

**Mijnheer de rector, dames en heren,**

**De kleuren van de aarde: blauw en groen.**

**{Sheet 2}**

Op 20 juli 1969, vier dagen nadat ze waren vertrokken voor hun reis naar de maan, namen de astronauten van de Apollo 11 een foto van een opkomende aarde tegen de achtergrond van het maanoppervlak. Zoals u kunt zien ziet de aarde er vanaf die afstand uit een als schitterend gekleurde bol waarop prachtige patronen van witte weersystemen zichtbaar zijn tegen een felblauw gekleurde achtergrond. De levenloze maan komt in vergelijking met de kleurrijke aarde over als een grauwe grijze massa. Geen van de astronauten weet zich nu nog te herinneren wie die foto heeft gemaakt; niettemin is het een van de beroemdste foto's geworden uit de ruimtevaartgeschiedenis en de iconografie van de aarde<sup>1</sup>. Waarom? Het is een van de eerste afbeeldingen die er geen twijfel over laat bestaan dat water belangrijk is op aarde. De aarde is uniek omdat ze leven bevat, maar ook omdat ze een water cyclus bevat die alle fases van water, de vaste, de vloeibare en de dampvorm omvat. Er is geen enkele planeet waar de temperatuur zodanig is dat inderdaad water in als die fases kan voorkomen. Maar toch zijn het vooral de kleuren die het beeld bepalen van de aarde, met haar oceanen, landoppervlak, en atmosfeer: het blauw van de oceaan, het wit van de wolken.

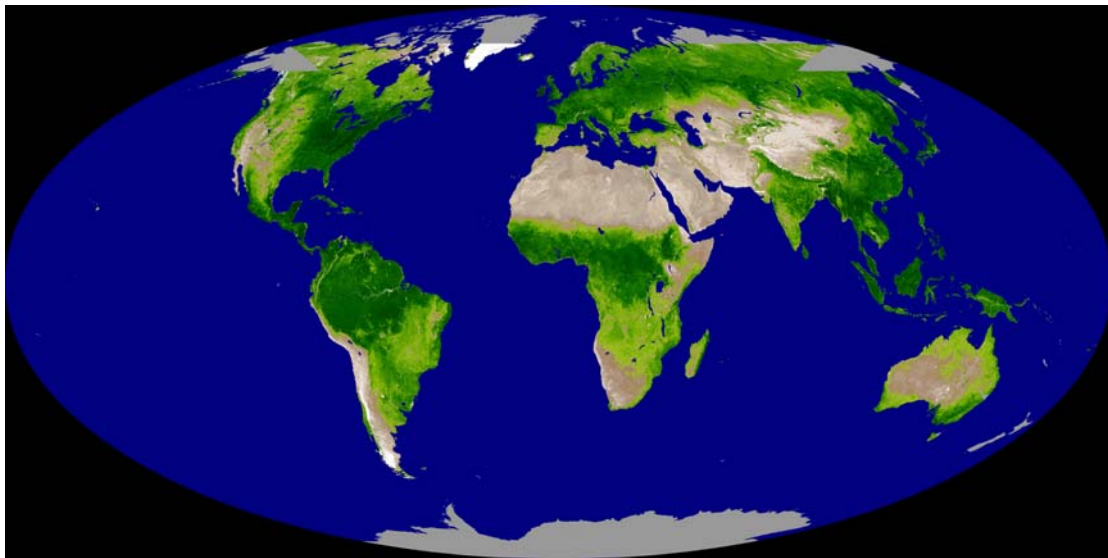


*Figuur 1, "Earthrise", foto van een opkomende aarde genomen vanuit de Apollo 11 (AS11-446550)*

---

<sup>1</sup> D. Cosgrove, 2001. *Apollo's eye: a cartographic genealogy of the earth in the Western Imagination*. Johns Hopkins University Press., USA.

Gek genoeg, wist de Griekse filosoof Plato ook al melding te maken van die kleurenpracht van de aarde, getuige de opmerkingen van Socrates in de Faidon<sup>2</sup>: “ om te beginnen wordt over die ware aarde beweerd, dat ze van bovenaf uitziet als van die uit twaalf lapjes leer gemaakte ballen. Bont, met repen in verschillende kleuren, waarvoor de kleuren hier, zoals schilders ze gebruiken, als stalen kunnen dienen. Daar bestaat de hele aarde uit dit soort kleuren, zij het nog veel schitterender en zuiverder dan bij ons.” Men zou bijna wensen dat Socrates meegevlogen was met een van de Apollo vluchten.

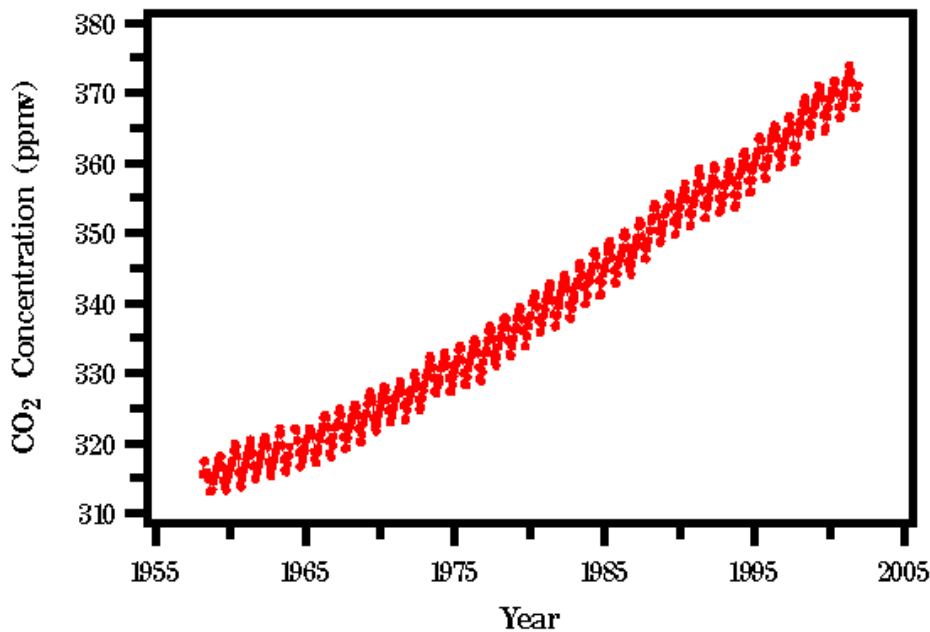


*Figuur 2. Opname van de MODIS satelliet van het groen op aarde in de boreale zomer*

Tegenwoordig kunnen we de aarde in meer kleuren zien; erger nog, met wat simpele computermanipulatie kunnen we ze in alle mogelijke kleuren laten aanbieden. Satelliet opnames van bijvoorbeeld de Amerikaanse MODIS satelliet laten grote groene gebieden op het landoppervlak zien. Ik stel dan ook vast dat de foto vanuit de Apollo enige bijstelling behoeft. Niet alleen het blauw van het water onderscheidt de aarde van andere planeten, maar ook het groen van het landoppervlak. Dat groen bestaat uit de grote bosgebieden op aarde, de tropische regenwouden van Azië, Afrika en de Amazone, maar ook de bossen in het noorden in Siberië, gematigde bossen op onze breedtegraden, en de wat spaarzamere vegetatie in de het Mediterrane gebied en in Afrika.

---

<sup>2</sup> Plato, Verzameld werk deel VI: Faidon. 1995. Vertaald door Hans Warren en Mario Molengraaf, Bert Bakker Uitgevers, Nederland.



Figuur 3. Toename in CO<sub>2</sub> concentratie in de atmosfeer gemeten op Mauna Loa

Wat vertelt het satelliet beeld ons verder? Het vertelt ons dat op het land vegetatie een bepalende factor is. Als we de opnames van iedere week achter elkaar zouden zetten krijgen we een beeld te zien van de hartslag van de aarde: groen dat verschuift van Zuid naar Noord en weer terug, met in de tropen een permanente zone van groen: het tropisch regenwoud.

Die hartslag laat zich ook zien in een van de meest belangrijke meetreeksen van de afgelopen 50 jaar: de CO<sub>2</sub> meetreeks van Keeling op Manau Loua in Hawaï. In die reeks is niet alleen te zien dat gemiddeld genomen de concentratie van CO<sub>2</sub> met 1.5 ppm/yr toeneemt, ook laat ze zien dat de CO<sub>2</sub> concentratie een variatie heeft die gekoppeld is aan die van de seizoenen<sup>3</sup>.

Kleuren spelen een belangrijke rol in ons beeld van de aarde. Zijn de kleuren blauw en groen vooral tekenen van helderheid en representeren ze respectievelijk schoon en levend water en levende ecosystemen, heel anders wordt het als het water vervuild is en de ecosystemen dood gaan. Dan wordt de kleur vaak bruin, grijs en grijsig. In de woorden van Plato: “Immers die aarde van ons, de gesteenten, heel het gebied waar wij wonen, zijn verminkt en aangevreten, ongeveer zoals alles in zee door het zout is aangetast.” Bij Plato is er een belangrijk onderscheid tussen de ideële aarde en die waarop

<sup>3</sup> Data verkregen via <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.htm>

wij leven. De ware aarde kent sublieme kleuren, de feitelijke is eigenlijk maar een slap aftreksel van die ware aarde en kent vooral verderf en verminking. De opmerkingen van Plato hebben meer actualiteitswaarde dan op het eerste gezicht wellicht lijkt. Is het voor de meeste van ons ook niet zo dat we intuïtief meer waarde hechten aan een mooie onverstoorde aarde dan aan de door mensen sterk veranderde aarde waarop we nu leven? De cruciale vraag is dus: hoe houden we de aarde kleurrijk, of levend, gegeven de bedreigingen die haar te wachten staan? Of anders geformuleerd, hoe erg is het dat we de aarde wat verminken, of kunnen we aangeven wat nog wel en wat niet meer kan, met nog andere woorden kunnen we een maat aangeven voor de veerkracht van het systeem aarde voor menselijke verstoringen?

## **Global Change**

Natuurlijke variaties in temperatuur en broeikasgassen, zoals bijvoorbeeld bekend van analyses van ijskernen, geven grote schommelingen te zien die het systeem aarde in de laatste half miljoen jaar heeft ondervonden en waarvan de ijstijden, en de perioden daartussen, de interglacialen, de meest pregnante uitdrukking zijn. Schommelingen in het CO<sub>2</sub> gehalte van de atmosfeer in die periode hebben zich binnen een vrij beperkte bandbreedte bewogen, met een ondergrens van 180 ppm tijdens de ijstijden, en een bovengrens van 280 ppm. De toevoeging van broeikasgassen in de atmosfeer sinds het begin van industriële revolutie heeft geleid tot een verhoging van de concentratie van CO<sub>2</sub> geleid die volgens het Intergouvernementele Panel van Klimaatwetenschappers van de Verenigde Naties (IPCC) zijn weerga niet kent. Momenteel zitten we op 371 ppm, bijna 100 ppm meer dan de net genoemde bovengrens en dus ruim boven het niveau waarvan we met enige zekerheid nog kunnen zeggen hoe het systeem aarde zich gedraagt, in ieder geval niet op basis van analogieën met wat er zich het laatste half miljoen jaar heeft afgespeeld<sup>4</sup>.

De Nederlandse Nobelprijswinnaar Paul Crutzen heeft voor de periode van de laatste 250 jaar de term Antropoceen gesuggereerd in analogie met de gebruikelijke indeling van de recente geologische geschiedenis in Pleistoceen en Holoceen. Het antropoceen in Crutzen's visie begint rond het eind van de 18-e eeuw, rond de tijd waarin de

---

<sup>4</sup> Steffen W.R. et al., 2001 Challenges of a Changing Earth, Springer Verlag.

stoommachine van James Watt werd uitgevonden. Het is in het Antropoceen dat de menselijke invloed op het systeem aarde echt grote vormen heeft aangenomen en waarin antropogene invloeden vaker bepalend zijn voor haar functioneren dan natuurlijke.

Het zijn niet alleen de broeikasgassen waarvan de toename zorgen baart. Zonder een litanie te willen geven op de toestand van moeder aarde en daarmee prooi te worden voor simplistische milieucritici zoals de Deen Lomborg<sup>5</sup>, lijkt het me toch wel goed een paar cijfers en zaken te noemen.

- Meer dan 50% van het landoppervlak op aarde is getransformeerd onder invloed van mensen.
- Bijna de helft van alle netto primaire productie wordt door mensen gebruikt.
- Meer stikstof wordt nu synthetisch geproduceerd en toegepast dan dat in het verleden door natuurlijke fixatie werd vastgelegd.
- Meer dan de helft van het beschikbare water wordt direct door mensen gebruikt.
- Een kwart van alle verdamping op aarde is op een of andere manier door menselijk ingrijpen beïnvloed
- Naar schatting is de helft van de wetlands op aarde verloren door wateronttrekking en omvorming naar landbouwgronden

Het beeld dat hieruit opdoemt stemt niet vrolijk. Het totaal van deze vaak samenvallende en interacterende veranderingen wordt samengevat onder de noemer Global Change.

Grofweg kunnen we stellen dat al deze ingrepen verstoringen in de primaire stofkringlopen op aarde zijn. Maar het is de aard van die veranderingen die nu allemaal tegelijkertijd plaatsvinden en de grootte en snelheid van verandering die zonder vergelijk in de recente geologische geschiedenis lijken te zijn. Dat maakt het ook zo problematisch: als we de veerkracht, de gevoeligheid voor verstoringen van die kringlopen goed zouden weten, dan konden we een beter inschatting van de mogelijke gevolgen geven. Helaas weten we dat slecht, en dus is het moeilijk voorspellingen te doen wat de mogelijke effecten vooral op langere termijn. Daarnaast werken op al deze processen zowel menselijke als natuurlijke invloeden.

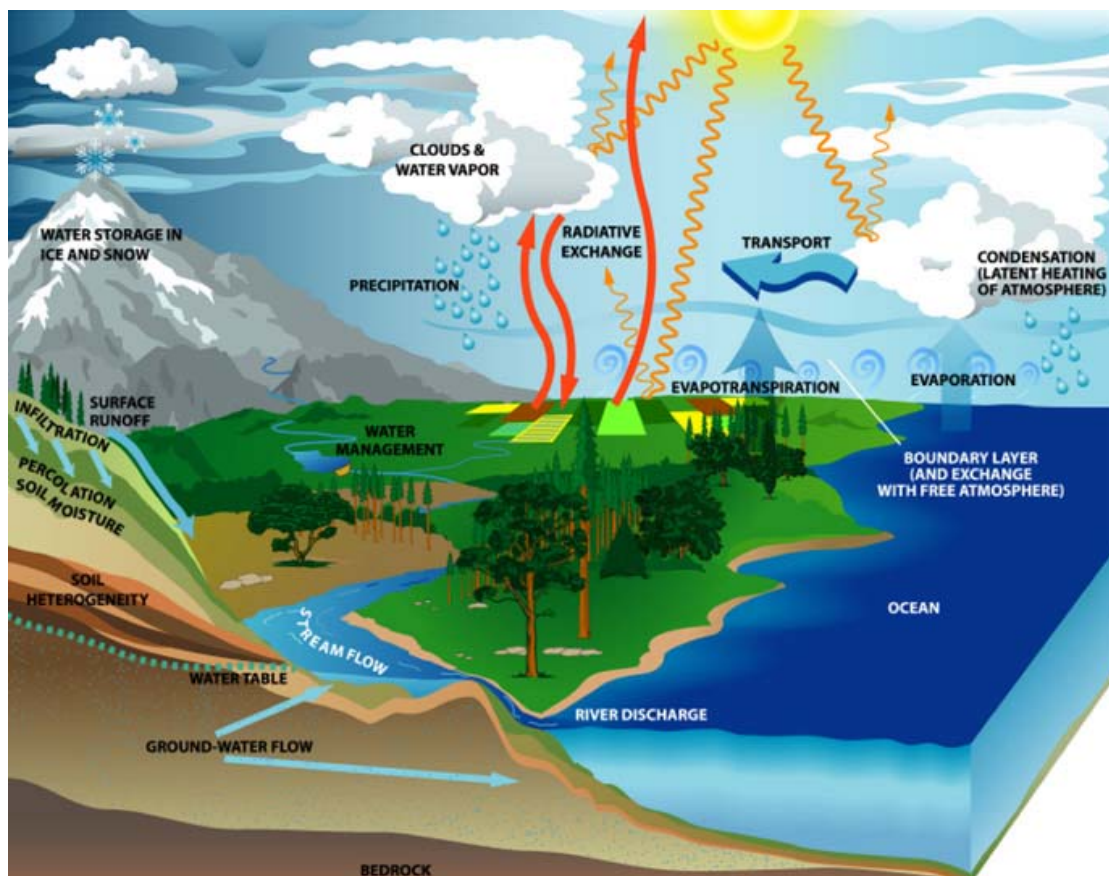
---

<sup>5</sup> B. Lomborg, 2001, *The skeptical environmentalist, measuring the real state of the world*. Cambridge University Press. UK.

Ik wil u in deze lezing mijn visie geven op twee van die kringlopen in het systeem aarde, op de rol van water en koolstof in het systeem aarde en hun interactie. In die interactie zit voor mij een groot deel van de weerbaarheid/veerkracht van de aarde verborgen. Het is dus een verhaal over het groene leven op aarde in samenhang met de blauwe hydrologische cyclus.

### Het blauw der aarde: water

Water is veruit het meest belangrijke element op aarde en het is ook water waarin onze planeet zich onderscheidt van de andere. Dat onze planeet er zo anders uitziet dan bijvoorbeeld Venus of Mars uit zich in de samenstelling van onze atmosfeer, waarvan zuurstof en stikstof de hoofdbestanddelen zijn. Het staat vrijwel zeker vast dat een voortdurende co-evolutie van het leven, de geologische processen en de atmosfeer tot deze omstandigheid heeft geleid. Zonder leven geen aarde zoals we haar kennen. Omgekeerd, en wellicht even belangrijk, zonder aarde geen leven zoals wij dat kennen.



Figuur 4. Weergave van de water cyclus op aarde

Laat ik proberen kort de hydrologische cyclus te schetsen<sup>6</sup>. Verdamping, transport, condensatie en neerslag, vormen de kern van de hydrologische cyclus. 96.5% van het water op aarde is zout van karakter en is opgeslagen in de oceanen. Dit heeft een totaal volume van 1.4 miljard kubieke kilometer. Slechts een klein deel, zo'n 3.5 % bevindt zich op de continenten en in de atmosfeer. Het merendeel daarvan, 1.8% is opgeslagen in ijskappen en gletschers. Zo'n 1.7% is opgeslagen in ondergrondse reservoirs als grondwater. In de meren, rivieren, moerassen en in de permafrost ligt slechts 0.03% van het totale volume opgeslagen. De atmosfeer herbergt op ieder moment slechts een duizendste procent van alle water in het systeem aarde. Dit is overigens nog wel genoeg om de gehele aarde met een laagje water van 2.7 cm te bedekken en ervoor te zorgen dat wolken een belangrijke invloed op het klimaat hebben! Gemiddeld is de omlooptijd van water in de atmosfeer kort; iedere 9 tot 10 dagen wordt het ververst. Op de vaste aarde vervoeren de rivieren 43 % van de neerslag die valt. De overige 57% verdampt en komt weer terug in de atmosfeer zonder dat het de oceanen bereikt.

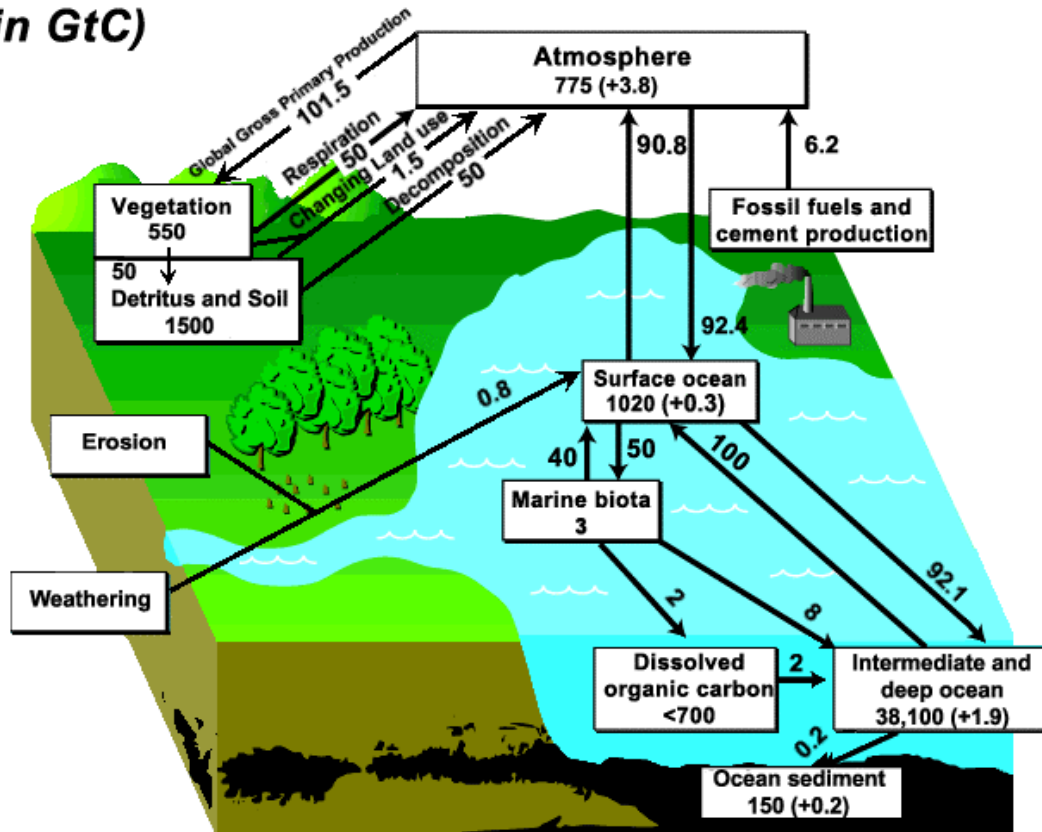
De voor de mens belangrijke bronnen, het water in rivieren, meren en toegankelijk grondwater zijn een minieme fractie van de natuurlijke cyclus. Slechts 41000 km<sup>3</sup> vloeit per jaar via de rivieren en het grondwater naar de oceanen. Van deze hoeveelheid wordt 8-10% gebruikt: 69% voor landbouw, 23% voor industrie en 8% voor huishoudelijke gebruik en drinkwater. De watercrisis waar de wereld recentelijk over sprak in het derde Wereld Water Forum in Kyoto betreffen deze volumes en hun beschikbaarheid en duurzaamheid en gevoeligheid voor klimaatverandering. Het zijn juist deze kleine getallen die maken dat we voorzichtig met het gebruik van deze voorraden moeten omspringen.

Water speelt bovendien een enorm belangrijke rol in het klimaat systeem. Vaak wordt vergeten dat water het meest belangrijke broeikasgas is. Voor een groot deel dankzij het in de atmosfeer aanwezige water is de temperatuur op aarde behaaglijk. Omdat de verdampingswarmte van water zo hoog is kunnen er ongelooflijk grote hoeveelheden energie verplaatst worden en vrijkomen bij condensatie. Dit gebeurt in een continu proces waarbij warmte van de tropen naar de polen wordt vervoerd. De hydrologische cyclus is dus ook het vliegwiel van ons klimaatstelsel.

---

<sup>6</sup> German Advisory Council on Global Change, 1997. World in Transition. Ways towards sustainable management of freshwater resources. Springer, Duitsland.

## Global Carbon Cycle (1992-1997) (in GtC)



Figuur 5. Weergave van de koolstofcyclus op aarde.

De cyclus van koolstof op aarde kent een ander vorm dan die van water<sup>7</sup>. Weliswaar zit het grootste deel van de koolstof op aarde, zo'n 38.000 miljard ton C, opgeslagen in de oceanen, in de atmosfeer is de gemiddelde verblijftijd van een molecuul veel langer dan voor water, zo'n drie jaar tegen 8 dagen voor water. Logisch in zekere zin, koolstof regent niet uit zoals water, zult u zeggen. Maar het heeft ook te maken met de verschillen in hoeveelheid opgeslagen koolstof en de grootte van de stromen of fluxen koolstof die dat reservoir verversen.

<sup>7</sup> Prentice et al. 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In IPCC, 2001. The scientific basis. Contributions of working Group 1 to the Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T et al. (Eds). Cambridge University Press, UK. pp 183-239.

Een ander kenmerk van de koolstofcyclus zijn de enorme grote fluxen van het land en oceanoppervlak naar de atmosfeer en terug, maar de uiterst kleine netto fluxen. Het verschil tussen de opname enerzijds en uitstoot anderzijds is minimaal. Om u een idee te geven van die grootteorde: planten nemen bij hun fotosynthese zo'n 120 miljard ton koolstof per jaar op, maar verliezen ook zo'n 60 miljard ton doordat ze ademen. Zo'n 60 miljard ton wordt vervolgens uitgestoten doordat bacteriën en bodemdieren de koolstof van vallende stammen en bladeren afbreken. De netto balans is dus nul. Jarenlang heeft men ook gedacht dat dat zo zou moeten zijn, en vermoedelijk was dat ook zo, kleine variaties daargelaten, tot begin jaren 1950. Tegenwoordig weten door metingen van atmosferisch koolstof dat het land tegen de 2 miljard ton meer koolstof opneemt dan dat het uitstoot. De koolstof balans is dus niet meer in evenwicht!

Net als water is CO<sub>2</sub> een belangrijk broeikasgas. Zo belangrijk dat de klimaatverandering die nu meetbaar is geworden, voor het grootste deel aan CO<sub>2</sub> verhoging toe schrijven. De belangrijkste bron daarvoor is het verbruik van fossiele brandstoffen. Echter, maar slechts iets minder groot is de verstoring door het kappen van bos. Sinds 1850 wordt geschat dat er ten gevolge van boskap zo'n 120 miljard ton C in de atmosfeer terecht is gekomen en daarvoor- ook eerder werd bos gekapt, onder andere in Europa voor schepen, en in Noord Afrika voor landbouwgrond- zo'n 80 Miljard ton C. In het totaal zou ontbossing dus voor emissies van 200 Miljard ton C hebben gezorgd. Het is de moeite waard deze hoeveelheid te vergelijken met de geschatte uitstoot ten gevolge van verbranding van fossiele brandstof: zo'n 280 miljard ton C sinds 1850. Niet echt veel minder dus.

Het IPCC heeft op basis van deze getallen berekend dat via herbebossing van bestaand landbouwgebied, dus van al het bosgebied dat in het verleden is gekapt maximaal 50 ppm reductie kan worden behaald in de komende 100 jaar. Laten we het huidige bos met rust dan besparen we echter bijna 4 keer zoveel! Waar het Kyoto protocol de prioriteit legt bij beheersmaatregelen van landbouw en bosgebieden is het dus eigenlijk veel verstandiger om te investeren in bosbehoud om de koolstofdioxidetoe name in de atmosfeer te stabiliseren. Die optie staat echter niet in het protocol. Erger nog, zoals een aantal van mijn CarboEurope collega's onlangs nog in Science hebben laten zien<sup>8</sup>, is er in twee vaak aangehaalde gevallen in Zuid Amerika sprake van bosaanplant, vlak na dat het

---

<sup>8</sup> Schulze et al., 2003. Making deforestation pay under the Kyoto protocol. Science 299: 1669.

oorspronkelijke bos is gekapt. Niets geen aanplant op lang geleden ontbost gebied. In het Kyoto jargon heten dit “perverse incentives”. Eerst wordt geld verdiend met het kappen van het bos, daarna nog een keer om op het gekapte land grootschalig bos aan te planten om CO<sub>2</sub> reductiecertificaten te verkopen.

### **Veranderingen in landgebruik**

Het voorbeeld van ontbossing toont al aan dat menselijk ingrijpen in de koolstof cyclus belangrijk is. Menselijke ingrepen in de biogeochemische cycli uitend zich vaak via veranderingen in het landgebruik. Ik wil dit graag illustreren aan de hand van een aantal voorbeelden, die allemaal op de een of ander manier aan ons onderzoek gerelateerd zijn. De voorbeelden zijn dus tegelijkertijd indicaties waar we met ons ecohydrologische onderzoek naar toe willen.

### **Tropische ontbossing en nevelbossen**

Het eerste voorbeeld betreft tropische ontbossing. Een vegetatie die veel groener dan een regenwoud zult u op aarde niet vinden, een waar het blauwe water een grotere rol speelt in de instandhouding van het systeem evenmin. Grote delen van het Afrikaanse en Aziatische regenwoud zijn echter al gekapt. In de Amazone wordt per jaar 15000 tot 20000 km<sup>2</sup> tropisch regenwoud vernietigd. In de jaren tachtig toen de eerste klimaatmodellen gebruikt werden voor analyse van de effecten van grootschalige ontbossing op het klimaat bleek dat vervanging van tropisch regenwoud in de Amazone door weiland tot een vermindering van neerslag en verhoging van de temperatuur in die regio tot gevolg zou hebben. Er is sindsdien veel onderzoek gepleegd om die globale conclusies aan te scherpen. Waren de eerste modellen waarin de waterbalans van het bos werd weergegeven simpel, gaandeweg werden ze complexer, en gaandeweg bleek ook dat er meer aan de hand was dan alleen maar een simpele temperatuurverhoging en neerslagreductie. Het bleek toen dat vooral interactie tussen de bodem en vegetatie veel belangrijker was dan eerst werd gedacht.

Sampurno Bruijnzeel uit onze groep is een van de mensen geweest die dit probleem van de invloed van ontbossing op de hydrologie uitvoerig vanuit het experimentele perspectief heeft bekeken. Hij komt tot de conclusie dat ontbossing in vrijwel alle gevallen in de eerste paar jaar leidt tot een toename in afvoer vanuit de ontboste gebieden. Deze algemene conclusie behoeft precisering wanneer we gaan kijken wat er daarna met het ontboste gebied gebeurt. Is de verstoring relatief gering, dan verdampt het nieuwe bos al snel weer zo veel dat er van de oorspronkelijk toename in afvoer weinig over blijft. Is die verstoring groter, en zijn ook de bodems verhard, dan kunnen verminderde infiltratiemogelijkheden voor neerslag de toevoer naar het grondwater substantieel belemmeren. Dit heeft gevolgen voor de afvoer in natte periodes, die dan vaak sneller kan verlopen. Het grootste probleem echter zit hem niet in de natte periodes, maar juist in de droge perioden. In de drogere perioden zullen door de gebrekkige infiltratie de afvoeren juist lager worden. Deze "trade off" tussen snelle afvoeren in de natte perioden en verminderde in de droge, kan grote consequenties hebben voor waterbeschikbaarheid, maar ook voor erosie, die vaak zal toenemen als de afvoer groter wordt. Het is dan ook belangrijk dat we de seizoensdynamiek van de hydrologische processen en hun gevoeligheid voor verstoringen door landgebruikveranderingen beter begrijpen, willen we goede voorspellingen kunnen maken over de effecten van kap, en mogelijk over herstel van ontboste landschappen<sup>9</sup>.

Het moge uit dit voorbeeld duidelijk zijn dat er sprake is van twee interacterende processen die een verschillende tijdsconstante hebben. Het groen herstelt relatief snel, binnen een paar jaar is er weer veel blad, nog niet alle soorten natuurlijk, maar de bodem herstelt langzamer. Door deze verschillende tijdsconstanten is sprake van hysteresis in het herstel van het systeem, en wordt het moeilijker en kost het meer tijd systemen te herstellen dan op het eerste gezicht lijkt. De koppeling tussen de cycli van water, bodemherstel en plantengroei speelt hierbij een centrale rol.

Waar het probleem van verminderde afvoeren in droge periodes nog meer optreedt zijn de Tropische Nevelbossen<sup>10</sup>, in het engels "Tropical Montane Cloud Forests". Nevelbossen, waarvan u hier en voorbeeld ziet dat deels al ontbost is, zijn grote

---

<sup>9</sup> Bruijnzeel, L.A. 2003. Tropical forests and environmental services: not seeing the soil for the trees. In Bonell, M., and Bruijnzeel, L.A. (Eds). Forests-Water-People in the humid tropics. In press.

<sup>10</sup> L.A. Bruijnzeel, 2003. Tropical montane cloud forests: a unique hydrological case. In . In Bonell, M., and Bruijnzeel, L.A. (Eds). Forests-Water-People in the humid tropics. In press.

watervangers. Uit de mist en in het bos hangende bewolking wordt veel water onderschept. Dit kan oplopen tot enkele millimeters per dag. Dit uitzonderlijke hydrologisch gedrag van deze bossen is uitermate belangrijk voor de aanlevering van water benedenstrooms van deze bossen. Worden de hoger gelegen bossen gekapt dan missen de lager gelegen delen de extra input van neerslag en kunnen daar juist watertekorten ontstaan. Dit probleem kan in de droge perioden erger zijn dan in de nattere. Tropische nevelbossen zijn sowieso uitzonderlijk; zo er is weinig bekend van hun koolstofcyclus en hun groei onder omgevingscondities die niet te boek staan als bevorderend. De kap van deze bossen vindt echter nog steeds plaats en hoeveel er over is van de origineel geschatte omvang van 50 miljoen ha is onduidelijk.



*Figuur 6. Ontbost tropisch nevelbos in Costa Rica (foto Arnout Frumeau)*

Op langere tijdschaal zijn verandering in temperatuur belangrijk voor het niveau waar de wolkenbasis, de belangrijke bron van water voor nevelbossen, zich bevindt. Het

vermoeden bestaat dat de wolkenbasis als gevolg van klimaatverandering hoger kan komen. Er zijn studies uit Costa Rica waaruit blijkt dat de afwezigheid van mist en bewolking heeft geleid tot vermindering en verandering van samenstelling van hagedis populaties en kikkers. Dit zijn terugkoppelingen tussen hydrologie atmosfeer en biodiversiteit waar we slecht aan beginnen te ruiken. Maar waar een prachtig onderzoeksveld voor de toekomst ligt waar naast Sampurno, Arnout en Friso, hun vaardigheden op los kunnen laten. Tegelijkertijd zullen we in Brazilië onze contacten in Manaus proberen warm te houden met Allesandro Arujo als promovendus en Maarten Waterloo als begeleider. En weer, zijn het het blauw en het groen die in deze systemen onlosmakelijk met elkaar verbonden zijn.

### **Terugkoppelingen en veerkracht**

Systemen met terugkoppelingen zijn enerzijds vermoedelijk meer veerkrachtig dan systemen zonder terugkoppeling, anderzijds kan de complexiteit van de terugkoppelingen er ook voor zorgen dat er verrassingen optreden. Een verrassing kunnen we het beste definiëren als het plotseling verlies van een elementaire functie in een systeem. We zullen ons dus moeten afvragen wat de elementaire functies van gekoppelde atmosfeer, geosfeer biosfeersystemen zijn. Vaak worden deze functies disciplinair onderzocht, maar slecht zelden geïntegreerd in een perspectief dat de rol van een ecosysteem kan beschrijven in een totaal van interacterende biogeochemische cycli. Veerkracht wordt dan ook naar mijn smaak te eenzijdig op een te laag organisatieniveau in het systeem aarde wordt ingevuld. Zoals ik heb laten zien is in de meeste gevallen sprake van grote interactie tussen biologische atmosferische en geologische processen. Zeker op langere termijn bestaan de veerkracht van die systemen niet alleen uit het aantal soorten dat in het ecosysteem zit, maar ook uit het vermogen van de bodem te regenereren en de mate waarin een systeem bijvoorbeeld via terugkoppelingen afhankelijk is van neerslag.

Ik zou dan ook dat begrip veerkracht of aanpassingsvermogen op een veel hoger abstractieniveau dan het ecosysteem willen invullen. Dan komen we uit op een systeem dat misschien wel enigszins oogt als een kleinschalige kopie van het door James Lovelock gepropageerde GAIA idee, waarin positieve en negatieve terugkoppelingen het

systeem aarde in balans houden<sup>11</sup>. Het aantal en de sterkte van de terugkoppelingen bepaalt dan de mate van veerkracht. Positieve terugkoppelingen versterken initiële verstoringen, negatieve brengen het terug naar de uitgangspositie.

Een van die plekken waar we dat onderzoeken is in Slovenië waar de AIO Christiaan van der Tol de ontwikkeling van bossystemen wil onderzoeken in afhankelijkheid van ligging op de berghelling en bodemvocht. Waar we op uit willen komen is een beschrijving van de structuur en ontwikkeling van het bos, waarbij we die structuur dynamisch af willen laten hangen van de omgeving. Interactie tussen bodem en klimaat met de vegetatie als resultante. Een bottom-up benadering dus van de interactie tussen blauw en groen op lokale schaal.

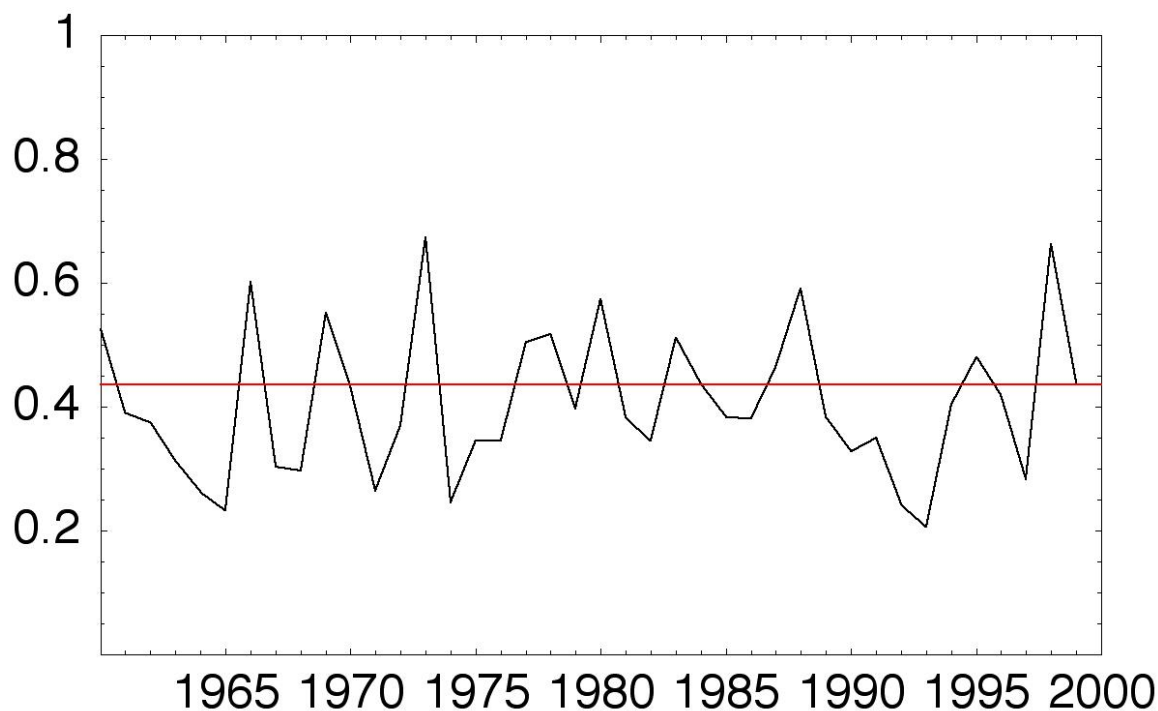
Dit is in tegenstelling met de in het verleden gebruikelijke aanpak waarbij ecohydrologische patronen, de ontwikkeling van vegetatie, vooral van bovenaf door meteorologie of van onderaf door grondwater gedomineerd werden gedacht, met weinig aandacht voor de terugkoppelingen tussen bodem en atmosfeer. Het zal u niet verbazen dat ik die aanpak niet zo vruchtbaar vind. Bottom up sturing of zelf organisatie lijkt mij een veel realistischer benadering. Doordat er in zich ontwikkelende systemen steeds meer terugkoppelingen gaan optreden, komen bepaalde patronen of organisatievormen vanzelf tot stand. In het Engels wordt dit vaak aangeduid als “emergence” of “self-organization”. De ontwikkeling van een stad, de manier waarop hersenen functioneren en de bekende slagorde van mieren zijn voorbeelden van structuren die vooral door zelf-organisatie zijn ontstaan. Mijn collega's in Utrecht hebben op die manier prachtig laten zien hoe de Tiger Bush patronen van de Afrikaanse Sahel zich kunnen ontwikkelen door een interactie met bodem, beschikbaar water en groei<sup>12</sup>. In zo'n systeem zit dan de stabiliteit van het systeem of de veerkracht opgesloten in de mate waarin processen elkaar beïnvloeden en op elkaar terugkoppelen. Een dergelijke aanpak heeft naar mijn idee vooral potentie om de bodem, maar wellicht ook menselijke verstoringen, als integraal onderdeel van het onderzoek erbij te betrekken. Vooral waar we interactie van biogeochemische cycli met water onderzoeken en er een groot aantal knooppunten zijn tussen de cycli, lijkt zo'n aanpak productief en ik hoop dat ook dat we op dit terrein door ons veldonderzoek en theorieontwikkeling een bijdrage kunnen leveren.

---

<sup>11</sup> Lovelock, J. GAIA, the practical science of planetary medicine. Oxford University Press, UK.

<sup>12</sup> Rietkerk M. et al., 2002. Self-organization of vegetation in arid ecosystems. American Naturalist 160: 524-530.

## Geofysische verrassingen en de biosfeer

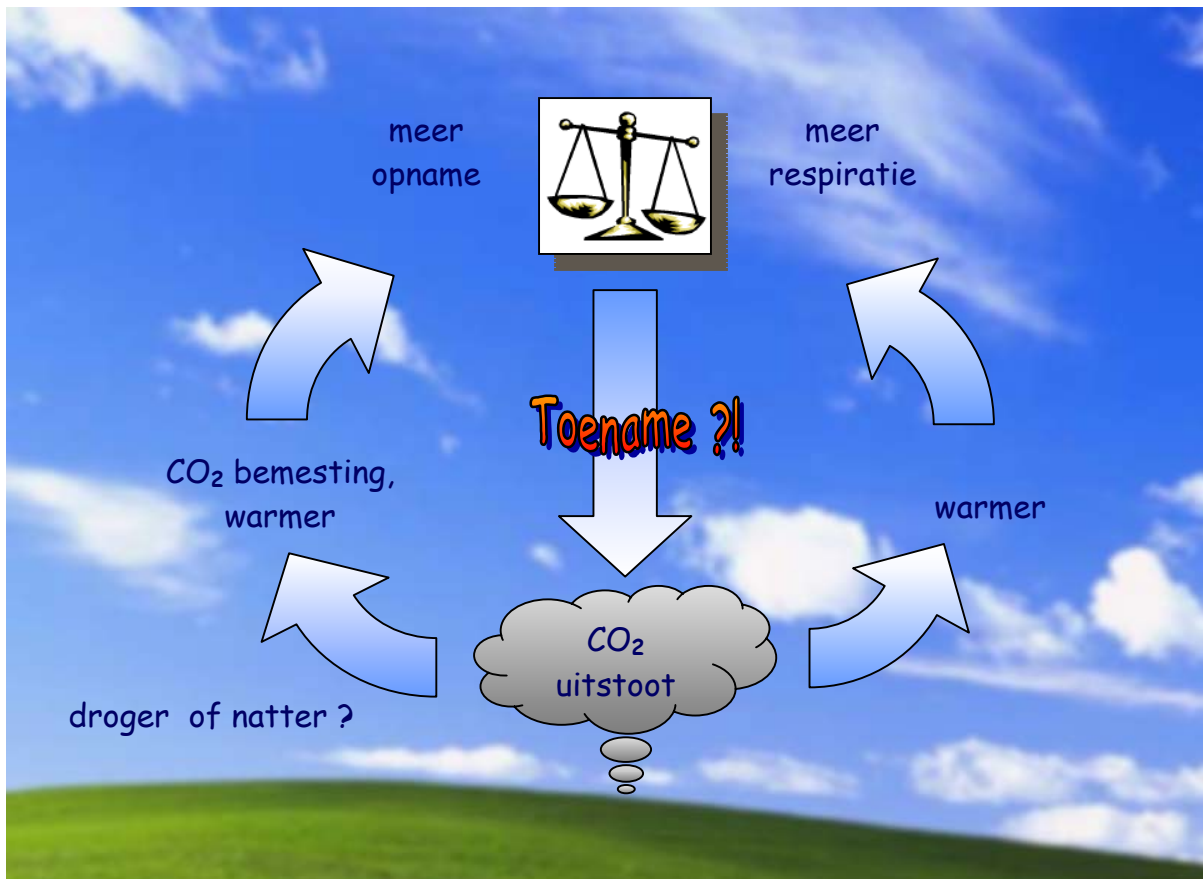


Figuur 7. Fractie atmosferisch CO<sub>2</sub> ten opzichte van de uitstoot sinds 1958

Op mondiale schaal is een van de meest bekende, zo niet meest gevreesde terugkoppeling die van het thermohaline circulatie in de oceaan, die een “aan en uit” gedrag vertoont dat grote consequenties heeft voor de veerkracht van het klimaat op aarde. Denkt u aan het anders gaan lopen van de warme golfstroom en u heeft een indruk van mogelijk consequenties. Het optreden van deze verrassingen is eigenlijk een van de grootste gevaren van klimaatverandering. Tegelijkertijd is het een van de grootste onbekende gebieden in onze kennis van klimaatverandering. Ook in de biosfeer, tussen het blauw en het groen zijn dergelijke verrassingen misschien mogelijk.

Momenteel wordt de uitstoot van CO<sub>2</sub> door verhoogde, maar natuurlijke opname in oceanen en land opgenomen. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die de atmosfeer in komt als fractie van de totale uitstoot is merkwaardig genoeg de laatste jaren nagenoeg constant gebleven op zo'n 40%, dit ondanks steeds hogere emissies. Dat houdt in dat zo'n 60% van de uitstoot van CO<sub>2</sub> als gevolg van het gebruik van fossiele brandstoffen weggevangen wordt door oceanen en land. Men zou kunnen zeggen dat het land en oceaan steeds

harder hun best doen de CO<sub>2</sub> weg te vangen. Als er geen verzadiging op zou treden in oceaan of land zou dat inhouden dat de hoeveelheid CO<sub>2</sub> steeds als een constante fractie van de uitstoot zou blijven stijgen. In ons jargon heet dit een lineaire respons van het systeem aarde op een exponentiele, externe verstoring. Dat zou echter ook inhouden dat het systeem over onbegrensde opname mogelijkheden beschikt. Dat is onwaarschijnlijk en het lijkt dan ook waarschijnlijker dat er verzadiging optreedt, het eerst op het land.



Figuur 8. De “op hol geslagen broeikas”

Model experimenten met gekoppelde koolstof en watercycli suggereren dat de biosfeer wel eens voor een positieve terugkoppeling op het versterkte broeikasgaseffect kon hebben. Twee Europese groepen<sup>13</sup> hebben inmiddels laten zien dat bij een verdere verwarming van de aarde er een verstoring in de koolstofcyclus kan optreden die er toe leidt dat er nog meer CO<sub>2</sub> in de atmosfeer zou kunnen komen. Om dit verder uit te werken moeten we ons realiseren dat het grootste deel van de koolstof op het land in de

<sup>13</sup> Cox P. M. et al., 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature 408: 184-187; Friedlingstein, P., et al., 2001 Positive feedback between future climate change and the carbon cycle. Geophysical Research Letters 28: 1543-1546.

bodem zit: zo'n 80% wereldwijd. Er bestaan grote verschillen tussen verschillende vegetatietypen in de hoeveelheid bovengrondse en ondergrondse koolstof. Alleen in tropische bossen zit het meeste koolstof bovengronds, in alle andere ecosystemen zit er meer ondergronds, bijvoorbeeld in de toendra waar slechts 5% van de koolstof in de vegetatie zit. Koolstof in de bodem heeft ook een veel langere verblijftijd dan in de vegetatie.

De voorspelling dat de opname capaciteit van de terrestrische vegetatie beperkt is, wordt gestaafd door drie observaties. De eerste is dat de huidige, versterkte opname als gevolg van verhoogde CO<sub>2</sub> concentraties uiteindelijk beperkt is door biochemische processen. De tweede observatie is dat een verhoogd CO<sub>2</sub> gehalte de temperatuur op aarde verhoogt. Alle computermodellen laten zo'n verband zien en het is ook juist deze relatie die ons zorgen baart in klimaatverandering. De derde observatie is dat de temperatuurverhoging verschillende effecten heeft op de twee primaire processen in de koolstofbalans: fotosynthese en respiratie. Uitgaande van deze drie observaties kunnen we makkelijk laten zien dat op een bepaald moment door respiratie, de aanwezige voorraden in de bodem en vegetatie sneller zullen opbranden, dan dat fotosynthese ervoor kan zorgen dat ze aangemaakt worden. Er is dan sprake van een zogenaamde sink-source transitie. En dit levert een groot probleem op want, verhoogde afbraak levert meer CO<sub>2</sub> en meer CO<sub>2</sub> maakt het alleen maar warmer. We hebben dan te maken met een run away scenario, of een op hol geslagen broeikas: positieve terugkoppeling versterkt het primaire effect van CO<sub>2</sub> uitstoot en het wordt almaar warmer.

De voor u en mij interessante vraag is natuurlijk hoe realistisch zo'n scenario is. Zoals ik al gezegd heb hebben twee Europese groepen dit scenario met behulp van gekoppelde land-oceaan-atmosfeer modellen laten zien. Ze verschillen echter wel in hun uiteindelijke uitkomsten, zo'n 200 ppm tegen het eind van deze eeuw. Dit is voor het grootste deel te wijten aan het feit dat in een van de modellen, het Engelse, een terugkoppeling optreedt tussen de koolstofcyclus en water cyclus in tropisch regenwoud. Het tropisch regenwoud sterft af en dat zorgt ervoor dat er meer CO<sub>2</sub> vrijkomt en dat versterkt het effect weer totdat vrijwel alle CO<sub>2</sub> gerespireerd is. Het netto effect is dat de wereld in dat model warmer is en de atmosfeer meer CO<sub>2</sub> bevat. Het Franse model kent deze feedback niet, maar komt ook wel op een hogere uiteindelijke CO<sub>2</sub> concentratie uit dan zonder de terugkoppeling met de koolstofcyclus. Hoe we het groen en blauw van de aarde elkaar

precies laten beïnvloeden is dus van cruciaal belang voor beter voorspellingen van de toekomst van de aarde.

Uiteindelijk kunnen we dat alleen door metingen vast stellen. Die metingen zullen we moeten uitvoeren in gebieden waar de te verwachten veranderingen groot zijn. Niet alleen in het tropisch regenwoud, maar ook bijvoorbeeld in Siberië.....

### **Toendra en taiga**

In Noord Oost Siberië om precies te zijn, waar we metingen aan de water en koolstofbalans doen bij bos en toendra systemen op permafrost. Deze gebieden zijn net



*Figuur 9 Meetlocatie nabij Chokurdak, Noord Oost Siberie (foto Matthias Zeeman)*

daarvan natuurlijk de meest in het oogspringende, maar het is vooral de combinatie van de geringe hoeveelheid neerslag, en de aanwezigheid van een permanent bevroren bodem, die deze systemen interessant maakt voor ons onderzoek. Het zijn systemen die op het randje van wat fysiologisch nog mogelijk is functioneren. Juist daar kunnen we leren wat essentieel is voor deze systemen en over hoeveel aanpassingsvermogen ze

beschikken. Op deze foto, die een aantal weken geleden genomen is op de toendra, ziet u Michiel van der Molen geflankeerd door twee van onze Russische counterparts. In de winter zijn de kleuren er wit, het groen en het blauw verschijnen in de lente als de rivieren en de bovenste laag van de bodem ontdooien.

In de bodems van de permafrost gebieden in Siberië liggen enorme hoeveelheden koolstof opgeslagen<sup>14</sup>. Klimaatverandering heeft al effecten op het voorkomen en de dikte van permafrost. En, er wordt verwacht dat deze effecten alleen maar toe zullen nemen. De koolstofvoorraden die daar opgeslagen liggen zijn in loop van eeuwen aangemaakt en de koude condities hebben ervoor gezorgd dat er grote lagen van organisch materiaal bevroren zijn gebleven.

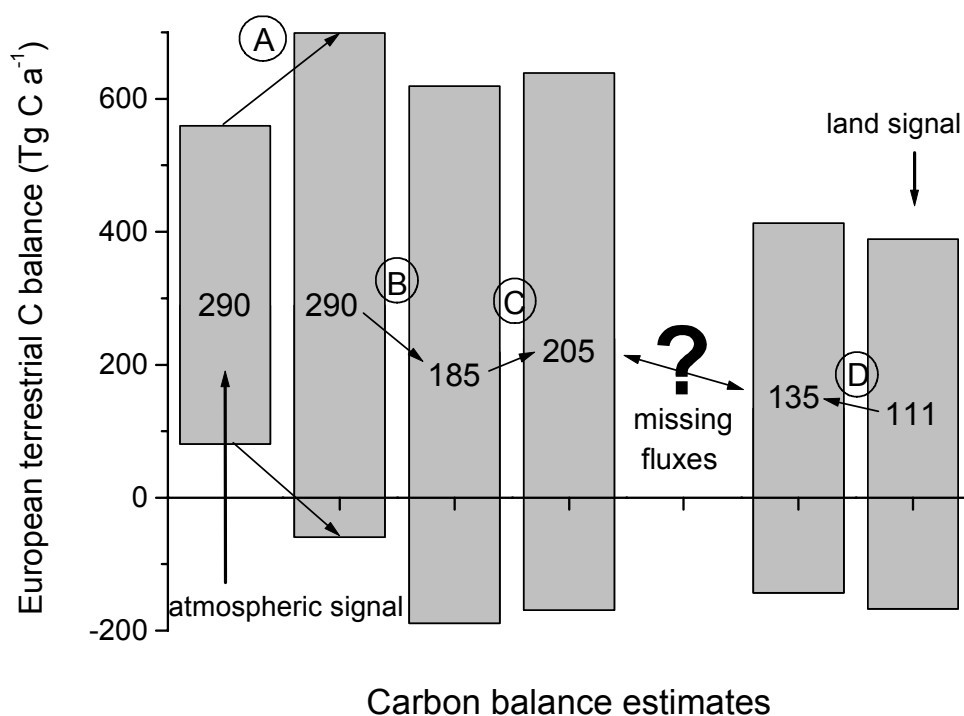
De huidige en door het IPCC verwachte temperatuurverandering op deze breedtegraden is hoger dan op de lagere breedtegraden en de mogelijke effecten op de hydrologische en koolstof zijn dan ook vermoedelijke sneller waar te nemen dan elders. Daar moeten we dus meten! Bovendien kunnen zich hier ook weer verrassingen voor doen, als de permafrost gaat smelten en er niet alleen extra CO<sub>2</sub> vrijkomt maar ook het opgeslagen methaan vrijkomt. Methaan heeft een veel sterkere broeikasgaswerking dan CO<sub>2</sub> en een grote puls van CH<sub>4</sub> worden in het geologische verleden verantwoordelijk gehouden voor abrupte klimaatveranderingen. Ik ben dan ook blij dat Ko van Huissteden met zijn kwartaargeologische kennis betrokken is bij de methaan-metingen Siberië, maar ook dichterbij huis, in de Horstermeerpolder.

### **Metten van de koolstofopname: CarboEurope**

Dit roept uiteindelijk de vraag op hoe goed we eigenlijk de koolstofbalans van het aardoppervlak kunnen meten. Weten we hoe die in elkaar steekt, en waar de gevoelige punten liggen? Het antwoord daarop is nog steeds behoorlijk negatief. Metingen met behulp van micrometeorologische methoden van de netto koolstof uitwisseling van bossen suggereren dat bossen fors meer koolstof opnemen dan dat ze uitstoten. Waar die koolstof echter blijft weten we niet. Dat weten we niet goed voor het tropisch

---

<sup>14</sup> Kolchugina T.P. en Vinson, T.S., 1993. Climate warming and the carbon cycle in the permafrost zone of the former Soviet Union. *Permafrost and periglacial processes* 4: 149-163. Christensen T.R., et al., 1999. Carbon cycling and methane exchange in Eurasian tundra ecosystems. *Ambio* 28: 239-244.



Figuur 10. Schattingen van de koolstofbalans van Europa. Van A naar C worden bij de atmosferische methoden nieuwe correcties ingevoerd (zie Janssen et al., 2003 voor details). D is de bottom up schatting op basis van inventarisaties, flux metingen en model schattingen.

regenwoud maar ook niet goed voor het Europese bos. En, onze onkunde wordt nog groter als we proberen een balans voor het Europese continent op te stellen.

Zoals we met een aantal CarboEurope collega's in een artikel, dat gisteren in Science is verschenen, laten zien<sup>15</sup>, zijn er zeer grote problemen om de koolstofbalans die we aan het aardoppervlak vast stellen te linken aan de variatie van de CO<sub>2</sub> concentratie in de atmosfeer. Schattingen van verschillende methoden lopen nog steeds ver uiteen en de onzekerheden zijn groot.

Zolang we niet precies weten waar de koolstof blijft zijn er eigenlijk twee problemen, een van wetenschappelijke en een van politieke aard. Van wetenschappelijke aard is het

<sup>15</sup> Janssen, I. et al., Europe's terrestrial biosphere absorbs 7-12 % of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. *Science* published May 22, 2003: 10.1126/science.1083592 .

probleem dat we niet goed vast kunnen stellen wat de veerkracht van de koolstofcyclus is. Ik heb daar al voorbeelden van gegeven. Politiek is het probleem dat er afspraken zijn gemaakt in het kader van het Kyoto protocol over het meetellen van de zogenoemde sinks terwijl we eigenlijk niet eens weten hoe je ze moet berekenen. In het huidige protocol fungeren sinks dan ook vooral als makkelijke reductie. Een soort makkelijke bonus zou je kunnen zeggen, maar helaas op een toch al veel te kleine afgesproken reductie, om de Rio-doelstelling van stabilisatie ook maar enigszins te benaderen.

De enige echte, goede manier om de maatregelen in het Kyoto protocol te verifiëren is dan ook om een volledige koolstofbalans van atmosfeer en land op te stellen. Zoals ik net liet zien liggen daar nog wel methodologische problemen, maar ik heb goede hoop dat we daar met het nieuw ingediende Integrated Project voor CarboEurope bij het 6-e Kader programma wel uitkomen. Reinder Ronda en Albert van Dijk in onze groep werken daar in ieder geval hard aan. Reinder met buitengewone innovatieve meteorologische methoden op regionale schaal en Albert met slimme analyses van het gedrag van bossen in Europa.

### **Ecohydrologisch onderzoek aan de VU; ofwel waar het blauw en groen elkaar raken**

Het zal uit het voorgaande duidelijk zijn dat er tal van vragen op het raakvlak van de cycli van koolstof en water, het groen en blauw van de aarde, te formuleren zijn. Het is onmogelijk en onverstandig die allemaal aan te willen pakken. Ik hoop dat ik u een beeld heb gegeven waar we ons op willen richten.

De nieuwe faculteit Aard en Levenswetenschappen aan de VU lijkt mij in Nederland bij uitstek de plek waar dit onderzoek gestalte zou moeten kunnen krijgen. Ik wil dan ook de benoemingsadviescommissie die mij heeft voorgedragen van harte bedanken voor het vertrouwen dat ze in mij hebben gesteld. Ik dank het bestuur van de toenmalige Faculteit aardwetenschappen en het College van Bestuur voor het overnemen van het advies. Ik hoop dat ik het waar kan maken...

Recent zijn de afdelingen GeoMilieuWetenschappen en Hydrologie en HydroGeologie samengevoegd met het doel een sterke grote groep van hydrologen te formeren. Ik hoop dat de heren en dames hydrogeologen en geomilieuwetenschappers zich snel thuisvoelen in de nieuwe, grotere groep. Ik denk dat daardoor in Nederland, maar ook daarbuiten, een groep is ontstaan die uniek is in de gehele breedte van de hydrologie; van grondwater tot landoppervlaktehydrologie en interactie met biogeochemische cycli. Uniek ook in zijn aandacht voor het experimentele werk, en uniek in zijn aandacht voor de rol van hydrologie in het systeem aarde. Bovendien kan intensievere samenwerking met het IVM ons werk verder ontwikkelen op het gebied van klimaat- en antropogene beïnvloeding van de hydrologische cyclus. Dit kan dan mooi in het kader van het recent opgerichte Klimaatcentrum dat naar ik hoop snel zal uitgroeien tot een belangrijke stimulerende factor voor ons type onderzoek.

Uniek is hydrologie op de VU ook op het gebied van onderwijs. Vu alumni zijn gewild en geliefd op de arbeidsmarkt en ik wil er alles aan doen om dat zo te houden en zelfs nog te verbeteren. De VU heeft een aparte masters voor hydrologie, die in zijn omvang en inbedding in de opleiding Aardwetenschappen niet alleen uitzonderlijk is voor de Nederlandse Universiteiten, maar ook internationaal. We zijn momenteel bezig om de inhoud van de opleiding nog beter aan te laten sluiten op het carrièreperspectief van studenten, en ik ben er van overtuigd dat dat lukt en dat we binnen een paar jaar een bloeiende masters hydrologie hebben neergezet, waar studenten zullen vechten aan de poort om binnengelaten te mogen worden.

Water, relaties van de hydrologische cyclus met andere biogeochemische cycli, en klimaatonderzoek staan nadrukkelijk in de belangstelling. Zowel bij NWO, het vervolgonderzoekprogramma klimaat, als bij de overheden via het ICES-KIS programma zijn mogelijkheden om ons onderzoek onder te brengen. Ik hoop dat dat lukt, want soms heb ik het gevoel dat het aanmerkelijk makkelijker is in Nature en Science te publiceren, dan een AIO-beurs bij NWO los te weken. Nu heeft dat laatste wellicht te maken met wat ik als de “vloek van Popper” zou willen kenmerken; de dwang om op korte termijn falsifieerbare hypotheses te formuleren die in gecontroleerde experimenten kunnen worden getoetst. In complexe systemen zoals die waar wij ons mee bezig houden en waar onvoorziene interacties plotseling belangrijk zijn, is juist die aanpak minder geschikt. Veel geschikter lijkt mij dan een aanpak waar langdurig elementaire functies van een systeem

worden gemonitord om zodoende inzicht te krijgen in het functioneren en de kwetsbaarheid van die systemen. Ik hoef daarvoor enkel de geschiedenis van ozon monitoring op Antarctica in herinnering te halen.

Een aanpak waarbij we ons meer richten op het monitoren en het vervolgens uiteenrafelen van complexe systemen dan op gecontroleerde experimenten, zou ons een hoop meer kennis opleveren over het gedrag van systeem aarde. Ik wil daarvoor dan ook nadrukkelijk ons gebruik van remote sensing uitbreiden; op het gebied van bodemvocht en microgolven met Ad van de Griend en Richard de Jeu en met onderzoek naar ruimtelijk heterogeniteit van water en koolstofluxen met de nieuwe Spectra satelliet van ESA.

Binnen het systeem aarde is het academisch hydrologisch onderzoek in Nederland, zeker gezien alle tegenwoordige aandacht voor water, maar bar slecht georganiseerd. Ik hoop dat de recent door de Koninklijke Academie van Wetenschappen geïnitieerde voorverkenning Hydrologie zal uitgroeien tot een volledige verkenning die een substantiële bijdrage kan leveren aan de versterking en netwerking van het hydrologisch onderzoek in Nederland. Het is zonder meer verheugend dat de eerbiedwaardige KNAW dan ook vooral jonge, net benoemde hoogleraren in die commissie heeft benoemd. Majid, Mark, Peter, Toon maar ook Alice, ik ben blij dat jullie er vandaag zijn.

Dear John, you have been a wonderful teacher for me, a role model that I know I cannot possibly match, but above all you have been a really good friend. I am glad you are here today and that our institutions are now also officially linked through a Memorandum of Understanding. I hope the VU and the Centre for Ecology and Hydrology have a long future of collaboration ahead. Een vergelijkbare overeenkomst hebben we met het UNESCO-IHE, waarbij ik hoop dat we verder kunnen samenwerken op het gebied van promoties en de mastersopleidingen.

Ik wil ook graag mijn ex-collega's van Alterra bedanken, met wie ik een aantal jaar prettig heb samengewerkt. We hebben daar samen de eerste continu-metingen van verdamping en later CO<sub>2</sub> in bossen opgezet en de geboorte van CarboEurope meegemaakt. Eddy, Bart, Pavel, Ronald, Jan en Miep bedankt.

Ik dank mijn ouders voor hun geduld met mijn opvoeding. Ik weet zeker dat ze zich regelmatig hebben afgevraagd waar ik mee bezig was, en of ik nu wel de juiste keuzes maakte. Ik zal niet zeggen dat ik dat altijd heb gedaan, maar jullie steun was er altijd.

En dan natuurlijk zijn er Jim, Wouter en Agnes; want zoals altijd, komt alles uiteindelijk toch weer op de liefde neer...

Ik heb gezegd.