Emiliana huxleyi*. Deze coccolithophoride alg is vernoemd naar de geoloog Cesare Emiliani en de bioloog en voorvechter van de wetenschap Thomas Henry Huxley.

Alles bij elkaar vormt deze specificering vanaf de wereldwijde koolstofcyclus tot één algje van één tweehonderdste millimeter grootte nogal een telescoopvisie, maar dit proefschrift is een klein onderdeel van een poging om uit een hoop detail uiteindelijk weer tot generalisaties te komen en tot een nauwkeuriger beschrijving te komen van het belang van het voedselweb in de oceaan voor de wereldwijde koolstofcyclus.

Het onderwerp van dit proefschrift is de interactie tussen *Emiliana huxleyi* en opgelost anorganisch koolstof in zeewater. De twee richtingen van deze interactie vormen twee delen in dit proefschrift: de invloed van opgelost anorganisch koolstof vormen op *E. huxleyi* (hoofdstukken 1.4, 2 & 3), en de invloed van *E. huxleyi* op het opgelost anorganisch koolstof systeem (hoofdstukken 1.5, 4 & 5). In het begin van de synthese (hoofdstuk 1) worden de specifieke resultaten, zoals die in hoofdstukken 2 t/m 5 worden gepresenteerd, in een breder kader geplaatst van de mondiale koolstof kringloop (hoofdstuk 1.1), de mariene koolstof kringloop (hoofdstuk 1.2) en intracellulaire processen (hoofdstuk 1.3).

In hoofdstuk 2 zijn de resultaten van Paasche (1964) gereproduceerd, waaruit blijkt dat bicarbonaat ( $\text{HCO}_3^-$ ) het enige substraat is voor calcificatie en dat kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ) en bicarbonaat beide substraat zijn voor de fotosynthese (figuur 2.3). Verder wordt aangetoond dat er een zeer efficiënte koppeling is tussen de productie van protonen bij de calcificatie en het gebruik van deze protonen in het deel van de fotosynthese dat bicarbonaat gebruikt (figuur 2.1). Uit de resultaten blijkt ook dat de groeisnelheid van *E. huxleyi* bijna maximaal is bij typische concentraties van de opgelost anorganisch koolstof vormen (figuur 2.7). Vanwege dit laatste feit zal er normaliter geen significante terugkoppeling plaatsvinden tussen de invloed die het anorganisch koolstof op *E. huxleyi* uitoefent en de invloed die *E. huxleyi* op het anorganisch koolstof uitoefent. Daarom is er ook geen derde deel gewijdt aan deze terugkoppeling, net zomin als in het model het opgelost anorganisch koolstof invloed uitoefent op de groeisnelheid (hoofdstuk 5). In hoofdstuk 3 is de rol van het enzym carbonzuuranhydrase in de koppeling tussen calcificatie en het gebruik van bicarbonaat in de fotosynthese nader onderzocht. Dit is gedaan door middel van een zink-limitatie experiment (figuren 3.2) en een zink-bicarbonaat colimitatie experiment (figuur 3.3). De resultaten zijn in overeenstemming met de functie van carbonzuuranhydrase in het gebruik van bicarbonaat zoals die te zien is in het schema in figuur 3.1 (= figuur 2.1), maar ook dat zink-limitatie eveneens invloed heeft op het gebruik van kooldioxide, wat niet voorspeld wordt door dit schema.

Hoofdstuk 4 en 5 gaan over de invloed van *E. huxleyi* op opgelost anorganisch koolstof. In hoofdstuk 4 wordt beschreven dat de algenbloei met *E. huxleyi* die in 1993 in de Noordzee werd bemonsterd kooldioxide uit de atmosfeer naar de diepzee transporteerde (figuur 4.6a). Dit terwijl er toch een positieve correlatie werd gevonden tussen de hoeveelheid particulier kalk in het water en de activiteit van kooldioxide (figuur 4.2). In hoofdstuk 5 wordt een computersimulatie van een bloei van *E. huxleyi* gepresenteerd. Deze simulatie reproduceert de in het veld gemeten positieve correlatie tussen kalk en kooldioxide (figuur 5.3), en laat zien dat deze correlatie een afname van de activiteit van kooldioxide laat zien tijdens het oplossen van kalk. Daarmee is aangetoond dat ook deze waarnemingen passen in de hypothese dat er kooldioxide uit de atmosfeer de zee in wordt getransporteerd tijdens een bloei van *E. huxleyi*. Een gevoeligheidsanalyse van het model laat zien welke processen de grootste invloed

uitoefenen op het transport van atmosferisch kooldioxide (tabel 5.1). Met behulp van het model wordt bovendien aannemelijk gemaakt dat in een bloei van *E. huxleyi* meer kooldioxide uit de atmosfeer wordt getransporteerd dan in een bloei van een niet verkalkende alg (figuur 5.4)

Aan het eind van beide delen worden enige suggesties gedaan hoe het beschreven onderzoek voortgezet zou kunnen worden (aan het eind van de discussie in hoofdstuk 3 en in de samenvatting van hoofdstuk 5).

Het onderzoek van dit proefschrift is een onderdeel van het NWO onderzoeksprogramma Verstoring van Aardsystemen. Tevens sluit het onderzoek aan bij het vanuit Nederland gestimuleerde ‘Wereldwijde *Emiliana huxleyi* Modelerings initiatief’ (Global *E. huxleyi* Modelling initiative (GEM)). Dit beoogt de intensieve studie van deze sleutelsoort onder de zoutwater algen, op alle relevante schalen van moleculair tot en met de schaal van wereldwijde kringlopen van elementen. Het Europese project MERLIM (Marine Ecosystems Resources : trace metal and carbon dioxide LIMitations) werd opgezet om limitatie van groei van algen door tekorten aan spoor elementen ijzer en zink, en tekort aan opgelost CO<sub>2</sub>, en interacties daartussen, te bestuderen. Het onderzoek over co-limitatie van zink en CO<sub>2</sub> in hoofdstuk 3 werd binnen dit MERLIM kader uitgevoerd, naast diverse andere studies van *E. huxleyi* in onder meer Liverpool en Bremerhaven.

Sinds april 2000 is een nieuw Europees project begonnen dat vanuit Nederland wordt geleid. Doelstelling is het inpassen van de biologie en ecologie van 5 sleutelgroepen van algen in simulatie modellen van CO<sub>2</sub> en klimaat. Voor een van de 5 sleutelsoorten is gekozen voor *E. huxleyi* en de kennis verkregen in dit proefschrift zal bijdragen aan dit volgende project IRON-AGES (Iron Resources and Oceanic Nutrients; Assessment of Global Environmental Simulations).

Come, let us continue counting the minnows.

Frogs and Scientists  
*In: Eye*  
Frank Herbert (1985)