



Belgisch global change onderzoek 1990-2002

Synthese van het assessment- en integratierapport



Eindbewerking:

G. den Ouden, M. Vanderstraeten

Wetenschapsschrijver:

P. Raeymaekers

Resultaten van *global change*-onderzoeksactiviteiten die uitgevoerd werden tussen 1990 en 2002 en ondersteund werden door het Belgisch Federaal Wetenschapsbeleid ondergingen in 2003 en 2004 een assessment en integratie. Dit proces betrof een selectie van de verzamelde wetenschappelijke informatie die op een vrijwillige basis werd verstrekt door Belgische onderzoekers, hetgeen resulteerde in twee rapporten:

- ✓ Belgian global change research 1990 – 2002: Assessment and integration report
- ✓ Belgisch global change onderzoek 1990 – 2002: Synthese van het assessment- en integratierapport

Dit rapport is de synthese van het assessment- en integratierapport en is ook verkrijgbaar in het Engels en Frans. Wie dieper wil graven, kan terecht in dat complete rapport. Beide rapporten leggen het zwaartepunt op de volgende vier thema's:

- ✓ Veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer
- ✓ Klimaatverandering
- ✓ Rol van de oceaan in *global change*
- ✓ Impact van *global change* op ecosystemen



Belgisch global change onderzoek 1990-2002

**Synthese van het assessment- en
integratieproject**

Eindbewerking:

G. den Ouden, M. Vanderstraeten

Wetenschapsschrijver:

P. Raeymaekers

De veranderingen op wereldschaal hebben zowel maatschappelijk als economisch grote gevolgen als men actieterreinen bekijkt zoals de hernieuwbare energiebronnen, het beheer van het vervoer, de industriële emissies, ...

Als Minister die niet alleen met Wetenschapsbeleid maar ook met Energie, Economie en Buitenlandse handel is belast, zie ik er daarom op toe dat een nauwe interactie tussen mijn verschillende bevoegdheden als een rode draad door mijn hele handelen loopt.

De algemene maatschappelijke veranderingen als gevolg van de activiteit van de mens hebben geleid tot een uitputting van de bodem, verstoringen in de oceaancirculatie, een vermindering van de biodiversiteit, wijzigingen in de atmosfeer, ... Deze veranderingen maken een omslag in de productie-, consumptie- en organisatiepatronen in onze maatschappij noodzakelijk. Voor wetenschap en technologie is in dit opzicht een fundamentele rol weggelegd die gericht is op het uitstippelen van strategieën inzake preventie, bijsturing en afzwakking van deze veranderingen.

Op economisch gebied maken toppen zoals die van Kyoto, Buenos Aires of Johannesburg het evenzo mogelijk de economie op wereldvlak te herzien om deze in het kader van duurzame ontwikkeling te integreren in ons energie-, milieu- en mobiliteitsbeleid.

Het wordt ten slotte almaar duidelijker dat het milieu voor Europa een concurrentievoordeel kan opleveren. Degelijk doordachte milieubeleidskeuzen werken innovatie in de hand, brengen nieuwe markten tot stand en versterken het concurrentievermogen via een efficiënter gebruik van de natuurlijke rijkdommen en nieuwe investeringsmogelijkheden. In die zin kunnen zij bijdragen aan het bereiken van de fundamentele doelstellingen van de strategie van Lissabon die tot doel heeft de groei te bevorderen en meer werkgelegenheid te creëren.

Om de uitdaging van Kyoto aan te nemen, is een technologische doorbraak noodzakelijk. De rol van de overheid bestaat hierin een klimaat te creëren

dat gunstig is voor deze innovatiedoorbraak in de strijd tegen klimaatveranderingen. Omdat dit beleid economische ontwikkelingen (niches) oplevert, brengt het een veelbelovende synergie (win-win) teweeg tussen de drie pijlers van duurzame ontwikkeling.

Op dit ogenblik kan zowel nationaal, Europees als internationaal alleen een geïntegreerd beleid, waarbij wetenschappers, industriëlen, politici en burgers zijn betrokken, het voortbestaan van onze planeet veilig stellen om zo dit uitzonderlijke patrimonium aan de toekomstige generaties door te geven.

Ik wens alle auteurs van het rapport "Belgian global change research 1990-2002: Assessment and integration report" te bedanken voor het uitstekende werk dat zij hebben geleverd. Dit rapport draagt bij aan een beter inzicht in de problemen waarvoor wij staan en zal een waardevol instrument zijn voor de beleidsmakers dat hen zal helpen bij het uittekenen van de geschiktste oplossingen op zowel lokaal, regionaal, nationaal als supranationaal vlak.



Marc Verwilghen
Federaal Minister van Economie, Energie,
Buitenlandse Handel en Wetenschapsbeleid

Onderzoek is de hoeksteen van alle wetenschap. Het dient om meer kennis te verwerven in de zaken om ons heen. Naarmate we meer inzicht krijgen in de verbanden tussen natuurlijke en antropogene activiteiten, is het onderzoek naar *global change* cruciaal om beleidsdoelstellingen te selecteren die gericht zijn op milieubescherming, welzijn en economische ontwikkeling. Het wordt beschouwd als de voornaamste pijler van de Europese Strategie voor Duurzame Ontwikkeling (Göteborg 2001) en van het implementatieplan van de Wereldtop van de Verenigde Naties over Duurzame Ontwikkeling (Johannesburg 2002). Het huidige Europese onderzoeksbeleid voor onderzoek naar *global change* is gericht op een versterking van de samenwerking tussen Europese en wereldwijde onderzoeksinitiatieven.

Resultaten van *global change*-onderzoeksactiviteiten die uitgevoerd werden tussen 1990 en 2002 en ondersteund werden door het Belgisch Federaal Wetenschapsbeleid ondergingen in 2003 en 2004 een assessment en integratie. Dit proces betrof een selectie van de verzamelde wetenschappelijke informatie en resulteerde in de volgende twee rapporten:

- ✓ Belgian *global change* research 1990 – 2002: Assessment and integration report
- ✓ Belgisch *global change* onderzoek 1990 – 2002: Synthese van het assessment- en integratierapport

De thematische hoofdstukken in het assessment- en integratierapport zijn opgezet rond beleidsrelevante vragen en antwoorden. Behalve beleidsondersteunende instrumenten en neutraal advies biedt dit 'state-of-the-art' kennisdocument ook een overzicht van de relevante wetenschappelijke kennis en expertise in België. Het tracht uit te leggen welke de uitdagingen zijn waarvoor *global change* ons plaatst; welke de inzichten zijn van Belgische en internationale wetenschappers omtrent *global change* en diens impact, welke hun onderzoeksresultaten zijn en hoe die tot een betere besluitvorming en beleidsontwikkeling kunnen bijdragen.

De actieve en enthousiaste medewerking van zo veel wetenschappers bij de opstelling van dit rapport en de goede collegiale sfeer onder hen bewijst dat er een 'Belgische onderzoeksgemeenschap voor *global change*' is die kennis en ideeën uitwisselt. Hoewel de taak complex was en sterk verschilde van hun dagelijkse werk, ondervonden zij dat de vertaalslag van onderzoeksresultaten naar beleidsgerichte informatie zowel een interessante als leerrijke ervaring was. Een belangrijk deel van de wetenschappers dat bijgedragen heeft aan dit proces is echter niet vertrouwd met de beleidsactoren en zien het gebied tussen deze actoren en henzelf als een schemerzone. Zij hopen dat dit rapport zal bijdragen om de kloof te overbruggen.

Om dit assessment- en integratierapport tevens toegankelijk te maken voor zowel beleidsmakers als het brede publiek, is er een samenvattende interpretatie opgesteld door een wetenschapsschrijver. Dit resulteerde in een syntheserapport dat verder werd bewerkt door G. den Ouden en M. Vanderstraeten in nauwe samenwerking met de hieronder vermelde wetenschapsredacteurs.

In België is het 'Plan voor wetenschappelijke ondersteuning van een beleid gericht op duurzame ontwikkeling' (PODO) één van de belangrijkste initiatieven die het onderzoek naar *global change* financiert. Het Belgisch Federaal Wetenschapsbeleid erkent tevens het belang van andere partners - internationale of Belgische - die een bijdrage leveren aan het financieren van Belgisch onderzoek naar *global change*.

Een speciale dank gaat uit naar de wetenschapsredacteurs van het volledige 'Assessment and integration report': R. Zander (ULg-GIRPAS), M. De Mazière (BIRA), J.-P. van Ypersele (UCL-ASTR), R. Wollast, J.-P. Vanderborgh (ULB-OCEAN), R. Ceulemans en I. Nijs (UA-PLECO). In het bijzonder wens ik hulde te brengen aan Prof. Wollast, die onlangs overleden is. Met zijn laatste bijdrage aan de productie van dit rapport bewees hij zijn wetenschappelijke expertise met een grote zin voor synthese en een totaal kijk op de problematiek van *global change*. Zijn overlijden is een groot verlies voor de wetenschappelijke gemeenschap.

Een oprechte dank gaat tevens uit naar alle wetenschappers van wie het werk de basis vormt voor dit rapport en die actief hebben meegewerkt aan het assessment- en integratieproces, naar mijn medewerkers, alsook naar de wetenschapsschrijver, vertalers en revisoren. Ik hoop dat een dergelijke vruchtbare samenwerking zal worden voortgezet.



Dr. Philippe Mettens,
Voorzitter van het Directiecomité

Nota van de Minister	3
Voorwoord	5
Introductie: global change, een wereld in beweging	
Achtergrond	9
Onderzoek naar global change	9
Complex interacties en onzekerheden	
Beleid en wetenschap	
Organisatie onderzoek	
Producten en expertise ten behoeve van beleidsvorming	12
Type resultaten	
Integratie	
Rol van Federaal Wetenschapsbeleid in onderzoek en dialoog	
1. Veranderingen in de atmosfeer	
1.1 Ozon in de stratosfeer	17
1.1.1 Ozon en het ozongat	
1.1.2 Meten om te weten	
1.1.3 Lijere ozon boven België	
1.1.4 Aërosolen in de stratosfeer	
1.1.5 De ozonlaag en impact op gezondheid en klimaat	
1.1.6 Is het ozongat onder controle?	
1.2 Teveel ozon bij de grond	26
1.2.1 De complexe chemie van troposferisch ozon	
1.2.2 Toekomstige evolutie in achtergrondconcentratie van troposferisch ozon	
1.2.3 Episodische piekconcentratie en Vluchtige Organische Stoffen (VOS)	
1.2.4 Andere precursoren dan VOS	
1.2.5 Natuurlijke VOS en aërosolen	
1.3 Mistige aërosolen in de troposfeer	30
1.3.1 Van nano tot micro	
1.3.2 Niet over één kam	
1.3.3 Natuurlijk of antropogeen	
1.3.4 Aërosolen en klimaat	
1.3.5 Aërosolen en gezondheid	
1.3.6 Europese standaarden en Belgische besluitvorming	
2. Klimaatveranderingen	
2.1 Aanwijzingen van een klimaatverandering	33
2.1.1 Temperatuur	
2.1.2 Neerslag en luchtvochtigheid	
2.1.3 Zeeniveau, ijskappen en gletsjers	
2.1.4 Zeeijs	
2.2 Anders dan vroeger?	38
2.2.1 Hoe weten zonder meten?	
2.2.3 Zeeniveau	
2.2.2 De afgelopen 1.000 jaar	
2.2.4 Abrupte klimaatveranderingen	
2.3 Oorzaken van de klimaatveranderingen in het verleden	40
2.3.1 Factoren die het evenwicht van het klimaatsysteem verstoren	
2.3.2 Uitgestelde reacties	
2.4 Broeikasgassen en aërosolen als hoofdverdachten?	42
2.4.1 Metingen	
2.4.2 Modellen	
2.5 Wat in de 21 ^e eeuw?	44
2.5.1 Wereldwijd	
2.5.2 Regionaal niveau	
2.6 Mogelijke onverwachte effecten op lange termijn	47
2.6.1 De West-Antarctische ijskap	
2.6.2 De thermohaliene circulatie	
2.6.3 Biogeochemische verrassingen	
2.7 Klimaatveranderingen en ozon	48
2.8 Redt Kyoto het klimaat?	49

2.8.1	Waarom moet het klimaat worden gered?	
2.8.2	Trage natuur	
2.8.3	Kyoto, een eerste belangrijke stap	
2.9	Op te heffen onzekerheden in verder onderzoek	52
3.	De rol van oceanen in global change	
3.1	Van een bron van CO ₂ naar een put voor CO ₂	53
3.2	Fysische, chemische en biologische pompen	53
3.2.1	Vormen van koolstof in de oceaan	
3.2.2	Van ondiep naar diep water	
3.2.3	Fysische pomp	
3.2.4	Biologische pomp	
3.2.5	Chemische pomp	
3.3	Hoe efficiënt is de oceaan als koolstofput?	56
3.3.1	Onderzoek kusten en de Zuidelijke Oceaan	
3.3.2	CO ₂ in oppervlaktewater nabij kustgebieden	
3.3.3	Biologische pomp in kustgebieden	
3.3.4	Biologische pomp in de diepe oceaan	
3.3.5	Belang van de chemische pomp	
3.3.6	Gebruik van modellen	
3.4	Belang van voedingsstoffen	60
3.4.1	Meer dan licht	
3.4.2	Stikstof	
3.4.3	Fosfor	
3.4.4	Silica	
3.4.5	IJzer	
3.5	De oceaan een handje toesteken	64
3.5.1	Bemesten of injecteren	
3.5.2	Efficiëntie van bemesten	
3.5.3	Efficiëntie van injectie	
4	Global change in ecosystemen	
4.1	Het verlies aan biodiversiteit	67
4.1.1	Effecten van diversiteit op de ecosysteemfunctie	
4.1.2	Effecten van beheer op diversiteit	
4.1.3	De ondergang van een soort voorspellen en voorkomen	
4.2	Ecosystemen en de toename aan broeikasgassen	70
4.2.1	Koolstofputten op het Belgische vasteland	
4.2.2	Andere gassen met impact op klimaat en ozon	
4.2.3	Jaarlijkse veranderingen	
4.2.4	Uitstoot van koolstof en opname in bossen	
4.2.5	Landgebruik en beheersmaatregelen	
4.2.6	Bodemverzuring en stikstofdepositie	
4.2.7	Belgische bossen in de 21 ^e eeuw	
4.3	Invloed op structuur, functie en verspreiding van ecosystemen	78
4.3.1	De productiviteit van Belgische graslanden	
4.3.2	Beheersmaatregelen	
4.3.3	Mondiale vegetatiepatronen	
4.4	Global change en impact op de waterbalans	79
4.4.1	Impact op Belgische hydrologische bekkens	
4.4.2	Veranderingen voor het grondwaterregime	
4.4.3	Veranderingen in de landbouw	
4.4.4	Veranderingen in moerasgebieden	
4.5	Drijfveren achter ecosysteemveranderingen	81
4.5.1	Initiële condities, drijfveren en feedback	
4.5.2	De sleutelfactor	
4.5.3	Socio-economische drijfveren	
4.6	Conclusies en vooruitzichten	83
	Bijlage 1 - Belgische onderzoeksinstituten	86
	Bijlage 2 - Acroniemen en afkortingen	88
	Bijlage 3 - Afkortingen van chemische stoffen en chemische formules	90
	Bijlage 4 - Eenheden	91
	Bijlage 5 - Referenties	92

Introductie: *global change*, een wereld in beweging

Achtergrond

Het wordt steeds duidelijker dat de invloed van de mens op zijn leefomgeving niet langer tot verstoringen van lokale of regionale aard blijft beperkt, maar dat hij de wereld in zijn geheel verandert. Alle wijzigingen in de leefomgeving op mondiale schaal, die trouwens ook een natuurlijke oorsprong kunnen hebben, worden met de Engelse term 'Global Change' (mondiale verandering) aangeduid.

Wijzigingen die de hele wereld beïnvloeden, zijn onder meer veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer, het klimaat, de waterbronnen, het landgebruik, de landbedekking, en ecosystemen. Volgens veel wetenschappers wordt het steeds duidelijker dat de mens in deze veranderingen een hand heeft, want hij neemt steeds meer plaats in en zet de natuur naar zijn hand. Hij consumeert de natuurlijke bronnen van de aarde en stoot met zijn industrie, landbouw, transport en woonsteden afvalstoffen uit. Die veranderen de samenstelling van de bodem, atmosfeer, rivieren, zeeën en oceanen, die op zijn beurt een invloed op het klimaat, de ecosystemen en de biodiversiteit heeft.

Al die wijzigingen hebben hun weerslag op de leefomstandigheden en gezondheid van de mens zelf. Natuurlijke goederen en voorzieningen - voedsel, water, lucht en een gezonde omgeving - kunnen onder druk komen als gevolg van de veranderingen in het wereldwijde milieu. Zo leidt de aantasting van de ozonlaag tot meer schadelijke zonnestrallen op aarde; klimaatveranderingen induceren in sommige gebieden droogtes die tot een ontvruchting van de landbouw leiden of

extreme weersomstandigheden creëren met ernstige consequenties, zoals overstromingen; veranderingen in zeestromingen en -temperatuur beïnvloeden klimaatssystemen, transportroutes en visbestanden; etc.

De mondiale milieuveranderingen nopen beleidsmakers en besluitvormers ertoe goede instrumenten te hebben om deze uitdaging aan te kunnen. Hiervoor moet dan wel het gedrag van het systeem aarde goed in kaart gebracht worden.

Onderzoek naar *global change*

Complexe interacties en onzekerheden

De precieze mechanismen waarmee menselijke activiteiten en natuurlijke processen de aarde beïnvloeden, vallen niet op een eenvoudige manier in kaart te brengen. De interacties tussen de verschillende natuurlijke componenten en met name tussen de mens en zijn leefomgeving zijn immers divers en complex. Nog moeilijker is het om de invloed van al die veranderingen op ecosystemen en ons eigen leven in te schatten of te voorspellen.

Beleid en wetenschap

Een inzicht in de wereld om ons heen en de interacties tussen mens en natuur zijn daarom een absolute noodzaak. Besluitvormers en beleidsmakers hebben nood aan onafhankelijk advies en toegang tot onderzoek en hun resultaten. Onderzoek en wetenschap leveren cruciale inzichten in het functioneren van het ecologische systeem van de aarde en dragen bij tot de inschatting van de impact van *global change*, het voorspellen van risico's, het tijdig alarm slaan als problemen zich aandienen, het ontwikkelen van indicatoren, meetinstrumenten

en duurzame technologieën, ... en zoveel meer. Onderzoek en wetenschap laten toe dat besluitvormers hun visies en besluiten voortdurend kunnen toetsen aan de realiteit en de verwachtingen van hoe de toekomst zal evolueren. Toch moet de wetenschapper zich bewust blijven van zijn beperkte rol: wetenschappelijke expertise en kennis vormen slechts één element in het proces van de besluitvorming en beleidsontwikkeling. Nationale en internationale politieke besluiten en beleidsdocumenten met betrekking tot *global change* waarmee Belgische wetenschappers te maken hadden, zijn in Bijlage 5 van het uitgebreide 'Assessment and integration report' weergegeven en omvatten de thema's luchtkwaliteit, stratosferisch ozon, klimaatsverandering, Antarctica, natuurbescherming en biodiversiteit, water, landgebruik, mariene omgeving, landbouw en bosbouw, en duurzame ontwikkeling.

Organisatie onderzoek

Wereldwijd

Aangezien *global change* een wereldwijd fenomeen met oorzaken en impact op diverse domeinen is, moet naast internationaal beleid en samenwerking ook het onderzoek over dit onderwerp wereldwijd en multidisciplinair worden aangepakt. Samenwerking binnen internationale organisaties en programma's vormt daarbij de meest efficiënte aanpak. Vandaar dat mondiale initiatieven, zoals het 'International Geosphere-Biosphere Programme' (IGBP), 'International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change' (IHDP), 'World Climate Research Programme' (WCRP) en het 'international biodiversity programme' DIVERSITAS, het onderzoek van wetenschappers over heel de wereld coördineren (zie Kader 1). Deze vier belangrijkste onderzoekprogramma's hebben sinds 2001 hun samenwerking in het 'Earth System

Science Partnership' (ESSP) geformaliseerd. De doelstelling van dit platform bestaat erin antwoorden te vinden op fundamentele vragen over de aarde als systeem en dit om pro-actieve maatregelen te formuleren die de besluit- en beleidsvorming met betrekking tot de *global change* problematiek op een wetenschappelijke manier onderbouwen. Ook de organisaties die het onderzoek sponsoren, hebben zich in een discussieplatform verenigd: de 'International Group of Funding Agencies for Global Change Research' (IGFA)

Europa

Binnende Europese onderzoeksprogramma's is de milieuproblematiek sterk geëvolueerd. Aanvankelijk richtten ze zich vooral op milieubescherming, maar in het Zesde Kaderprogramma (KP6, 2002-2006) of 'Sixth Framework Programme' (FP6) is deze in het onderzoeksluik rond duurzame ontwikkeling geïntegreerd. Eén van de prioriteiten is het onderzoeksthema 'Global Change en Ecosystemen', met als doelstelling om, op basis van wetenschappelijke inzichten, de Europese strategie voor duurzame ontwikkeling en het Zesde Milieuactieprogramma (6e MAP, 2001-2010) of 'Sixth Environment Action Programme' (6EAP) mee te sturen.

Op het Europese niveau is ook de European Science Foundation (ESF) een belangrijke speler. Met zijn 'Collaborative Research Programmes' (EUROCORES) wil de ESF nationale instellingen, die fundamenteel onderzoek subsidiëren, bij elkaar brengen en ze laten samenwerken op multidisciplinaire thema's met een relevantie op Europese schaal, waartoe ook *global change* behoort.

België

Het bestaan van internationale onderzoeksprogramma's ontslaat nationale instellingen en politieke overheden er echter

Kader 1: Internationale onderzoeksprogramma's over 'Global Change'

Vanwege het mondiale karakter van *global change* en zijn wijidvertakte invloed op diverse domeinen, dient ook het wetenschappelijk onderzoek op wereldwijde schaal te worden gecoördineerd en geïntegreerd. Dat gebeurt door de volgende organisaties:



Het 'International Geosphere-Biosphere Programme' (IGBP) richt zich vooral op de geochemische compartimenten van de aarde (oceaan, land en atmosfeer) en hun samenhang. (www.igbp.kva.se)



Het 'International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change' (IHDP) is een internationaal, interdisciplinair, niet-gouvernementeel onderzoeksprogramma met als doel onderzoek betreffende de menselijke dimensies van en in *global change* te promoten en te coördineren.

(www.ihdp.uni-bonn.de)



Het 'World Climate Research Programme' (WCRP) wil het fundamentele wetenschappelijke inzicht over het klimaatsysteem en -processen vergroten via het beter kunnen voorspellen van het klimaat en inschatten van de invloed van de mens op de klimaatverandering. (www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html)



DIVERSITAS is een internationaal onderzoeksprogramma over biodiversiteit met als doel het beleid inzake conservering van soorten en duurzaamheid te ondersteunen. (www.diversitas-international.org)



Het 'Earth System Science Partnership' (ESSP) is het platform waarin het IGBP, IHDP, WCRP en DIVERSITAS hun samenwerking hebben geformaliseerd met als doel fundamentele vragen over de aarde te beantwoorden. Die antwoorden moeten toelaten om beleidsbeslissingen met wetenschappelijke argumenten te ondersteunen zodat een duurzaam beheer van het milieu wereldwijd mogelijk wordt. (www.ess-p.org)



Het Europese 6de Kaderprogramma (KP6, 2002-2006) financiert onder meer global change onderzoek (m.n. het onderdeel 'Global Change en Ecosystemen')

met als doelstelling om de wetenschappelijke, technologische en socio-economische basis en instrumenten te ontwikkelen die nodig zijn om milieuveranderingen te bestuderen en te begrijpen. De nadruk ligt op mondiale en regionale milieuproblemen die Europa beïnvloeden zoals klimaatsverandering, verdunning van de ozonlaag, verlies aan biodiversiteit en vermindering van bodemvruchtbaarheid. (www.cordis.lu/sustdev/environment)



De 'European Science Foundation' (ESF) bevordert de ontwikkeling van Europese wetenschap in de voorste gelederen van kennis d.m.v. het samenbrengen van topwetenschappers en onderzoeks- en financieringsinstellingen om te debatteren over, en plannen en uitvoeren van Europees onderzoek in all domeinen, onder meer global change.

Eén van de initiatieven om onderzoek en networking uit te voeren is het ESF 'Collaborative Research Programmes' (EUROCORES). (www.esf.org)

niet van om het onderzoek naar *global change* nationaal en regionaal te stimuleren en te blijven ondersteunen. Hoewel *global change* een wereldwijd fenomeen is, zal de impact ervan anders zijn op de verschillende continenten en zullen er zelfs sterke verschillen optreden binnen regio's op hetzelfde continent. Lokaal onderzoek blijft dus een noodzaak.

De inschatting van de mondiale impact van *global change* en de formulering van de algemene antwoorden op hoe we ermee moeten omgaan, spruit niet onmiddellijk voort uit het lokale onderzoek. Elke individuele onderzoeker of onderzoeksgroep kan immers slechts bepaalde deelaspecten van *global change* bestuderen. Het volledige overzicht van oorzaak en impact, alsook de wetenschappelijke ondersteuning van de algemene beleidslijnen, kunnen enkel op internationaal en zelfs mondiaal, niveau worden geformuleerd. In de praktijk komt het er dus op neer dat de onderzoeksresultaten en interpretaties van de betrokken individuele wetenschappers dienen geïntegreerd te worden. Daarom is het belangrijk om de onderzoekers niet enkel in hun onderzoek te ondersteunen, maar ze ook in het opzetten en uitbouwen van nationale en internationale netwerken te stimuleren én ze de kans te geven om een plaats binnen de internationale onderzoeksprogramma's te verwerven.

Federaal Wetenschapsbeleid

Als antwoord op het internationale IGBP-initiatief startte het Federaal Wetenschapsbeleid (Belgian Science Policy Office, BELSPO) in 1990 met een eigen 'Global Change' onderzoeksprogramma. Het ondersteunt het *global change* onderzoek voornamelijk via meerjarige onderzoeksprogramma's, de financiering van federale wetenschappelijke onderzoeksinstituten, het afsluiten van bilaterale samenwerkingsovereenkomsten, haar ruimtevaartprogramma en de activiteiten die in

het 'Plan voor wetenschappelijke ondersteuning van een beleid gericht op duurzame ontwikkeling' (PODO) kaderen.

Producten en expertise ten behoeve van beleidsvorming

Type resultaten

Een overzicht van de diverse onderzoeksactiviteiten van Federaal Wetenschapsbeleid m.b.t. *global change* en voorbeelden van relevante resultaten vindt u in het uitgebreide 'Belgian global change research 1990 – 2002: Assessment and integration report' (o.a. Bijlagen 1, 2 and 3).

De, door het Federaal Wetenschapsbeleid ondersteunde, onderzoeksprojecten leiden in de eerste plaats tot een verbreding en uitdieping van de kennis. De wetenschappelijke resultaten van de projecten worden onder meer in wetenschappelijke tijdschriften en algemene media gepubliceerd en in internationale 'assessment' activiteiten geïntegreerd. Daarnaast leveren ze een aantal concrete en praktische producten op, alsook expertise die belangrijk is voor de ontwikkeling, implementering en monitoring van nationaal en internationaal beleid.

De resultaten en producten die het onderzoek heeft voortgebracht, kunnen worden onderverdeeld in metingen en inventarisaties; analyses; demonstratieprojecten en pilootstudies; beschrijvende-, voorspellende- en impactmodellen; lange termijn gegevensreeksen; databestanden; kaarten; meetinstrumenten en berekeningsmethoden; standaarden; methodologieën; handboeken; indicatoren; informatiesystemen en discussieplatforms (o.a. websites); beleidsinstrumenten en –aanbevelingen; etc. Bovendien is de wetenschapper ook onmisbaar als expert zowel in de vertaling en interpretatie van de onderzoeksresultaten naar het beleid als in de

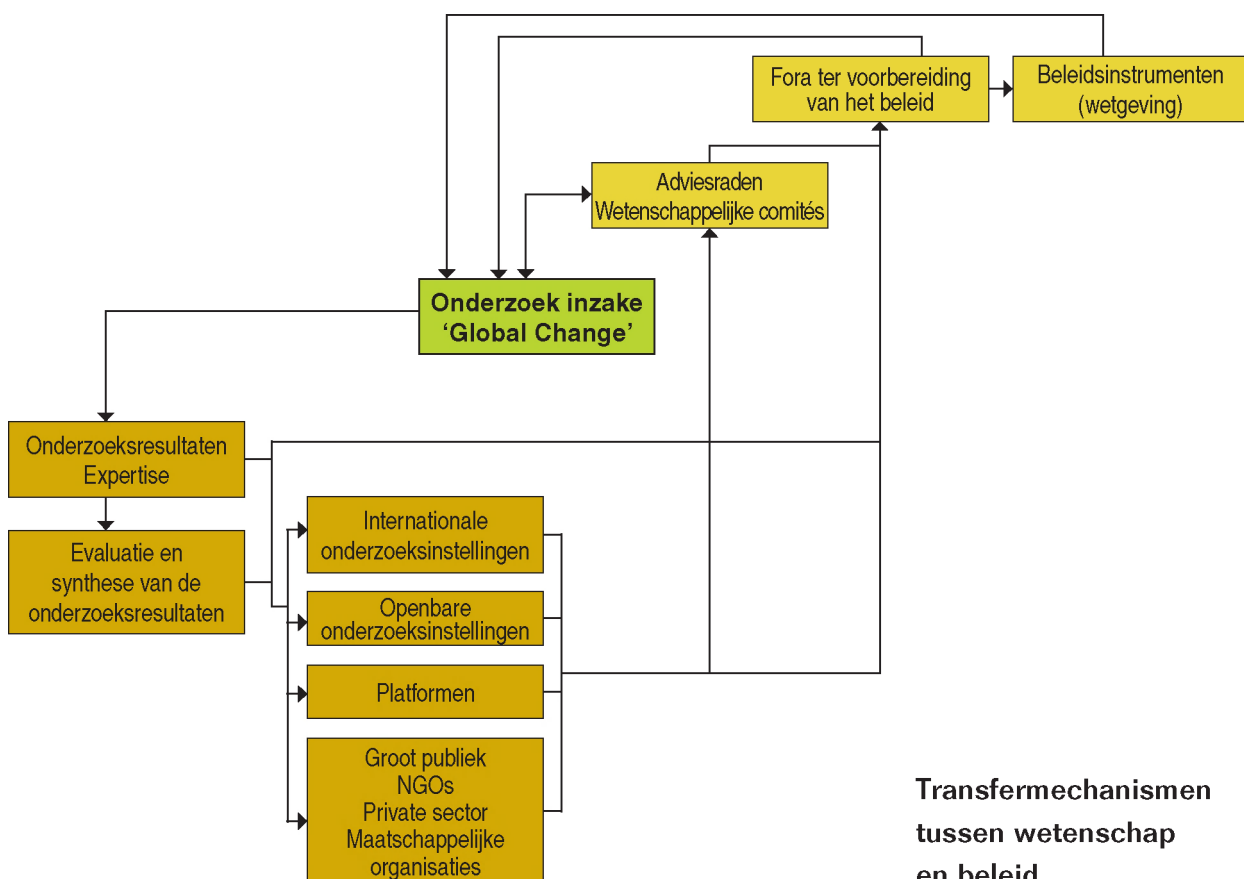
wetenschappelijke toetsing van het beleid.

Integratie

Wetenschappelijke resultaten en expertise zijn slechts bruikbaar voor beleidsondersteuning als ze op de juiste manier in het besluitvormingsproces worden geïntegreerd. Daarom is een wereldwijde en intense dialoog tussen wetenschappers en beleidsmakers onontbeerlijk. De bestaande dialoog moet verder worden geformaliseerd, geconsolideerd en versterkt. Tevens moet de kennisbasis verder worden ontwikkeld om op een effectieve en snelle manier te kunnen antwoorden op de grote uitdagingen waarvoor *global change* ons plaatst. Om die dialoog te voeren, zijn er verschillende overdrachtsmechanismen. Ze worden samengevat in onderstaande figuur.

Resultaten van wetenschappers worden wereldkundig gemaakt via diverse communicatiekanalen: wetenschappelijke

tijdschriften, overzichtspublicaties, algemene kranten en tijdschriften, voordrachten tijdens congressen, deelname aan publieke debatten, etc. Naast deze klassieke kanalen wordt er internationaal ook veel aandacht besteed aan het bij elkaar brengen van onderzoeksresultaten in synthese en assessment rapporten. Wetenschappelijke assessments bevatten gedetailleerde, maar tevens geïntegreerde state-of-the-art wetenschappelijke en technische informatie in een bepaald domein. Vaak is daaraan een synthesesrapport en/of een samenvatting voor beleidsmakers gekoppeld. Soms zijn assessments er speciaal op gericht om aan de noden van een internationale conventie tegemoet te komen. Dat is onder meer het geval voor de 'Millennium Ecosystem Assessment' ten behoeve van de Biodiversiteitconventie (UN Convention on Biological Diversity, CBD) en de Ramsar Conventie. De assessments van het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate



Change) vormden dan weer de basis voor de ontwikkeling van het Klimaatverdrag (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), terwijl de reeks van UNEP (United Nations Environment Programme) - World Meteorological Organization (WMO) wetenschappelijke assessments over de aantasting van de ozonlaag tot diverse amendementen en aanpassingen aan het Montreal Protocol leidde

Synthese en assessment rapporten bereiken, naast de nationale en internationale beleidsmakers, ook het brede publiek, NGO's, de industrie en talrijke andere maatschappelijke organisaties die op hun beurt het besluitvormingsproces beïnvloeden.

Een recent fenomeen is het bij elkaar brengen van onderzoekers en potentiële gebruikers van onderzoeksresultaten in zogenaamde thematische platformen. Dit zijn gelegenheden waarbij wetenschappers de kans krijgen om met andere wetenschappers, betrokken besluitvormers en het algemene publiek in interactie te treden. Tenslotte zorgen wetenschappers voor beleidsondersteuning en -ontwikkeling met betrekking tot de *global change* problematiek in verschillende overlegstructuren (zoals raden en comités) op lokaal, regionaal, nationaal, Europees en mondiaal niveau.

Rol van Federaal Wetenschapsbeleid in onderzoek en dialoog

Het verwerven van alle noodzakelijke wetenschappelijke kennis om de vragen over *global change* te beantwoorden, ligt ver buiten het bereik van de individuele wetenschapper, instituut, gemeenschap, land of onderzoekdiscipline. Daarom stimuleert het Federaal Wetenschapsbeleid, zoals eerder al aangegeven, onderzoeksprogramma's die binnen een internationale context kaderen. Het legt daarbij wel de nadruk op thema's waarin Belgische wetenschappers expertise hebben

of kunnen ontwikkelen.

Om aan die doelstelling te voldoen, hebben de *global change* onderzoeksprogramma's van het Federaal Wetenschapsbeleid in de loop der jaren een grondige verandering ondergaan. Zo evolueerden van monodisciplinaire naar multidisciplinaire programma's waarin naar gebruikersgroepen in projecten en een samenbrengen van projecten wordt gestreefd (zie Kader 2).

Kader 2 : Doelstellingen van het *global change* onderzoek ondersteund door het Federaal Wetenschapsbeleid:

- ✓ De wetenschappelijke kennis in België versterken.
- ✓ De politieke besluitvorming en het beleid op het regionale, federale en internationale niveau wetenschappelijk onderbouwen.
- ✓ De deelname van Belgische wetenschappers aan internationale onderzoeksnetwerken en in internationale assessment en integratie acties bevorderen.
- ✓ Netwerking en multidisciplinaire onderzoeksstrategieën aanmoedigen.
- ✓ Onderzoeksresultaten voor het beleid en het algemene publiek integreren en samenvatten.
- ✓ De dialoog tussen beleidsmakers en wetenschappers stimuleren.

1. Veranderingen in de atmosfeer



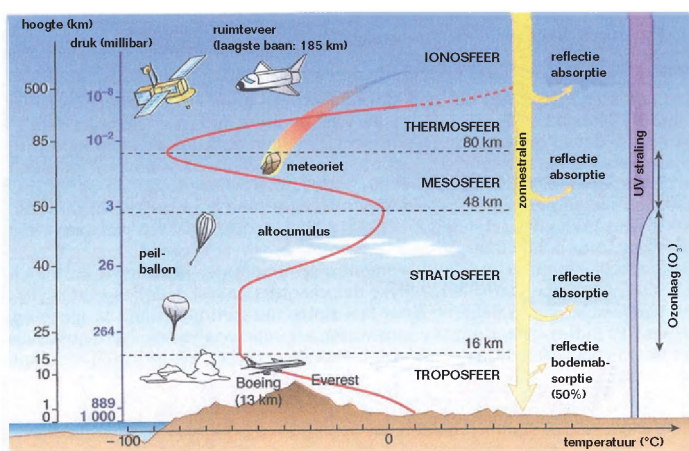
De aarde wordt omringd door een mengsel van gassen die samen de atmosfeer of de dampkring vormen. De atmosfeer bestaat uit verschillende lagen met specifieke eigenschappen (zie Kader 3). Zonder atmosfeer zou het leven op aarde onmogelijk zijn.

De samenstelling van de atmosfeer heeft in de laatste honderdvijftig jaar (het industriële tijdperk) relatief sterke wijzigingen ondergaan. Zo is onder meer de concentratie aan koolstofdioxide (CO_2) sterk gestegen, wat gevolgen voor het klimaat heeft. Ook is de hoeveelheid microscopische deeltjes (aërosolen) in de onderste luchtlagen toegenomen. Dit heeft niet alleen gevolgen voor het klimaat, maar tevens voor onze gezondheid. Toch laten niet alle veranderingen zich even gemakkelijk in lineaire verhogingen of afnamen uitdrukken:

wat ozon (O_3) betreft, doet zich in de troposfeer (het onderste gedeelte van de atmosfeer) een stijging voor, terwijl er in de stratosfeer een daling plaatsvindt (zie Kader 4). Deze is het sterkst ter hoogte van de poolgebieden, waar men van het 'gat in de ozonlaag' spreekt. Maar ook boven België zet zich een verdunning van de ozonlaag door.

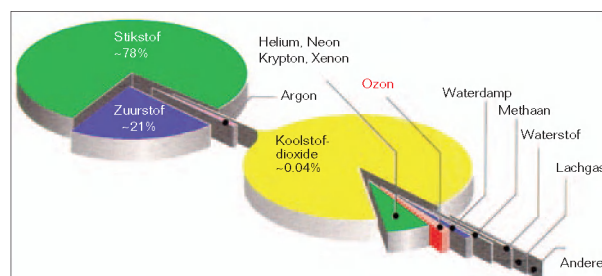
De aanwijzingen dat de mens deze veranderingen veroorzaakt, stapelen zich op. Met zijn woningen, industrie, transport en landbouw stuurt hij gassen en stofdeeltjes in de lucht die rechtstreeks of indirect een invloed op de samenstelling van de atmosfeer hebben en wat tot diverse milieuproblemen leidt. In dit hoofdstuk beperken we ons tot de ozon- en aërosolproblematiek; de klimaatverandering komt in Hoofdstuk 2 aan bod.

Kader 3: De atmosfeer, opbouw en samenstelling



De atmosfeer is uit verschillende lagen opgebouwd, die door het temperatuurverloop worden gekarakteriseerd in functie van de hoogte. In het onderste deel van de atmosfeer (de troposfeer) neemt de temperatuur geleidelijk af met de stijgende hoogte. Op ongeveer 10 km hoogte keert het temperatuursverloop om en wordt het geleidelijk aan warmer bij stijgende hoogte. Deze laag (de stratosfeer) loopt van ongeveer 10 tot 50 km hoogte. Tussen 50 tot 100 km hoogte bevindt zich de mesosfeer waar de temperatuur opnieuw daalt om dan uiteindelijk in de thermosfeer terug in een stijging om te slaan. De atmosfeer is in hoofdzaak uit stikstof (N₂, 78%) en zuurstof (O₂, 21%) samengesteld. Daarnaast bevat ze nog een waaier aan

minder voorkomende gassen. Hoewel deze in kwantiteit minder belangrijk zijn, oefenen ze toch een belangrijke invloed op het klimaat en op het wegfilteren van schadelijke zonnestrallen uit. De twee gassen die vandaag het meest in de belangstelling staan, zijn koolstofdioxide (CO₂) en ozon (O₃). De eerste heeft een concentratie van 0,04% in de atmosfeer, terwijl ozon in de stratosfeer in een concentratie van 0,0003% - 3 ozondeeltjes per miljoen luchtdeeltjes - bestaat. Naast gassen komen er ook minuscule vloeistofdruppeltjes en vaste deeltjes voor, de aërosolen. Deze hebben een diameter vanaf 1 nanometer (nm) tot meer dan 10 micrometer (µm), dat is van een miljoenste van een millimeter tot een honderdste van een millimeter.



(R. Zander, ULg-GIRPAS).

Kader 4: Ozon, de janusmolecuul

Ozon is een gas dat uit drie zuurstofatomen bestaat en door de chemische formule O₃ wordt voorgesteld. In de atmosfeer op aarde komt het op twee plaatsen voor: 90% in de stratosfeer en 10% in de troposfeer. Ozon heeft twee gezichten. In de stratosfeer vormt het ozon de 'ozonlaag'. Hier zijn de ozonmoleculen het 'beschermende gezicht' van ozon, want ze absorberen het grootste gedeelte van de ultraviolette stralen van de zon die schadelijk zijn voor het leven

op aarde. Ozonmoleculen hebben echter zelf een sterk oxiderende werking en zijn daarom ook schadelijk voor levende wezens. Daarom is het beter dat ze zich ver van de mens (in de stratosfeer bijvoorbeeld) in plaats van in zijn onmiddellijke nabijheid bevinden. Het is in dit opzicht dat ozon aan het aardoppervlak (in de troposfeer) het 'schadelijke gezicht' van het gas vormt.

Veranderingen in de atmosfeer

1.1 Ozon in de stratosfeer

1.1.1 Ozon en het ozongat

Het ozongat boven de zuidpool

Al in de periode 1970-1980 hebben wetenschappers als P. Crutzen, M. Molina en S. Rowland in het laboratorium aangetoond dat sommige gassen, die door de mens in de atmosfeer worden gebracht, cycli in gang zetten die ozon afbreken. Het gaat voornamelijk om stikstof- (N), chloor- (Cl) en broom- (Br) verbindingen. Toen al stelden wetenschappers dat deze stoffen een probleem voor het behoud van de stratosferische ozonlaag konden vormen (zie Kader 5).

Vanaf 1980 werd het probleem met het ozon in de stratosfeer ook duidelijk zichtbaar. Metingen met grond- en satellietinstrumenten hebben de afname van de hoeveelheid stratosferische ozon aangetoond. Vooral boven het zuidpoolgebied wordt een groot deel van de totale hoeveelheid ozon in de lucht (gekend als de ozonkolom) tijdens de antarctische lente (september-november) vernietigd. Aanvankelijk strekte die daling zich uit over een gebied dat 150 keer groter is dan België. Het werd echter snel duidelijk dat het gat in de ozonlaag elk jaar groter en dieper werd. In 2000 was het al vijf keer groter en werd er 70 tot 80% minder ozon gemeten dan in de periode voor 1980.

De snelle toename van het ozongat boven de zuidpool maakte duidelijk dat de katalytische cycli met stikstof-, chloor- en broomverbindingen op zich een onvoldoende verklaring boden. Onderzoek toonde aan dat de vernietigingsreacties versnellen naarmate het kouder is en er meer polaire stratosferische wolken zijn. Hier worden immers niet-actieve verbindingen in zogenaamde heterogene chemische reacties tot actieve ozonafbrekers omgezet. Ook de aanwezigheid van de zogenaamde polaire vortex speelt een belangrijke rol in dit proces (zie Kader 5).

Noorden eveneens bedreigd

Het is heel belangrijk om de evolutie van de

ozonlaag ook op het noordelijk halfrond in de gaten te houden. Want precies hier wonen de meeste mensen. Een daling van de ozonconcentraties zoals op Antarctica zou voor bijzonder ernstige gezondheidsproblemen zorgen. Want een vermindering van de ozonlaag leidt immers tot meer ultraviolette stralen van de zon op het aardoppervlak. En deze zijn schadelijk voor alle levende wezens. De mens zou hierdoor een verhoogd risico op onder meer huidkanker en oogcataract lopen.

■ Daarom organiseerde de Europese Unie (EU) een aantal grootschalige programma's om de evolutie van de ozonlaag boven het noordelijk halfrond te bestuderen. Bedoeling was na te gaan of er zich gelijkaardige fenomenen als boven Antarctica voordeden. Ook Belgische onderzoekers namen hieraan deel, onder meer via de onderzoeksprojecten European Arctic Stratospheric Ozone Experiment (EASOE), Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment (SESAME) en Third European Stratospheric Experiment on Ozone (THESEO). Momenteel loopt in dit kader het programma VINTERSOL (Validation of International Satellites and Study of Ozone Loss).

Metingen hebben uitgewezen dat er sinds het midden van de jaren 1980-1990 ook een arctisch ozongat bestaat. De vermindering is echter minder uitgesproken dan boven de zuidpool. In 1997 bedroeg de maximale vermindering bijvoorbeeld maar 22%. Bovendien zijn de jaarlijkse schommelingen van de ozonconcentraties boven de noordpool groter.

Onderzoek heeft geleerd dat de afbraakprocessen van ozon op het noordelijk halfrond gelijkaardig zijn aan deze op het zuidelijk halfrond. Ook nu weer spelen chloor-, broom- en stikstofverbindingen de hoofdrol:

Kader 5: Ozonopbouw en –afbraak: een complex kluwen van reacties

Cyclus in evenwicht

De vier reacties van de Chapman-cyclus vormen de basis voor de vorming en afbraak van stratosferisch ozon. In de eerste reactie wordt een zuurstofmolecuul (O_2) in twee zuurstofatomen (O) gesplitst door ultraviolet licht (UV) met een golflengte van 185 nm tot 220 nm (UV-C). In de tweede stap reageert een zuurstofatoom (O) met een zuurstofmolecuul uit de vorige reactie tot ozon (O_3):



Het netto-effect van deze twee reacties is de productie van ozon. Maar onder invloed van ultraviolet licht met een golflengte tussen 210 nm tot 300 nm (UV-B), valt het ozonmolecuul uiteen in een zuurstofmolecuul en een zuurstofatoom. Als deze laatste toevallig in aanraking met een ozonmolecuul komt, worden twee zuurstofmoleculen gevormd:



Deze cyclus staat in voor het grootste deel van de stratosferische ozonvorming en –afbraak, maar kan op zich niet de waargenomen concentraties van ozon verklaren. Hiervoor dienen de aanvullende katalytische cycli onder de loep worden genomen.

Katalytische cyclus

Bij wijze van voorbeeld worden de katalytische reacties van chloorverbindingen met ozon weergegeven, maar de afbraakreacties met stikstof- en broomverbindingen verlopen gelijkaardig.

Onder invloed van UV-straling worden chloorfluorkoolwaterstoffen (CFKs) afgebroken, waarbij chlooratomen (Cl) vrijkomen. De

fotolytische reactie van CCl_2F_2 (één van de meest voorkomende CFKs en ook wel eens Freon-12 of CFK-12 genoemd), bijvoorbeeld, zet een chlooratoom vrij:



En hiermee is de toon gezet. De verdere stratosferische fotolyse resulteert uiteindelijk in de volledige afbraak van het CFK met verdere vrijzetting van chlooratomen. Deze initiëren op hun beurt dan de afbraakreactie van ozon via de volgende reactiereeks:



Het halogeenatoom chloor (Cl) is een katalysator van de ozonafbraak: hetzelfde atoom dat in de eerste reactie van deze sequentie wordt verbruikt, komt in de laatste reactie opnieuw vrij.

Precies door de regeneratie van het chlooratoom in de afbraakreactie van ozon, spreken we van een katalytische cyclus. Daarom kan één enkele halogeenatoom verscheidene honderden ozonmoleculen afbreken alvorens het met een ander gasmolecuul, bijvoorbeeld methaan (CH_4), reageert en onschadelijk wordt gemaakt. Reacties van deze moleculen met een chlooratoom leiden tot zoutzuur (HCl): een stabiel reservoir voor chloor. Een andere neutralisatiereactie vindt tussen chlooroxide (ClO) en stikstofdioxide (NO_2) plaats:



Beide moleculen, zoutzuur (HCl) en chloornitraat ($ClONO_2$), zijn voor wat de

Veranderingen in de atmosfeer

ozonafbraak betreft tijdelijk 'inactief' en worden tijdelijke chloorreservoirs genoemd.

De ontdekking, zo'n 30 jaar geleden, van de katalytische reacties met chloor-, broom- en stikstofoxide en de analyse van het relatieve belang van deze reacties voor de afbraak van de ozonlaag betekende een Nobelprijs voor P. Crutzen, M. Molina and S. Rowland in 1995. Dit was tevens voor het eerst dat een Nobelprijs werd uitgereikt voor onderzoek naar de invloed van de mens op het leefmilieu. Deze ontdekking leidde in 1987 tot het Montreal Protocol van de Verenigde Naties (VN) dat de productie van industriële chemicaliën die de ozonlaag aantasten aan banden legde.

De beschuldigden

Die cyclus wordt echter door een samenloop van omstandigheden uit evenwicht gebracht. Allereerst zijn er ozonafbrekende stoffen die door industriële processen worden gemaakt en die niet uit zichzelf in de natuur voorkomen. De meest actieve en bekende ozonvreter zijn ongetwijfeld de afbraakproducten van CFKs, die in de jaren 1970-1990 massaal werden geproduceerd. Ze dienden als koelvloeistof voor koelkasten en koelinstallaties in de industrie, als drijfgas in spuitbussen, als vulgas in isolatieschuim en brandblussers, als ontvettingsmiddel en als schoonmaakmiddel bij de productie van elektronische microchips en optische onderdelen, etc. Maar CFKs zijn niet de enige ozonafbrekers. Ook sommige broomverbindingen (de zogenaamde halonen) die bij de bestrijding van bosbranden worden gebruikt, in brandvertragers zijn verwerkt of gebruikt worden bij de ontsmetting van teelaarde in kassen, breken het stratosferische ozon af. Tenslotte hebben ook sommige stikstofverbindingen, die via het gebruik van

kunstmeststoffen in de lucht komen, een negatieve invloed op de ozonlaag.

Reservoirs en koude wolken

Maar chlooratomen die voorkomen bij de ozonafbraak ontstaan ook op een andere manier: uit het chloormolecuul (Cl_2) dat aan het oppervlak van koude polaire stratosferische wolken (PSW) wordt gevormd. Deze wolken bestaan uit waterkristallen en bevatten zwavelzuur (H_2SO_4) en salpeterzuur (HNO_3). Ze hebben twee negatieve effecten op het stratosferische ozon:

- ✓ Tijdens de vorming van deze wolken wordt stikstofdioxide (NO_2) uit de atmosfeer onttrokken en in salpeterzuur omgezet. Gezien stikstofdioxide normaal een sterke neutraliseerder van de katalytische cyclus van chloor (door de vorming van ClONO_2) is, zal de ozonafbraak minder worden afgeremd.
- ✓ De polaire stratosferische wolken vormen een reactief oppervlak waarop reacties tussen een aantal gassen zich gedurende de lange polaire winter kunnen voltrekken. Dit zijn zogenaamde heterogene reacties: gassen die op een vast oppervlak met elkaar reageren. Een belangrijke heterogene reactie die zich kan voordoen, is:



Het eindresultaat is dus de opeenstapeling van chloormoleculen (Cl_2) in de donkere atmosfeer. Wanneer in de lente de zon terugkeert boven de polen, vallen deze chloormoleculen uiteen, onder invloed van het zonlicht, tot chlooratomen (Cl) die opnieuw

in de katalytische cyclus die ozon afbreekt terechtkomen.

De complexe keten van reacties verklaart meteen enkele opmerkelijke feiten:

- ✓ Waarom het ozongat boven de zuidpool zich steeds tijdens de lokale lente voordoet. De donkere en koude winterperiode is nodig opdat de 'inactieve' chloorreservoirs tot het 'actieve' chloorgas zouden worden omgezet. Pas als de zon in de lente weer boven de polaire horizon verschijnt, valt het chloorgas uiteen in chlooratomen die de ozonlaag aantasten.
- ✓ Waarom het in de atmosfeer brengen van stikstofverbindingen, naast een mogelijke rechtstreekse impact op de ozonlaag, ook een onrechtstreekse negatieve invloed heeft. Deze verbindingen worden immers tijdelijk in de polaire stratosferische wolken (PSW) opgenomen en kunnen de reactieve chlooroxides (ClO_x) niet meer wegvangen.

Sommige heterogene chemische processen kunnen ook plaatsvinden op aërosolen die bijvoorbeeld door sommige hevige vulkaanuitbarstingen in de stratosfeer zijn terechtgekomen.

Polaire vortex

Ook de aanwezigheid van de zogenaamde polaire vortex is belangrijk voor de ozonafbraakprocessen in de polaire stratosfeer. Dit is een bijzonder circulatiepatroon van winden in de stratosfeer dat zich tijdens de lokale winter boven de

polen manifesteert. In het algemeen is deze sterker boven de zuidpool dan boven de noordpool. De polaire vortex voorkomt dat de lucht in de stratosfeer boven de polen zich mengt met de lucht afkomstig uit de regio's van de middenbreedtegraden, wat leidt tot een temperatuursverlaging. Daardoor kan de lokale stratosfeer worden beschouwd als een afgesloten reactievat waarbinnen het volledige ozonvernietigingsproces op een zeer efficiënte manier gebeurt. Variaties in de grootte en diepte van het ozongat zijn het resultaat van de jaarlijkse temperatuurschommelingen en de intensiteit en duur van de polaire vortex.

Complex systeem

De voorgestelde katalytische chloorcyclus is slechts het tipje van de gehele chemie van het stratosferische ozon. Deze vindt plaats in een complexe context van tal van belangrijke factoren: de zonneactiviteit, de aanwezigheid van wolken en aërosolen, de activiteit van andere gassen en de uitwisseling van lucht tussen de stratosfeer en de troposfeer.

Bovendien doet de impact van atmosferische veranderingen zich op talrijke gebieden gevoelen: niet alleen op de ozonlaag, maar ook op de klimaatsverandering. Daarom kunnen wetenschappers er niet langer om heen de atmosfeer en de veranderingen die erin plaatsvinden, steeds meer als een geïntegreerd, multidisciplinair geheel te bestuderen. Kortom, de atmosfeer moet als een holistisch systeem worden beschouwd.

Veranderingen in de atmosfeer

CIO (chlooroxide), BrO (broomoxide) en stikstofdioxide (NO_2) zijn rechtstreeks betrokken bij de katalytische cycli die ozon afbreken. Andere verbindingen als chloordioxide (OCIO) kunnen dan weer functioneren als een indicator voor de mate waarin weinig actieve chloorreservoirs tot reactieve ozonvreter worden omgezet.

Beleid omgegooid

Als antwoord op de bezorgdheid vanuit de wetenschappelijke wereld, hebben de Verenigde Naties (VN) in 1985 de 'Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer' afgesloten. Deze overeenkomst werd in 1987 in het Montreal Protocol geconcretiseerd dat voorzagt in een aantal stappen om de productie van ozonafbrekende gasen te bannen. Alle belangrijke chemische consortia hebben zich goed gehouden aan de initiële beslissingen in het protocol, evenals aan de amendementen en aanpassingen die later werden aangebracht.

■ **De aanpassingen aan het Montreal Protocol waren het gevolg van voortdurende en meer globale atmosferische metingen, alsook nieuwe wetenschappelijke inzichten. Belgische onderzoekers hebben een sterke bijdrage aan de actualisering van het Protocol geleverd, onder meer in het kader van 'assessments' van de World Meteorological Organization (WMO) die regelmatig gepubliceerd worden. Verder nemen Belgische onderzoekers ook deel aan diverse internationale technische en wetenschappelijke panels die de besluitvorming voorbereiden.**

1.1.2 Meten om te weten

Metingen integreren

Vaak worden de veranderingen in de atmosfeer opgedeeld naar de verschillende lagen (stratosfeer en troposfeer) of de verschillende componenten zoals ozon (O_3),

aërosolen en koolstofdioxide (CO_2), elk met een eigen impact op het klimaat, gezondheid, ecosystemen, biodiversiteit, etc. Op zich is dat een logische, maar helaas vaak een te simplistische opdeling. De realiteit is immers heel wat complexer en laat zich niet zo gemakkelijk in keurige vakjes plaatsen. De stratosfeer en troposfeer zijn geen strikt gescheiden lagen in de atmosfeer. Integendeel, er is een voortdurende uitwisseling tussen beide, waardoor de chemische en fysische processen in de ene laag invloed op de andere hebben. Dat zorgt voor een extra dimensie van complexiteit voor wie de gedragingen van de atmosfeer wil doorgronden. Bovendien is die wisselwerking tussen stratosfeer en troposfeer allesbehalve constant. Ze is anders aan de polen dan aan de evenaar en verschilt naargelang het seizoen.

De koppeling tussen de verschillende subsystemen van de aardatmosfeer zorgt ervoor dat de evolutie in de samenstelling van de atmosfeer het best op een geïntegreerde manier en wereldwijde schaal kan worden bestudeerd. Bij die wereldwijde integratie van waarnemingen hoort een combinatie van meettechnieken vanaf verschillende platforms (op de grond of vanuit de lucht met o.a. stratosferische ballonnen, vliegtuigen en satellieten) en met een hele reeks van complementaire meetinstrumenten. Soms worden daarbij enkel meetgegevens 'ter plaatse' (*in situ*) verzameld, maar vaak wordt er van op afstand (teledetectie) gemeten.

■ **Sinds geruime tijd nemen Belgische onderzoekers van ULg-GIRPAS, BIRA en KMI actief deel aan het verzamelen van meetgegevens over de atmosfeer. Een groot aantal van deze activiteiten vindt plaats binnen internationale netwerken van meetstations op de grond, zoals het Network for the Detection of Stratospheric Change (NDSC). Een voorbeeld van een NDSC station dat**

door Belgische onderzoekers wordt gebruikt is in Jungfraujoch in Zwitserland (zie foto hiernaast). Maar ze leveren ook bijdragen aan satellietexperimenten, zoals het Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy Experiment (ATMOS), de Global Ozone Monitoring Experiment (GOME), de European Environmental Satellite ENVISAT, etc.

Verder participeren de onderzoekers aan Europese en internationale geïntegreerde onderzoek- en meetcampagnes, zoals EASOE, SESAME, THESEO, VINTERSOL, en het EUREKA Project on the Transport and Chemical Transformation of Trace Constituents in the Troposphere over Europe (EUROTRAC).

Belgische onderzoekers voeren niet alleen in Ukkel (Brussel) metingen uit, maar ook in Harestua (Noorwegen), Jungfraujoch (Zwitserland), Haute Provence (Frankrijk) en Saint-Denis (Ile de la Réunion). Maar om een globaal beeld te krijgen, worden ze met die van andere wetenschappers over de hele wereld gecombineerd.

Verder zijn er Belgische wetenschappers betrokken in het ontwerp en de bouw van meetinstrumenten, ijking- en validatiecampagnes, de productie van fundamentele spectroscopische en kinetische parameters van atmosferische gassen, de verwerking van meetgegevens en de ontwikkeling van algoritmen om satellietwaarnemingen om te zetten tot bruikbare en begrijpbare grootheden, zoals concentraties van atmosferische gassen en aërosolen, etc.

Modelleren om te leren en te voorspellen

Aan de hand van al deze metingen trachten onderzoekers numerieke modellen op te stellen om het gedrag van de atmosfeer en de onderliggende processen te beschrijven



Het International Scientific Station at the Jungfraujoch (ISSJ) in Zwitserland op een hoogte van 3.580 m.

en te begrijpen. Op die manier slagen ze erin om een steeds betere kennis te verkrijgen van bijvoorbeeld de mechanismen die een rol in de opbouw en afbraak van stratosferisch ozon spelen. Bovendien krijgen ze een adequater inzicht in de soort en omvang van de menselijke invloed. Ze kunnen ook de consequenties van de stratosferische ozonafbraak voorspellen en kwantificeren. Tenslotte kunnen ze met behulp van simulaties nagaan welke beleidsstrategieën het meest geschikt zijn om het stratosferische ozon en andere problemen op te lossen.

Onderzoekers aan diverse Belgische onderzoeksinstituten (waaronder BIRA en KMI) werken aan de ontwikkeling van numerieke modellen die het gedrag van de atmosfeer simuleren.

Een voorbeeld van een uniek model dat door BIRA werd ontwikkeld, is BASCOE (Belgian Assimilation System of Chemical Observations from Envisat). Dit model is bestemd om de gegevens van ENVISAT (een aardobservatiesatelliet die in maart 2002 werd gelanceerd door de European Space Agency ESA) te verwerken. Aan boord bevinden zich drie instrumenten voor de observatie van verschillende

Veranderingen in de atmosfeer

chemische bestanddelen in de atmosfeer.

De waarnemingen zijn echter niet doorlopend in de tijd, kunnen op één dag geen volledige geografische bedekking verzekeren en omvatten ook niet alle bestanddelen.

Om deze situatie te verbeteren, baseert BASCOE zich op een eerder ontwikkeld numeriek model, maar maakt tevens gebruik van concrete ENVISAT meetgegevens om de analyses van dit numerieke model zo nauw mogelijk te laten aansluiten aan de realiteit van de metingen. Het levert uniforme informatie in tijd en ruimte over de chemische samenstelling van de atmosfeer die overeenkomt met de verwerkte observaties. Op basis van de dagelijkse waarnemingen worden tevens voorspellingen over de evolutie van de chemische samenstelling van de atmosfeer voor de volgende acht dagen berekend. Het chemische assimilatie- en voorspellingsmodel BASCOE is uniek in de wereld. Het is gebaseerd op één van de meest geavanceerde methodologieën, die enkel door een aantal grote weersvoorspellingcentra wordt gebruikt. Het biedt ook een onmisbare ondersteuning aan VINTERSOL (zie paragraaf 1.1.1).

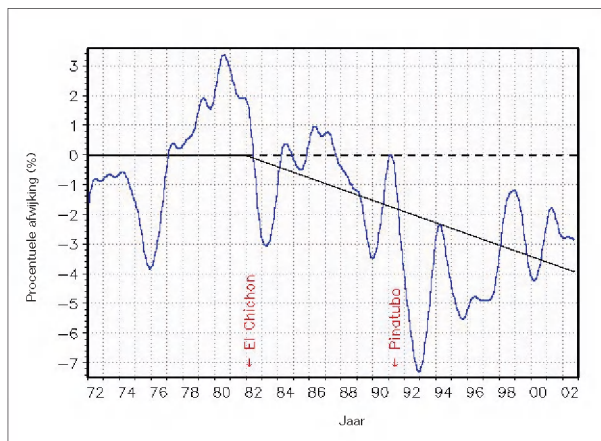
1.1.3 IJlere ozon boven België

Negatieve trend

Terwijl er sinds 1980 stratosferische ozonvernietiging vooral boven de antarctische en arctische gebieden gedurende de lokale lentes voorkomt, treedt er sinds het midden van de jaren 1980-1990 ook op middenbreedtegraad een vermindering van stratosferisch ozon op. Dit is een ontwikkeling die beter van nabij wordt opgevolgd, gezien er in deze gebieden veel mensen wonen. Een afname van de bescherming tegen ultraviolette straling (UV)

die het stratosferische ozon biedt, kan immers aanzienlijke gevolgen voor de gezondheid van de mens hebben.

In het noordelijk halfrond wordt de ozonconcentratie in de stratosfeer permanent gemeten, onder meer door Belgische onderzoekers van BIRA, ULg-GIRPAS en KMI (zie figuur hieronder). Tevens houden zij de concentraties van andere gasen en componenten die een invloed op de ozonafbraak in de stratosfeer hebben, in de gaten.



Afwijking van de totale ozonkolom (in %) ten opzichte van de gemiddelde ozonkolom boven Ukkel (Brussel) tussen 1972 en 2002. (H. De Backer, KMI).

Uit lange termijnmetingen van KMI blijkt dat de ozonconcentratie boven Ukkel daalt met gemiddeld $0,27 \pm 0,4$ % per jaar over de periode 1982 – 2002. De negatieve trend zet zich vooral door vanwege sterke negatieve afwijkingen in de winter en de lente. Naast een negatieve trend op lange termijn, zijn ook kort na de hevige uitbarstingen van de vulkanen El Chichón (Mexico, 1982) en Mount Pinatubo (Filippijnen, 1991) sterke dalingen van de ozonconcentratie boven Ukkel genoteerd. Deze natuurfenomenen zorgden er immers voor dat er grote hoeveelheden aërosolen tot in de stratosfeer zijn terechtgekomen.

- Op deze aerosolen vinden gelijkaardige heterogene scheikundige processen plaats als in de polaire stratosferische wolken (PSW).

'Mini-gaten'

Onderzoekers stelden tevens vast dat er zich van dag tot dag sterke variaties in de ozonkolom kunnen voordoen. Op sommige dagen zakt het ozongehalte, bijvoorbeeld boven Ukkel (Brussel), met 30% ten opzichte van het lange termijn gemiddelde. Wellicht zijn er geen antropogene factoren bij de vorming van deze minigaten betrokken en zijn ze eerder het gevolg van dynamische processen. Ook op andere plaatsen (Harestua in Noorwegen, Jungfraujoch in Zwitserland en in de Haute Provence in Frankrijk) werden dergelijke minigaten waargenomen.

1.1.4 Aerosolen in de stratosfeer

Spuwende vulkanen

De atmosfeer bestaat niet alleen uit gassen. Er zitten ook aerosolen in: minuscule vloeistofdruppeltjes of vaste deeltjes. Hun aanwezigheid in de stratosfeer is sterk afhankelijk van de vulkanische activiteit op aarde, gezien juist hevige vulkaanuitbarstingen soms grote hoeveelheden van deze deeltjes tot in de stratosfeer jagen. De stratosferische aerosolen bestaan voornamelijk uit een mengsel van water en zwavelzuur. Naast de invloed die deze deeltjes op het klimaat hebben (ze zijn een koelende factor - zie Hoofdstuk 2), versterken ze ook indirect de afbraak van stratosferisch ozon.

- Tijdens de afgelopen 10 jaar kregen Belgische onderzoekers de kans om stratosferische aerosolen te bestuderen. Vooral na de uitbarsting van Mount Pinatubo (Filippijnen, 1991) kwamen zij veel te weten over de verspreiding en het

- gedrag van vulkanische aerosolen in de stratosfeer. Ze verrichtten onder meer met de occultatieradiometer ORA, die door onderzoekers van BIRA werd gebouwd en zich aan boord van de EURECA-satelliet bevond, metingen van de aardse atmosfeer gedurende 7.000 zonsop- en ondergangen. Eén van de belangrijkste wetenschappelijke bevindingen van dit experiment was de distributie en evolutie van aerosolen tussen 12 en 35 km hoogte. Deze belangrijke gegevensset werd tevens gebruikt om een model voor de gemiddelde verdeling van aerosolen in ruimte en tijd te bouwen, een zogenaamde aerosolklimatologie. Zulke modellen worden onder meer gebruikt in de beschrijving van atmosferische processen met heterogene chemie. Hiermee kunnen de onderzoekers meer inzicht in de ozonafbraak verwerven en scenario's ontwikkelen om verdere afbraak tegen te gaan.

Impact van aerosolen op ozon (O₃) en stikstofdioxide (NO₂)

Zoals we al eerder stelden, zijn de heterogene chemische reacties in de ozonafbraak van groot belang. Het gaat om reacties waarbij gasvormige componenten in de stratosfeer (die in eerste instanties zelf geen ozon afbreken en daarom reservoirs worden genoemd) aan een vast oppervlak tot ozonvreter worden omgezet. In de polaire gebieden bestaan deze vaste oppervlakken meestal uit de kristallen die zich in de polaire stratosferische wolken bevinden. Vele heterogene reacties gebeuren bij extreem lage temperaturen van beneden de -78°C. Vulkanische aerosolen zijn een alternatieve drager voor heterogene chemische reacties. Zo kan aan hun oppervlak stikstofdioxide (NO₂) tot salpeterzuur (HNO₃) worden omgezet. Daarbij worden uit de atmosfeer actief stikstofdioxide (NO)

Veranderingen in de atmosfeer

en stikstofdioxide weggehaald, zodat de normale omzetting van actieve chloor- en broomradicalen in hun inactieve reservoirmoleculen chloornitraat (ClONO_2) en broomnitraat (BrONO_2) wordt tegengegaan.

Uit metingen na de uitbarstingen van El Chichón (1982) en Mount Pinatubo (1991) valt af te leiden dat de vulkanische aërosolen wel degelijk ozonafbraak in de daaropvolgende maanden hebben veroorzaakt.

1.1.5 De ozonlaag en impact op gezondheid en klimaat

Zonder ozonlaag zou het leven op aarde er wellicht helemaal anders uitzien. Het stratosferische ozon zorgt er namelijk voor dat ultraviolette stralen van de zon worden geabsorbeerd. Het gaat vooral om UV-B (280-315 nm) en in veel mindere mate UV-A (315-400 nm). Door de vermindering van het stratosferische ozon komt er meer UV-B zonlicht op het oppervlak van de aarde terecht, wat bijzonder schadelijk voor het biologische leven op aarde (en dus ook voor de gezondheid van de mens) is. Zo worden UV-B stralen geassocieerd met een verhoogde kans op huidkanker, oogcataract, zonnebrand, huidveroudering en veranderingen in het immuunsysteem.

- Onderzoekers van BIRA bevestigden dat
- een vermindering van de stratosferische
- ozonconcentratie boven Ukkel met een
- verhoging van de UV-B stralen aan het
- aardoppervlak is gecorreleerd. Om het
- publiek op de gevaren daarvan te wijzen,
- werd door een internationaal consortium
- van onderzoekers een standaard UV-index
- uitgewerkt. Deze is een maat voor de UV
- dosis die schadelijk voor de menselijke
- huid is. Voor België wordt die index
- dagelijks door KMI berekend en via het
- weerbericht in de zomermaanden aan het
- brede publiek meegedeeld.

De verandering in stratosferisch ozon heeft echter eveneens een impact op het klimaat. Door de afname ervan wordt er minder van de warmte geabsorbeerd die van het aardoppervlak terug naar de ruimte gaat. Vandaar dat het gat in de ozonlaag voor een afkoeling zorgt (impact op de stralingsbalans van $-(0,15 \pm 0,1) \text{ W/m}^2$). Sommige ozonafbrekende gasen hebben echter zelf een opwarmend effect. Toch moet ermee rekening worden gehouden dat deze effecten slechts tijdelijk zullen zijn. Want door de uitvoering van het Protocol van Montreal (dat uiteindelijk tot een verbanning van alle door de mens geproduceerde ozonafbrekende gasen moet leiden) verwachten de wetenschappers dat zowel het afkoelende effect van een lagere ozonconcentratie, als het opwarmende effect van de ozonafbrekers tegen het midden van de 21^e eeuw in hoge mate zal zijn verminderd.

1.1.6 Is het ozongat onder controle?

Zoals al eerder aangehaald, bepaalt het Protocol van Montreal een progressieve eliminatie van alle, door de mens geproduceerde, stoffen die de ozonlaag afbreken. Als eerste kwamen de meest destructieve stoffen aan de beurt. Daarbij werd niet alleen rekening gehouden met hun ozonafbrekend potentieel, maar ook met de hoeveelheden waarin ze werden geproduceerd en vrijkomen in de atmosfeer, en hun troposferische en stratosferische levensduur. Daarom pakte het protocol in de eerste plaats de chloorfluorkoolwater stoffen CFK-11 en CFK-12 aan, gevolgd door andere CFKs, methylchloroform (CH_3CCl_3), tetrachloorkoolstof (CCl_4) en de broomverbindingen (halonen). De productie van deze stoffen werd eind 1995 in de EU verboden en in praktisch alle landen die het protocol hebben ondertekend. Als gevolg daarvan begon de globale accumulatie van de, door de mens geproduceerde, chloorverbindingen zich in de atmosfeer te stabiliseren. Deze evolutie werd

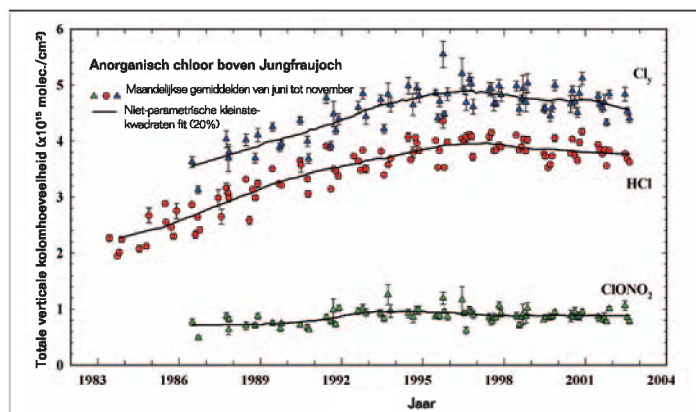
eerst in de troposfeer gemeten en zette zich later in de stratosfeer door.

Ondanks de stopzetting van de productie van halonen (broomverbindingen) vanaf 1994, is de concentratie aan broom in de atmosfeer blijven toenemen. Dit is het gevolg van de grote voorraden van deze verbindingen in de geïndustrialiseerde landen en hun verder gebruik als vuurbestrijdingsmiddel. Het probleem met de halonen is dus nog zeker niet van de baan.

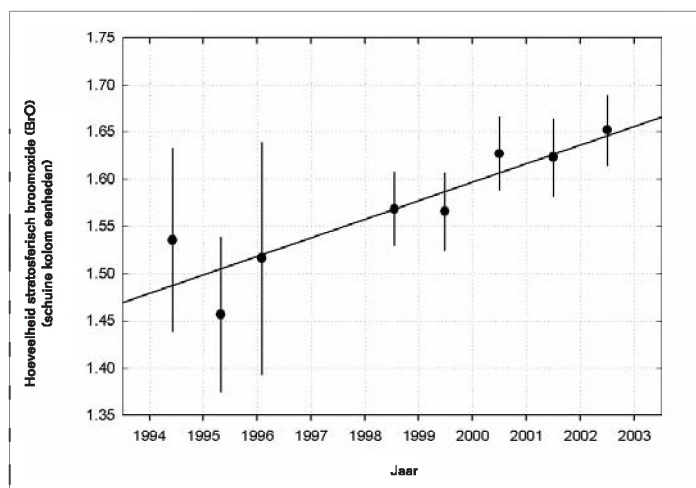
- **Continue metingen van Belgische onderzoekers van ULg-GIRPAS en BIRA hebben een sterke bijdrage geleverd aan de vaststelling dat de totale concentratie van anorganische chloorverbindingen in de atmosfeer zich stabiliseert en lichtjes daalt, terwijl de hoeveelheid anorganische broomverbindingen in de lucht blijft toenemen (zie figuren hiernaast).**

Voorspellingen op basis van modellen die uitgaan van een volledige naleving van de afspraken die in het Protocol van Montreal zijn gemaakt, geven aan dat tegen het midden van deze eeuw de atmosferische concentraties van de, door de mens geproduceerde, chloorhoudende ozonvreter tot de waarde van voor 1980 zal zijn herleid. Daarom gaan wetenschappers ervan uit dat het gat in de ozonlaag zich in de komende 50 jaar langzaam zal herstellen. Toch zijn de verschillende modellen het er niet over eens hoe snel dit herstel zal gebeuren. Daarvoor zijn er nog teveel onbekenden, zoals de effecten van een bijkomende afkoeling in de stratosfeer als gevolg van de stijgende koolstofdioxide (CO_2) concentratie, veranderingen in de atmosferische circulatie en in de uitwisseling die tussen de troposfeer en de stratosfeer plaatsvindt, etc.

Door deze onzekere factoren blijft waakzaamheid en een voortdurende meting en verificatie van de ozonconcentraties en de



Evolutie van de maandelijkse gemiddelde hoeveelheid zoutzuur (HCl) en chloornitraat (ClONO_2) boven Jungfraujoch, Zwitserland (anorganisch chloor $\text{Cl}_y = \text{HCl} + \text{ClONO}_2$). (E. Mahieu, ULg-GIRPAS).



Evolutie van de jaarlijks gemiddelde hoeveelheid broomoxide (BrO) boven Harestua, Noorwegen. (M. Van Roozendaal, BIRA).

processen die in de atmosfeer plaatsvinden, geboden.

1.2 Teveel ozon bij de grond

1.2.1 De complexe chemie van troposferisch ozon

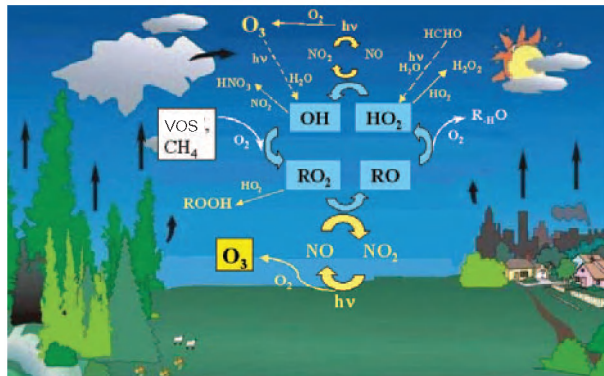
Het overgrote deel van ozon ($\sim 90\%$) bevindt zich in de stratosfeer, terwijl een minderheid in de troposfeer terug te vinden is. Gelukkig maar, want direct contact met teveel ozon is

Veranderingen in de atmosfeer

schadelijk voor alle levende wezens. Vanwege zijn oxiderende capaciteit tast ozon de luchtwegen aan, vooral bij kinderen en ouderen, maar ook bij volwassenen die last van astma hebben. Ozon veroorzaakt tevens schade aan landbouwgewassen, bossen, ecosystemen en zelfs aan materialen zoals rubber en verf. Bovendien is troposferisch ozon een broeikasgas: het absorbeert de warmtestralen die het aardoppervlak verlaten. Daarom draagt troposferisch ozon sterk bij tot de opwarming van de aarde.

We beschikken over steeds meer aanwijzingen dat het ozongehalte aan de grond in hooggeïndustrialiseerde gebieden toeneemt. Toch wordt ozon niet rechtstreeks door menselijke activiteiten voortgebracht, maar wel door een reeks chemische processen waarbij verontreinigende uitstootgassen van transport en industrie, alsook substanties afkomstig van natuurlijke processen, een cruciale rol spelen. Onder meer stikstofoxiden ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) en vluchtige organische stoffen (ook wel VOS genoemd) zoals alkenen, aromaten en terpenen, zijn belangrijk in de complexe chemie van het troposferische ozon. Sommige van die stoffen worden door de mens geproduceerd, terwijl andere uit natuurlijke processen vrijkomen.

De vorming van ozon treedt vooral bij hoge temperaturen en veel zonlicht op, vooral op warme zomerdagen dus. De troposferische ozonchemie is echter complex, een overzicht ervan vindt u in bijgaande figuur. Die chemie van de troposferische ozonvorming en -afbraak wordt zeker nog niet tot in al zijn finesses begrepen. Er zijn mogelijk wel honderden bestanddelen, chemische reacties en uitwisselingsprocessen die er deel van uitmaken, waarvan we slechts nog maar een klein aantal kennen. We kunnen dan ook spreken van een echte gordiaanse knoop.



Algemeen schema van ozonvorming en oxidatie van vluchtige organische stoffen (VOS) in de troposfeer. (J.F. Muller, BIRA; J. Peeters, KULeuven-PAC).

Fundamentele inzichten over de eigenschappen van gassen en hun onderlinge interacties vormen de basis voor een correcte interpretatie van meer praktisch gericht atmosferisch onderzoek. Zonder die fundamentele kennis zijn de meetresultaten over de samenstelling van de atmosfeer immers van weinig waarde. De afgelopen tien jaar hebben Belgische onderzoekers een belangrijke bijdrage geleverd aan deze fundamentele kennis. Zo onderzochten onderzoekers van ULB-SPECAT en BIRA de absorptie en spectroscopische eigenschappen van talrijke gassen die in de atmosfeer aanwezig zijn. Onderzoekers van KULeuven-PAC hebben vooral de chemische reacties van natuurlijke VOS in de lagere atmosfeer bestudeerd. Ze hebben zich daarbij gericht op de reacties waarbij ozon wordt gevormd en afgebroken.

Hoewel de gordiaanse knoop rond ozonvorming nog niet volledig is ontrafeld, kennen we er toch de belangrijkste drijvende kracht achter: de natuurlijke en antropogene uitstoot van stikstofoxiden (NO_x) en vluchtige organische stoffen (VOS). Die kennis heeft ertoe geleid dat er op verscheidene niveaus

in de besluitvorming en het beleid maatregelen worden genomen om het toenemende gevaar van ozonstijging in de troposfeer in te perken. Europa vaardigde diverse directieven uit om de uitstoot van de precursorgassen tegen 2010 te verminderen. Om deze objectieven te bereiken, zullen de meeste lidstaten flink in de uitstoot van VOS en NO_x moeten snoeien. Deze verminderingen worden beschreven in het Protocol van Göteborg (1999) dat voortvloeit uit de 'Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution' (CLRTAP) en de EG-richtlijn over 'National Emissions Ceilings' (NEC, 2001/81/EC). Bovendien tracht Europa met het 'Clean Air for Europe' (CAFE) programma een geïntegreerde lange termijnstrategie te ontwikkelen om de effecten van luchtvervuiling op de mens en zijn omgeving te beperken.

1.2.2 Toekomstige evolutie in achtergrondconcentratie van troposferisch ozon

De eerste resultaten van al die maatregelen zijn al merkbaar. De stijging in de jaren 1990-2000 van de achtergrondconcentratie aan troposferisch ozon is in Europa en de VS minder sterk in vergelijking met de snelle toename van de jaren 1980-1990. Dat is zeker te danken aan een afgenomen uitstoot van de voornaamste precursorgassen. Maar of dat nu een garantie biedt voor een duurzame vermindering van troposferisch ozon over de hele wereld, valt sterk te betwijfelen. De stijging van de uitstoot in landen met een opkomende industrie en transport zal de daling in de industrielanden volledig teniet doen. Onderzoekers verwachten daarom dat de achtergrondconcentratie van troposferisch ozon op mondiaal vlak eerder zal toe- dan afnemen. Als we niet oppassen, nemen we helemaal geen bocht, maar stevenen we recht op een verdere stijging af.

De impact van het troposferische ozon op het klimaat mag niet worden onderschat. Omdat

ozon warmtestralen van het aardoppervlak naar de ruimte absorbeert, heeft de stijging van het ozon een opwarmend effect van $(0,35 \pm 0,15) \text{ W/m}^2$. Dat is een positieve bijdrage aan de stralingsbalans die ongeveer 25% bedraagt van de bijdrage die de stijging van de koolstofdioxide (CO_2) concentratie met zich meebrengt sinds het begin van het industriële tijdperk.

1.2.3 Episodische piekconcentratie en Vluchtige Organische Stoffen (VOS)

Hoewel de achtergrondconcentratie aan troposferisch ozon in Noordwest Europa nog steeds met 0,5 tot 1% per jaar toeneemt, is er een duidelijke trend dat de episodische piekconcentraties afnemen. Dat wordt ook bevestigd door de rekenkundige modellen die de evolutie in piekconcentraties voorspellen en verschillende beleidsmaatregelen evalueren.

Die daling is in de eerste plaats te danken aan de vermindering van de VOS-uitstoot, zoals werd vastgelegd in het Protocol van Genève (1991) ten gevolge van de CLRTAP. België heeft dit VOS-protocol in 2000 geratificeerd, maar de doelstellingen ervan nog niet bereikt.

1.2.4 Andere precursoren dan VOS

Reducties in de uitstoot van VOS leiden inderdaad tot een verlaging van de troposferische ozonconcentratie, maar reducties van andere precursoren dringen zich eveneens op. De EG-richtlijn over 'National Emission Ceilings' (2001/81/EC) verlangt een drastische verlaging van de stikstofoxiden (NO_x) emissies. Dit zou niet enkel een effect op de ozonconcentratie hebben, maar tevens helpen om de verzuring en eutrofiëring van het milieu te bestrijden. Deze geïntegreerde benadering, met als doel de ontwikkeling van een lange termijn beleidsstrategie tegen de gecombineerde effecten van luchtvervuiling op de menselijke gezondheid en het milieu, is relatief nieuw. Ze is trouwens onder meer de kern van het recent

Veranderingen in de atmosfeer

gestarte CAFE-programma.

In dit perspectief is het voor wetenschappers van essentieel belang om de beleidsmakers te voorzien van adequate instrumenten om de impact van verschillende beleidsstrategieën te evalueren. Numerieke atmosfeermodellen zijn bijzonder geschikt voor deze taak. Ze beschrijven immers de atmosferische processen die voor ozonvorming en -afbraak verantwoordelijk zijn, zoals de emissie van precursoren, atmosferische dispersie en transport, en chemische omzetting en neerslag.

- **Het IMAGES-model (Intermediate Model for the Annual and Global Evolution of Species)** dat de onderzoekers van BIRA ontwikkelden en gebruiken, is één van de modellen dat de verandering tracht te kwantificeren van de globale samenstelling van de troposfeer als gevolg van wijzigingen in antropogene emissies.
- **Het EUROS (European Operational Smog) model** is een atmosferisch model dat de evolutie van troposferisch ozon boven Europa op lange termijn simuleert. Het model werd oorspronkelijk door RIVM (Nederland) ontwikkeld. In het kader van het BELEUROS (European Operational Smog model adapted to Belgium) project koppelden VITO en IRCEL een nieuwe versie van EUROS aan een gebruiksvriendelijke interface. Het model werd bij IRCEL geïnstalleerd als instrument voor beleidsondersteuning m.b.t. troposferisch ozon. Het laat toe om de impact van mogelijke emissiereducties op ozonconcentraties te evalueren en laat onder meer het niet-lineaire verband zien tussen de troposferische ozonconcentratie en de concentratie aan precursorgassen. Zo leidt een reductie in

- **NO_x die niet aan een gelijktijdige afname van VOS is gekoppeld, vandaag niet tot een verlaging van de ozonconcentraties, integendeel zelfs. Daarentegen leidt elke verlaging in VOS wel tot een verlaging van ozon, doch in mindere mate dan bij een simultane reductie van de VOS en NO_x emissies.**

1.2.5 Natuurlijke VOS en aërosolen

Lang niet alle ozonprecursorgassen worden door de mens uitgestoten. Op wereldwijde schaal is de emissie van natuurlijke vluchtige organische stoffen met uitsluiting van methaan (NMVOS) veel groter dan deze die door de mens wordt veroorzaakt. Ook deze natuurlijke VOS hebben een grote impact op de troposferische ozonconcentratie en de oxidatiecapaciteit (zelfreinigend vermogen) van de atmosfeer. Ze hebben immers een meervoudige invloed op ozon en radicalen. Bovendien leidt hun afbraak tot de vorming van condenseerbare verbindingen die een belangrijke bron van secundaire organische aërosolen (SOAs) zijn.

Numerieke modellen tonen aan dat de SOA-vorming als gevolg van de vrijzetting van natuurlijke VOS met een factor 3 tot 4 is toegenomen ten opzichte van het pre-industriële tijdperk. Een behoorlijke kwantificering van dit fenomeen is echter zeer moeilijk. Dit komt omdat de emissiemodellen voor natuurlijke VOS bijzonder simplistisch zijn: de emissies worden als eenvoudige functies van temperatuur, licht en type ecosysteem berekend. Dat staat in schril contrast met de bijzonder complexe chemie van deze natuurlijke VOS. Duizenden organische componenten en reacties moeten in beschouwing worden genomen, want ze hebben allemaal een invloed op de atmosfeer. De meeste van die componenten zijn echter niet eens in het laboratorium bestudeerd. Er is dus nog werk aan de winkel voor de onderzoekers

om de troposferische ozonproblematiek verder te ontrafelen.

- Zo is ook de invloed van monoterpenen, een belangrijke klasse van natuurlijke VOS, op de samenstelling van de atmosfeer nog onvoldoende gekend. Monoterpenen worden vooral uitgestoten door bomen. Met behulp van moderne massaspectrometrische technieken trachten onderzoekers van KULeuven-PAC, en recent BIRA, de chemie van diverse monoterpenen te ontrafelen. Een goed inzicht in de oxidatieprocessen van deze VOS laat toe om beter te in te schatten wat de bijdrage is van antropogene versus natuurlijke VOS tot de ozonchemie en de oxidatiecapaciteit van de atmosfeer.

1.3 Mistige aerosolen in de troposfeer

1.3.1 Van nano tot micro

De atmosfeer bestaat niet alleen uit gassen: er zitten ook aerosolen in. Dat zijn kleine vloeistofdruppeltjes of vaste deeltjes met een diameter van 1 nanometer (nm) tot meer dan 10 micrometer (µm). Deze deeltjes komen gedeeltelijk via natuurlijke processen in de lucht, maar er zijn aanwijzingen dat de concentratie van aerosolen vanaf de 20^e eeuw aanzienlijk is toegenomen als gevolg van menselijke activiteiten. Een groot gedeelte van deze nano- en microdeeltjes wordt vaak rechtstreeks in de lucht geïnjecteerd (denk maar aan stofdeeltjes van de bodem, zeezout, roetdeeltjes, vliegias, industrieel stof, biogene deeltjes, etc.). Maar in de atmosfeer zelf kunnen ook aerosolen uit gasvormige moleculen worden gevormd, zoals sulfaten, nitraten, ammonium en organische stoffen. Deze worden ook wel eens secundaire aerosolen genoemd.

1.3.2 Niet over één kam

Aerosolen spelen een belangrijke rol bij tal van chemische reacties in de atmosfeer. Ze beïnvloeden bovendien het klimaat en hebben een negatieve invloed op de gezondheid en het welzijn van mens en dier. Niet alle aerosolen kunnen echter over één kam worden gescheurd. Hun invloed is afhankelijk van hun chemische samenstelling en de grootte en vorm van de deeltjes. Ook de gezondheidsrisico's van aerosolen zijn heel sterk afhankelijk van deze parameters.

- Wetenschappers van UGent-INW zijn al gedurende verscheidene jaren in het aerosolonderzoek actief. Ze hebben daarvoor instrumenten ontworpen waarmee ze de concentratie van aerosolen in de troposfeer kunnen meten, alsook methodes om de fysisch-chemische eigenschappen ervan te bepalen. Daarbij verzamelen en analyseren ze aerosolmonsters in België, Finland, Noorwegen, Israël en Zimbabwe.

1.3.3 Natuurlijk of antropogeen

Door het meten van de grootte en de chemische samenstelling van aerosolen, is het vaak mogelijk de oorsprong (natuurlijk of antropogeen) te bepalen en daarna ook de verspreiding ervan. Dat is van belang om de juiste beleidsmaatregelen te kunnen nemen.

- Zo konden onderzoekers van UGent-INW aan de hand van chemische en fysische analyses aantonen dat in de zomer op Spitsbergen (Noorwegen) 30% van de sulfaatdeeltjes in de lucht afkomstig is van een natuurlijke bron: de emissie van dimethylsulfide (DMS) door marien fytoplankton. De rest is antropogeen. In de winter en de vroege lente is alle fijn sulfaat daarentegen van menselijke activiteit in

Veranderingen in de atmosfeer

- Azië en Europa afkomstig.
- Bij hun metingen in equatoriale en tropische gebieden zagen de onderzoekers hoe in het droge seizoen bijna alle fijne stofdeeltjes van het verbranden van biomassa afkomstig zijn. In Transvaal (Zuid-Afrika) is dan weer slechts 40% van deze bron afkomstig; 33% van de fijne stofdeeltjes bestaat uit sulfaat dat vooral van de energiecentrales en industriële activiteiten op het 'Transvaal Highveld' afkomstig is.
- Sinds enkele jaren wordt in samenwerking met UA-Phar ook een gedetailleerde organische analyse van de aerosolen uitgevoerd. Daaruit kan verder worden afgeleid door welk type menselijke activiteit de aerosolen ontstaan. Chemici en fysici van UA-MiTAC gebruiken dan weer verschillende microscopische technieken om aerosoldeeltjes van over heel de wereld te onderzoeken.

1.3.4 Aerosolen en klimaat

De precieze invloed van een aerosoldeeltje op de stralingsbalans van de aarde is afhankelijk van zijn afmeting en samenstelling. De meeste troposferische aerosolen hebben een rechtstreekse negatieve impact op de stralingsbalans omdat ze invallende zonnestralen reflecteren. Roet daarentegen levert een positieve bijdrage omdat het de zonnestralen absorbeert. Toch kan er worden gesteld dat aerosolen in de troposfeer voor een netto negatieve bijdrage op de stralingsbalans zorgen. Maar die compenseert weliswaar slechts gedeeltelijk de positieve impact die van de toename van broeikasgassen uitgaat.

Tot slot hebben aerosolen ook een indirect negatief effect op het klimaat omdat ze de wolkenvorming beïnvloeden. Deze zou wel eens bijzonder groot kunnen zijn, maar het blijft nog heel moeilijk om dit effect nauwkeurig in te schatten.

1.3.5 Aerosolen en gezondheid

Aerosolen hebben een invloed op de gezondheid. Ze zorgen voor ademhalingsproblemen en cardiovasculaire stress. Sommige aerosolen zijn ook mutageen of carcinogeen. Ook nu weer hangen de gevolgen voor de gezondheid af van de fysisch-chemische eigenschappen van de stofdeeltjes. Zo zullen deeltjes van groter dan 10 micrometer zelden in de longen terecht komen omdat ze door de filterende haartjes in de neus worden opgevangen. Deeltjes tussen 5 en 10 micrometer (μm) zetten zich in de bovenste luchtwegen neer, deze van tussen 1 en 5 μm in de bronchiën en deeltjes kleiner dan 1 μm dringen tot in de fijnste longblaasjes door. Bovendien zijn zowel het onmiddellijke irriterende (astmatische) als de secundaire schadelijke effecten (longfibrose en vermindering van de elasticiteit van de longblaasjes) afhankelijk van de chemische samenstelling. Precies daarom is chemische en fysische karakterisering van aerosolen noodzakelijk.

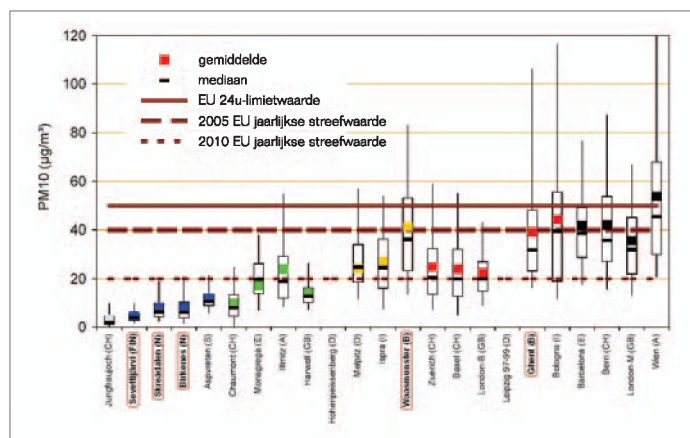
Er zijn nu al diverse epidemiologische studies uitgevoerd die een verband leggen tussen blootstelling aan fijne deeltjes in de lucht en een verhoogde mortaliteit en morbiditeit. Maar ook de aanwezigheid van aerosolen in gebouwen moet in het oog worden gehouden, want de Westerse mens brengt gemiddeld 80% van zijn tijd binnenskamers door. In woon-, leef- en werkvertrekken is tabaksrook de belangrijkste bron van fijne stofdeeltjes.

- UA-MiTAC is betrokken bij een aantal epidemiologische studies om de gezondheidseffecten van fijne stofdeeltjes in zowel de buiten- als binnenlucht te kwantificeren. De onderzoekers vonden onder meer dat astma zich zowat 2,5 keer meer manifesteert bij jongvolwassenen in het centrum van Antwerpen dan bij dezelfde bevolkingsgroep in de meer landelijke gebieden.

1.3.6 Europese standaarden en Belgische besluitvorming

De EG-wetgeving voor aërosolen wordt uitgedrukt in termen van richtwaarden voor PM10 – ‘particulate matter’ (fijnstof) met een diameter $<10\ \mu\text{m}$. Vanaf januari 2005 mag de limietwaarde van $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 over een tijdsspanne van 24 uur slechts 35 keer per jaar worden overschreden en mag het jaargemiddelde slechts $40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 bedragen. Tegen 2010 zullen zowel de limietwaarde als de jaarstandaard worden teruggebracht; de jaarstandaard wordt dan $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$.

- Onderzoekers van UGent-INW voerden
- aërosolmetingen uit in de Belgische
- gemeenten Gent en Waasmunster
- (zie figuur hiernaast). Ze voerden
- tevens metingen uit op drie plaatsen
- met ‘zuivere’ lucht in het landelijke
- Scandinavië. De resultaten werden
- geïntegreerd met deze van andere
- Europese onderzoeksgroepen in een
- project dat door het Gemeenschappelijk
- Centrum voor Onderzoek van de EC (EC-
- Joint Research Centre JRC) van Ispra
- (Italië) werd gecoördineerd. De gepoolde
- metingen toonden aan dat de hoeveelheid
- aërosolen met een diameter lager dan 10
- micrometer (μm) tot vijf keer hoger ligt in
- steden dan in landelijke gebieden. Vooral
- nabij drukke autowegen in de steden is
- de concentratie onrustwekkend hoog. Er
- zullen nog heel wat inspanningen nodig
- zijn om de Europese richtwaarden voor
- 2005 en vooral deze voor 2010 te halen.
- In het bijzonder het autoverkeer komt uit
- deze studie naar voor als een belangrijke
- boosdoener.



Aërosol concentraties op verschillende plaatsen in Europa. Alleen aërosolen met een diameter $<10\ \mu\text{m}$ werden in rekening gebracht. (Putaud et al, 2002; W. Maenhaut, UGent-INW).

2. Klimaatveranderingen



Om te weten of de huidige klimaatveranderingen een ongewoon verschijnsel zijn, moeten ze getoetst worden aan de klimaatvariabiliteit op langere termijn. Tijdens de laatste honderdduizenden jaren was de belangrijkste verandering wereldwijd de afwisseling van glaciële en interglaciële perioden. Vele factoren beïnvloeden ons klimaat, in hoofdzaak de stand van de aarde ten opzichte van de zon, de zonneactiviteit, de broeikasgassen, sommige atmosferische polluenten en de vulkanische activiteit. De studie van de klimaatveranderingen in samenhang met die verschillende factoren toont de impact van de menselijke activiteiten en maakt projecties mogelijk over de klimaatontwikkeling. Enige achtergrondinformatie is weergegeven in Kaders 6 en 7.

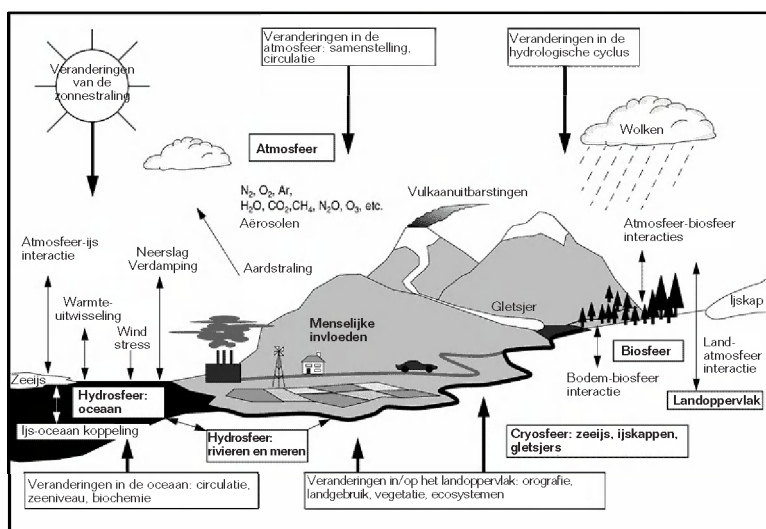
2.1 Aanwijzingen van een klimaatverandering

Het klimaat is aan het veranderen zoals blijkt uit tal van waarnemingen die wijzen op een stijging van de gemiddelde temperatuur en een toename van de neerslag over een groot deel van het aardoppervlak, het afsmelten van de gletsjers en de Groenlandse ijskap alsook de inkrimping van het met ijs bedekte oceaanooppervlak.

Kader 6: Definitie van het klimaat

Eenvoudig gedefinieerd is het klimaat het gemiddelde weer over een lange periode. Meer gedetailleerd kan het klimaat worden gedefinieerd als een statistische beschrijving - in termen van gemiddelde en variabiliteit - van een aantal relevante parameters zoals temperatuur, neerslag en wind, gemeten over een bepaalde periode. Meestal overspant die periode dertig jaar.

Kader 7: Het klimaatsysteem



Schematisch overzicht van de componenten van het klimaatsysteem, hun processen en interacties en sommige aspecten die kunnen veranderen. (IPCC-TAR - Climate Change 2001: The Scientific Basis).

hydrosfeer, de cryosfeer, de geosfeer en de biosfeer alsook hun interacties. De hydrosfeer omvat de oceanen, zeeën, waterlopen, meren en het grondwater. De cryosfeer bestaat uit het geheel van de sneeuw- en ijsbedekking en de permafrost (permanent bevroren grond). De biosfeer tot slot bestaat uit de ecosystemen en de levende materie (met inbegrip van het daarvan afkomstig dood organisch materiaal).

Het klimaat op aarde wordt bepaald door externe factoren zoals de zonne-energie die door de aarde wordt opgevangen en interne processen zoals de atmosfeer- en oceaancirculatie en hun interacties. Het zijn nu precies die interne processen die aan het werk zijn in het klimaatsysteem. Het klimaatsysteem omvat vijf grote componenten, te weten de atmosfeer, de

Het klimaatsysteem evolueert in de loop van de tijd onder de invloed van zijn eigen interne dynamiek en als gevolg van externe forceringen zoals vulkaanuitbarstingen, de variabiliteit in de zonneactiviteit of forceringen ten gevolge van menselijke activiteiten (bijvoorbeeld de variërende samenstelling van de atmosfeer of veranderingen in het bodemgebruik).

2.1.1 Temperatuur

De opwarming van de aarde blijkt vooral uit:

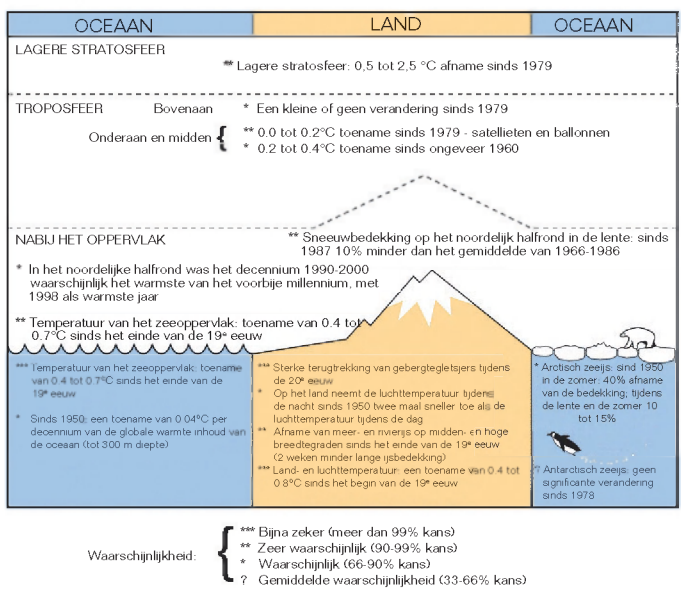
- ✓ De stijging van de gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak met 0,6 °C in de 20^e eeuw. In het noordelijk halfrond was het decennium 1990-2000 waarschijnlijk het warmste van het voorbije millennium (met 1998 als het warmste jaar).
- ✓ Sinds het einde van de jaren 1960-1970 is het met ijs of sneeuw bedekte aardoppervlak met 10% ingekrompen. Verder hebben de

berggletsjers in niet-polaire gebieden zich in de 20^e eeuw sterk teruggetrokken. Er is een sterk verband tussen de temperatuurstijging aan het aardoppervlak en de verminderde sneeuw- en ijsbedekking.

De figuur hierna toont een overzicht van de belangrijkste temperatuurindicatoren. Het lijkt vast te staan dat de snelheid en de duur van de opwarming die sinds de 20^e eeuw wordt geobserveerd een grotere rol spelen dan alle temperatuurschommelingen in de laatste duizend jaar.

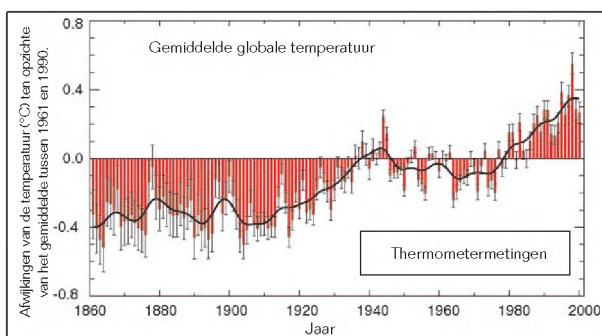
Klimaatveranderingen

a) Temperatur Indikatoren



Schema van waargenomen variaties bij diverse temperatuurindicatoren. (IPCC-TAR - Climate Change 2001: The Scientific Basis).

De sterkste temperatuurstijgingen sinds de 19^e eeuw vonden in twee perioden plaats, met name tussen 1910 en 1945 en vanaf 1976. Zoals uit de volgende figuur blijkt, steeg de temperatuur vanaf 1976 met 0,15 °C per decennium. De tot nu toe hoogste gemiddelde temperatuur werd in 1997-1998 gemeten (toen ook het El Niño-fenomeen opdook).



Afwijkingen in de jaarlijkse oppervlaktetemperatuur tussen 1861 en 2000 ten opzichte van het gemiddelde tussen 1961 en 1990. (IPCC-TAR - Climate Change 2001: The Scientific Basis).

In de laatste decennia steeg de temperatuur bijna overal op aarde, maar het

sterkst ter hoogte van de middenbreedtegraden en de hoge breedtegraden van het noordelijk halfrond.

De stijging van de gemiddelde temperatuur is ook in het KMI in Ukkel (Brussel, België) waargenomen: in de laatste 170 jaar werd een verhoging met 1 tot 2 °C opgetekend. De opwarming in Ukkel gebeurde niet geleidelijk, maar eerder stapsgewijs (vooral rond 1910 en 1985).

Onderzoekers van UGent-PAE, KMMA-GEO, UCL-ASTR en FUNDP-URBO hebben ook een opwarming opgemeten in de tropische gebieden. Volgens hun metingen is tijdens het laatste decennium de luchttemperatuur in Bujumbura en Mbala (respectievelijk het meest noordelijke en zuidelijke punt van het Tanganyikameer in Oost-Afrika) met 0,7 tot 0,9 °C gestegen. Naast die opwarming hebben ze ook de impact op het meer van de El Niño Zuidelijke Oscillatie gemeten. Het El Niño fenomeen in die regio doet de temperatuur, het aantal uren zonneschijn en de luchtdruk stijgen en de windsnelheid dalen. Uit de eerste onderzoeken blijkt dat de diepe nutriëntrijke waterlagen zich in een El Niño-jaar minder vermengen met de bovenste waterlagen, met hoogstwaarschijnlijk een lagere biologische productiviteit in het Tanganyikameer tot gevolg. Zo wordt minder vis gevangen, wat gevolgen heeft voor de sociaal-economische situatie van de lokale bevolking (zie Kader 8).

2.1.2 Neerslag en luchtvochtigheid

In het noordelijk halfrond is, op een groot gedeelte van het vasteland op de middenbreedtegraden en de hoge breedtegraden, de hoeveelheid neerslag meer dan waarschijnlijk met 5 tot 10% toegenomen in de laatste honderd jaar. Die waarneming moet in verband worden gebracht met een wellicht forse

Kader 8: El Niño, niet echt een kerstgeschenk

El Niño is in de oorspronkelijke betekenis van het woord een warme zeestroming die periodiek voorkomt langs de kusten van Ecuador en Peru. El Niño betekent letterlijk 'het Kerstkindje', een naam die door de Peruaanse vissers gegeven werd, omdat zij om de 3 tot 7 jaar rond Kerstmis alle vis voor de kust van Peru zagen verdwijnen.

Die toevoer van warm water verhindert immers het opstijgen van koud water dat rijk is aan voedingsstoffen, wat zich in normale omstandigheden in die regio voordoet.

Tot in de jaren 1960-1970 werd dat fenomeen als een zuiver regionaal verschijnsel beschouwd.

Dat oceaafenomeen houdt verband met fluctuaties in de luchtdrukconfiguratie en in de circulatie in het intertropische gedeelte van de Indische en de Stille Oceaan, de Zuidelijke Oscillatie genaamd. De combinatie van die atmosferische fenomenen en oceaafenomenen wordt El Niño Zuidelijke Oscillatie (ENSO) genoemd.

Bij het El Niño-fenomeen verzwakken de steeds van oost naar west blazende passaatwinden en wordt de equatoriale tegenstroming versterkt. Dankzij die afnemende wind die naar het westen blaast, kunnen de warme oppervlaktewateren van de Indonesische zone zich naar het oosten verplaatsen waar zij de Peruviaanse wateren bedekken. Dit fenomeen heeft een belangrijke invloed op de wind, de temperatuur van het zeeoppervlak en de neerslag in de tropische

gebieden van de Stille Oceaan. Dat heeft gevolgen voor het klimaat in de Stille Oceaan en in talrijke andere regio's in de wereld, wat pas in de jaren 1960-1970 werd ontdekt. El Niño veroorzaakt droogtes in Zuidoost-Afrika en Noord-Brazilië, terwijl de westkust van het Amerikaanse continent met overvloedige regenval en overstromingen te kampen heeft. Het jaar na El Niño volgt een La Niña waarbij het oceaانwater kouder is dan normaal, met tegenovergestelde gevolgen.

Ook in Oost-Afrika blijkt het klimaat door ENSO te worden beïnvloed. Met behulp van satellietbeelden bestuderen onderzoekers of er abnormale regenval en plantengroei is telkens als het ENSO-fenomeen zich voordoet. Uit de eerste resultaten blijkt dat een gebied ten noordwesten van het Tanganyikameer en de Kivustreek in Congo sterk door ENSO worden beïnvloed.

El Niño is geen tijdelijk fenomeen, maar wel een fenomeen dat sinds eeuwen al zeer regelmatig terugkeert. Die regelmaat blijkt evenwel verstoord te zijn sinds de jaren 1970-1980, wat doet vermoeden dat het broeikaseffect daarop een invloed heeft.

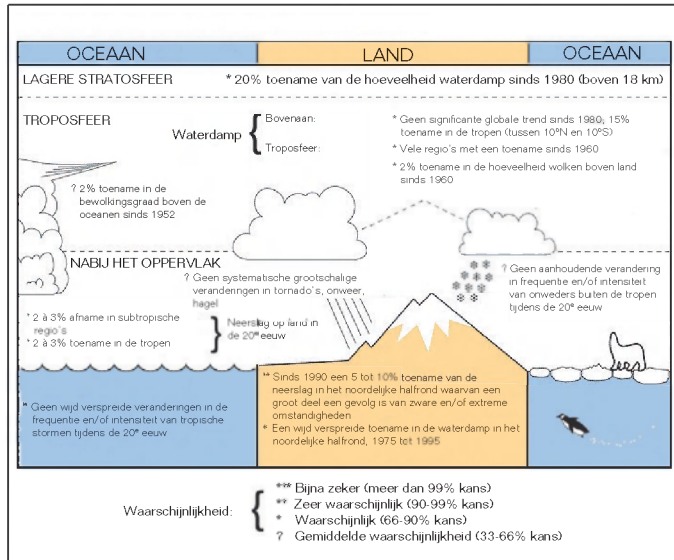
Het El Niño-verschijnsel in 1991-1992 veroorzaakte in Zuidelijk Afrika de ergste droogtes van de afgelopen eeuw die bijna 100 miljoen mensen troffen. Tijdens El Niño van 1997-1998 kampten Kenia, Soedan, Oeganda en omliggende landen met hevige overstromingen.

toename van de luchtvochtigheid, waardoor er meer water beschikbaar is voor neerslag. De frequentie van periodes met hevige neerslag is gestegen in de tweede helft van de 20^e eeuw. Ook het wolkendeck lijkt groter te zijn geworden.

De neerslagtoename is evenwel niet

systematisch: vooral in Noord-Europa regent het meer, in tegenstelling tot Oost-Azië. In het Middellandse Zeebekken valt er zelfs minder neerslag dan vroeger. Voor België (centraal gelegen tussen Noord- en Zuid-Europa) lijkt er momenteel weinig verandering te zijn (tenminste wat het

jaargemiddelde betreft). Trends in afwijkingen van de hydrologische en stormgerelateerde indicatoren zijn vermeld in onderstaande figuur.



Schema van geobserveerde afwijkingen van de hydrologische en stormgerelateerde indicatoren. (IPCC-TAR - Climate Change 2001: The Scientific Basis).

In de subtropen (tussen 10 °N en 30 °N) is er minder neerslag gevallen, hoewel in de jongste jaren de vroegere situatie lijkt terug te keren. In de buurt van de evenaar (tussen 10 °N en 10 °S) lijkt er iets meer neerslag te vallen.

2.1.3 Zeeniveau, ijskappen en gletsjers

In de laatste 3.000 jaar is het zeeniveau gemiddeld met 1 tot 2 cm per eeuw gestegen. Maar recentelijk gaat alles heel wat sneller: uit getijdemetingen blijkt het zeeniveau met 10 tot 20 cm te zijn gestegen in de afgelopen eeuw.

Twee belangrijke factoren liggen daaraan ten grondslag: enerzijds neemt het zeewater een groter volume in als het opwarmt en anderzijds is het totale watervolume in de oceanen toegenomen ten gevolge van het afsmelten van gletsjers en ijskappen. Als de ijskappen op Groenland en Antarctica volledig zouden afsmelten, zou het zeeniveau met respectievelijk 7 en 60 meter stijgen. Dit scenario zal zich in

de nabije toekomst wellicht niet voordoen, maar het geeft wel aan hoe gevoelig het zeeniveau is voor een zelfs beperkte afsmelting van die reusachtige hoeveelheden landijs.

Het valt niet te ontkennen dat de alpiene en continentale gletsjers zich terugtrekken. De wetenschappers zijn het eens dat het totale gletsjervolume sinds het midden van de 19^e eeuw is afgenomen. Om het aandeel van het afsmelten van gletsjers in de stijging van het zeeniveau te ramen, zijn precieze gegevens nodig over de inkrimping van het totale gletsjervolume. Er zijn helaas slechts volumetrische metingen beschikbaar voor een gedeelte van de 100.000 gletsjers op aarde.

■ **ULg-URAP en UGent-PAE, hebben recentelijk (in het kader van het LAQUAN-project) de geschiedenis van de veranderingen in het zeeniveau in de regio van de Larsemann Hills (Antarctica) bestudeerd, om meer te weten te komen over de regionale veranderingen van de dikte van de continentale ijskap en het tempo van de terugtrekking van het ijs. Dat is belangrijk om modellen over de dynamiek van ijskappen te kunnen valideren.**

2.1.4 Zeeijs

Zeeijs is vooral in de poolgebieden terug te vinden. De dikte van het pakijns in de zeeën rond de noordpool bedraagt gemiddeld drie meter, die van de zeeën rond de zuidpool één meter. De verandering in de dikte van het zeeijs kan een belangrijke indicator zijn van een opwarming van het klimaat.

■ **Vooraf in de zeeën rond de noordpool hebben onderzoekers van ULB-GLACIOL een belangrijke inkrimping van de hoeveelheid zeeijs vastgesteld, zowel in dikte als in oppervlakte. Die onderzoekers**

- schatten dat de ijskap in de laatste 30 tot 40 jaar 1,3 meter dunner is geworden en dat er jaarlijks 25.000 km² minder wateroppervlak door noordpoolijs wordt bedekt. Die jaarlijkse inkrimping is gelijk aan de totale oppervlakte van België.

Het staat evenwel nog niet definitief vast of die veranderingen enkel het gevolg zijn van natuurlijke fluctuaties dan wel van menselijke activiteiten.

2.2 Anders dan vroeger?

2.2.1 Hoe weten zonder meten?

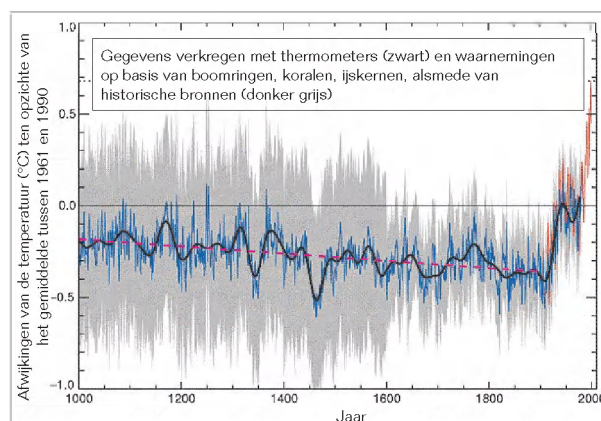
Om na te gaan of de opwarming in de 20^e eeuw uitzonderlijk is, moet ze getoetst worden aan een langetermijnvariabiliteit. Dit houdt in dat de paleoklimaten moeten worden bestudeerd. Vandaag zijn er talrijke instrumenten beschikbaar om de temperatuur, de neerslag, de samenstelling van de atmosfeer enz. te meten, wat natuurlijk niet altijd het geval is geweest. Alleen over de laatste 100 tot 150 jaar bestaan er systematische klimaatgegevens. Voor de periode daarvoor moet worden teruggegrepen naar 'natuurlijke archieven' zoals ijskernen, mariene of meersedimenten, die een reconstructie van variabelen zoals temperatuur, neerslag enz. mogelijk maken dankzij kalibraties ten opzichte van instrumentele waarnemingen (zie Kader 9).

- **Onder meer onderzoekers van ULB-GLACIOL zijn bij de klimaatreconstructie op basis van ijskernen betrokken. Onderzoekers van het CALMARS-team (KBIN, KMMA, ULB-BIOMAR, VUB-ANCH, UA-EFB) bestuderen in de Noord-Atlantische Oceaan en de Caraïben de sedimentatie van mariene kalkachtige skeletten (sclerosponzen, tweekleppigen en stekelhuidigen). Die skeletten geven**

- een indicatie van de ontwikkeling van het klimaat. Ook onderzoekers van het LAQUAN-team (UGent-PAE, ULg-URAP) bestuderen de geschiedenis van het klimaat aan de hand van sedimenten van microfossielen.

2.2.2 De afgelopen 1.000 jaar

De omvang van de huidige klimaatveranderingen wordt pas echt duidelijk door een temperatuurreconstructie in het noordelijk halfrond tijdens het laatste millennium (zie figuur hieronder).



Reconstructie van de temperatuur in het noordelijk halfrond tussen 1000 en 1999. (IPCC-TAR - Climate Change 2001: The Scientific Basis).

Uit schattingen van de gemiddelde oppervlaktemperatuur in het noordelijk halfrond blijkt dat het in het begin van het tweede millennium relatief warm was, terwijl het op het einde van de dertiende eeuw geleidelijk afkoelde. Die koude periode, ook wel 'kleine ijstijd' genaamd, eindigde in de 19^e eeuw en werd gevolgd door een zeer sterke temperatuurstijging in de 20^e eeuw. Op wereldschaal is die laatste temperatuurstijging waarschijnlijk de snelste en de belangrijkste van het afgelopen millennium.

2.2.3 Zeeniveau

In een tijdschaal van 10.000 tot 100.000 jaar is ook het zeeniveau op en neer gegaan, met

Kader 9: De geschiedenis van het klimaat

Er bestaat een hele reeks van bronnen waarmee wetenschappers de klimaatgeschiedenis kunnen reconstrueren:

- ✓ *Weergegevens* – Sinds ongeveer 150 jaar worden over de hele wereld systematisch gegevens over temperatuur, neerslag, luchtdruk en wind bijgehouden. Het KMI beschikt over gegevens sinds 1870.
- ✓ *Historische gegevens* – Sinds de mens zijn eigen geschiedenis neerschrijft, houdt hij ook de geschiedenis van het weer bij. Historische documenten - scheepslogboeken, dagboeken, parochieregisters, jaarverslagen en boekhouding van abdijen en landerijen enz. maar ook schilderijen en fresco's verschaffen heel wat informatie over het klimaat van het voorbije millennium.
- ✓ *Indirecte gegevens (reconstructies)* – Ook de natuur houdt een soort logboek over de geschiedenis van het weer bij. De reconstructie van het paleoklimaat, zijnde het klimaat in vroegere tijdperiodes, gebeurt vanuit bio- en geologische archieven. Zo heeft de sneeuw zich sinds vele duizenden jaren in de ijskappen opgestapeld. Wetenschappers boren honderden meters diep in die ijslagen

en kunnen aan de hand van de analyse van de geboorde ijskernen informatie over het toen heersende klimaat en de samenstelling van de atmosfeer verkrijgen. Ook uit sedimentgesteentes kan veel worden geleerd. Aan de hand van de mineralen in de sedimenten kunnen erosie-, neerslag- en temperatuurschema's worden afgeleid. Op basis van biologische sedimenten, namelijk pollen, diatomeeën en fossielen, verkrijgt men informatie over de vegetatie die toen in een bepaald gebied groeide. Daaruit worden conclusies getrokken over de aan- of afwezigheid van de zee en diverse klimaatfactoren, te weten temperatuur, vochtigheidsgraad en wind. Die biologische en geologische archieven correct lezen en interpreteren is evenwel geen gemakkelijke taak. Er moet een verband worden gevonden tussen de geanalyseerde elementen, zoals de isotopensamenstellingen en klimaatvariabelen, zoals de temperatuur. Ook elke gegevensregistratie moet worden gedateerd. De daartoe gebruikte methodes worden gekalibreerd aan de hand van andere indirecte bronnen en historische gegevens.

als belangrijkste oorzaken de aangroei en de afsmelting van de ijskappen doorheen de verschillende cycli van ijstijden en warmere tussenperiodes.

- Onder meer onderzoekers van VUB-DG
- hebben aangetoond hoe fluctuaties in het zeeniveau met tientallen meters geen uitzondering zijn en dat die stijgingen soms
- heel snel gaan, soms van 10mm tot 40mm
- per jaar.

2.2.4 Abrupte klimaatveranderingen

De reconstructie van de klimaatgeschiedenis toont dat sommige veranderingen waarschijnlijk heel abrupt kunnen optreden, in elk geval op regionaal vlak.

- In het Eem, de laatste interglaciale periode (130.000 – 100.000 jaar geleden), lijkt
- zich op Groenland een snelle afkoeling
- van 10 °C over een periode van een
- 70-tal jaren te hebben voorgedaan. Die

- waarnemingen zijn gebaseerd op de
- analyse van een 3.000 meter lange ijskern
- die in Centraal-Groenland (Greenland
- Ice Core Project, GRIP) werd geboord,
- een onderzoeksproject waaraan ULB-
- GLACIOL heeft meegewerkt. Het staat
- echter nog niet helemaal vast of die forse
- afkoeling zich wel heeft voorgedaan.
- Complexe niet klimaatgebonden ver-
- vormingen in de diepste lagen van
- de ijskap hebben mogelijkwerijs de
- onderzoeksresultaten vertekend. Die
- onduidelijkheid toont hoe belangrijk goede
- terreinwaarnemingen zijn om de fysische
- processen voor de uitwerking van modellen
- op adequate wijze te beschrijven.

2.3 Oorzaken van de klimaatveranderingen in het verleden

2.3.1 Factoren die het evenwicht van het klimaatstelsel verstoren

Welke factoren bepalen ons klimaat? In de eerste plaats de zon waarvan de stralen naar de aarde door het aardoppervlak worden geabsorbeerd en in warmte worden omgezet. Die energie wordt vervolgens herverdeeld via lucht- en zeestromingen en opnieuw de ruimte ingestuurd in de vorm van infrarode straling (zie Kader 7).

Externe factoren

Over de volledige aarde en één jaar genomen, wordt de energie van de invallende straling plusminus gecompenseerd door die van de uitgezonden straling. Alle factoren die daarop inwerken beïnvloeden het klimaat. Ook de factoren die de verdeling van de energie in of tussen de atmosfeer, het vasteland en de oceanen wijzigen, hebben een invloed op het klimaat. Elke factor die op dat evenwicht inwerkt, brengt wijzigingen aan in de stralingsbalans

(dat is het verschil tussen invallende en uitgezonden straling) van het systeem aarde/atmosfeer. Factoren die positief inwerken op de stralingsbalans warmen de aarde op, die welke negatief inwerken koelen ze af.

Een aantal natuurlijke externe factoren hebben in het verleden een invloed gehad op de geschiedenis van het aardse klimaat, waaronder:

- ✓ De zonnestraling. De hoeveelheid straling die de zon uitzendt, varieert lichtjes (0,1%) volgens een 11-jarige zonnecyclus. Variaties in de energieaanvoer van de zon kunnen zich over langere perioden voordoen.
- ✓ Kleine variaties in de aardbaan en in de helling van de aardrotatieas kunnen wijzigingen in de verdeling van de zonnestraling aanbrengen (astronomische theorie van de paleoklimaten, voor het eerst gevalideerd door Milankovitch en nadien door de werkzaamheden van UCL-ASTR). Die variaties spelen een belangrijke rol in de klimaatveranderingen in het verleden (glaciale cycli).
- ✓ De broeikasgassen. Bepaalde gassen in de atmosfeer absorberen de uitgezonden straling meer. Omdat minder warmte van de aarde naar de ruimte terugkeert, warmen het aardoppervlak en de lage atmosfeer op. Het positieve effect van die gassen wordt ook het broeikaseffect genoemd. Die gassen werken immers volgens het principe van een serre: ze laten de zonnestralen door, maar houden de warmte gevangen. Sinds miljarden jaren al spelen de broeikasgassen een belangrijke rol in het klimaat van de aarde. Zonder hen zou de gemiddelde temperatuur op aarde -20 °C bedragen. De belangrijkste natuurlijk voorkomende broeikasgassen zijn waterdamp, koolstofdioxide, ozon, methaan en stikstofoxide.
- ✓ De aërosolen (zie Hoofdstuk 1). Vulkanen kunnen grote hoeveelheden zwavelhouden-

Klimaatveranderingen

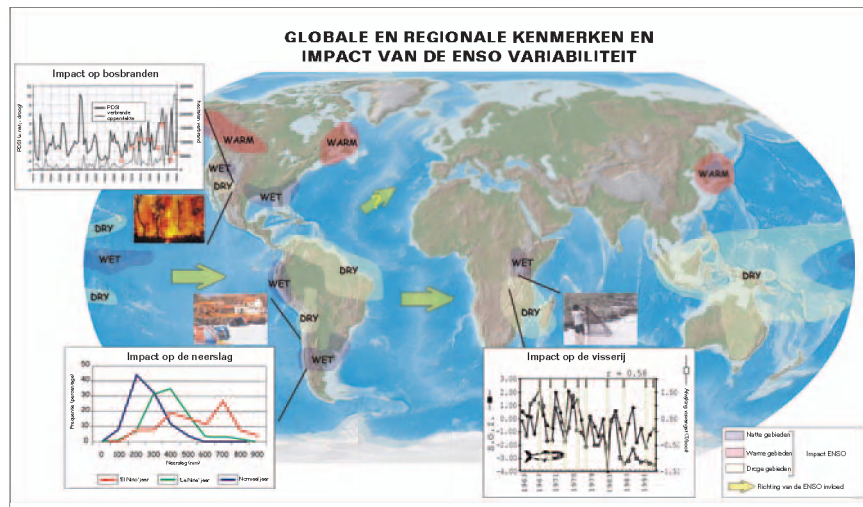
de gassen (vooral zwaveldioxide) uitstoten die in zwavelhoudende aërosolen worden omgezet welke de invallende straling sterk weerkaatsen, wat negatief inwerkt op de stralingsbalans.

Interne factoren

Natuurlijke klimaatveranderingen hoeven niet altijd te worden opgewekt door gewijzigde externe factoren met gevolgen voor de stralingsbalans, zoals wijzigingen in de hoeveelheid broeikasgassen of vulkaanuitbarstingen. Ook zonder enige aanwijsbare reden kan het klimaat wijzigen, bijvoorbeeld als gevolg van complexe interacties tussen de componenten van ons aardse klimaatstelsel. Voorbeelden hiervan zijn het El Niño-effect en de El Niño Zuidelijke Oscillatie (zie Kader 8) die het gevolg zijn van een opeenvolging van reacties tussen de atmosfeer en de hydrosfeer over verscheidene jaren.

Ook in het noordelijk halfrond zou er een soortgelijke en in de tijd weerkerende oscillatie voorkomen, met name de 'Noord-Atlantische Oscillatie' (NAO) die toe te schrijven is aan de Noord-Atlantische thermohaliene stroming. De NAO is ontstaan door de ter hoogte van IJsland en de Azoren gemeten luchtdrukverschillen.

- Belgische onderzoekers van ULg-URAP, UGent-RCMG, KMMA-GEO en UCL-ASTR bestuderen de interacties tussen de 'El Niño Zuidelijke Oscillatie' (ENSO) en de 'Noord-Atlantische Oscillatie' (NAO). Sommige van hun bevindingen zijn weergegeven in de volgende figuur.



Regionale en algemene kenmerken van de 'El Niño Southern Oscillation' (ENSO) en sommige gevolgen: bosbranden in Californië, neerslag in Chili en visvangst in het Tanganyikameer, Afrika. (ULg-URAP, UGent-RCMG, UGent-PAE, KMMA, UCL-ASTR, UCL-GEOG en FUNDP-URBO).

2.3.2 Uitgestelde reacties

Bij een gewijzigde stralingsbalans reageren de verschillende componenten van het klimaatstelsel niet allemaal even snel. Sommige, zoals de atmosfeer, reageren heel snel, andere hebben tijd nodig om het evenwicht te herstellen, soms eeuwen of zelfs millennia.

Oceanen kunnen heel wat warmte opslaan, waardoor ze zich slechts traag aan de verschillende fasen van opwarming of afkoeling van het oppervlak of de atmosfeer aanpassen. Van de oceanen gaat er met andere woorden een sterk vertragend effect op de totale opwarming uit.

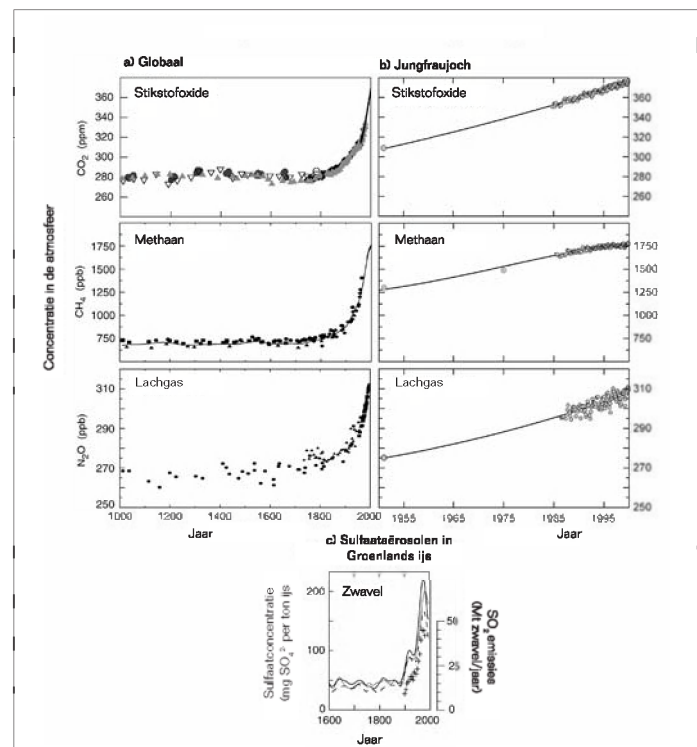
Die vertragende effecten hebben ook betrekking op de stijging of de daling van het zeeniveau. Het aangroeien of afsmelten van de ijskappen kan honderden of duizenden jaren in beslag nemen. Ook de diepste oceaanalagen warmen zeer traag op, waarbij het effect van de thermische uitzetting slechts geleidelijk optreedt. Daarom kan het zeeniveau gedurende heel lange tijd veranderen ten gevolge van gewijzigde factoren die de stralingsbalans beïnvloeden.

- Onderzoekers van VUB-DG bestuderen de eigenschappen van de ijskappen op Groenland en Antarctica. Ze hebben driedimensionale modellen ontwikkeld om de eigenschappen (thermomechanica, massa/balans en aardkorst) van die ijskappen in kaart te brengen en te voorspellen hoe die op een verdere opwarming reageren. Recentelijk werden die modellen in de ‘General Circulation Models’ (GCMs, algemene circulatiemodellen) en ‘Earth System Models’ (aardsysteemmodellen) geïntegreerd om de interacties en feedbackmechanismen tussen de continentale cryosfeer, de atmosfeer en de oceanen te onderzoeken. Verder ondersteunde het beschreven VUB-onderzoek de zoektocht naar locaties voor het boren naar ijskernen, de interpretatie ervan en de duiding van de satellietgegevens over die regio’s.
- Die ijskapmodellen werden in België ingepast in modellen van het systeem aarde (oceaan, atmosfeer, ijs, vegetatie) in het kader van de onderzoeksnetwerken MILMO en CLIMOD (UCL-ASTR, VUB-DG, ULg-LPAP, KMI).

2.4 Broeikasgassen en aërosolen als hoofdverdachten?

2.4.1 Metingen

Sinds het pre-industriële tijdperk hebben menselijke activiteiten de broeikasgassen- en aërosolenconcentraties in de atmosfeer sterk doen stijgen. In de laatste eeuw zijn de concentraties van koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4) en lachgas (N_2O) nooit zo sterk toegenomen, voornamelijk ten gevolge van het verbranden van fossiele brandstoffen, de landbouw en wijzigingen in het bodemgebruik (zie figuur hiernaast).



Langetermijngegevens van de veranderingen in concentraties van gassen in de atmosfeer stellen de invloed van antropogene emissies in het licht. (IPCC-TAR – Climate Change 2001: The Scientific Basis; E. Mahieu, ULg-GIRPAS).

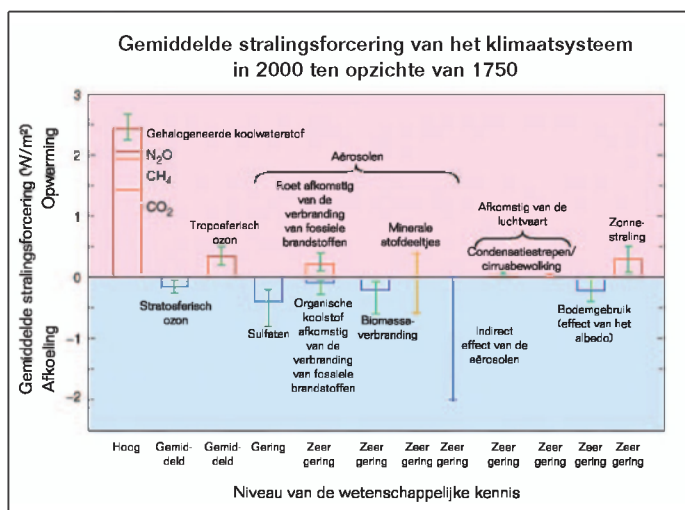
- Metingen van Belgische onderzoekers (ULg-GIRPAS) in het Jungfraujoch-station in Zwitserland (zie foto blz. 22) tonen dat tijdens de laatste vijf decennia de broeikasgassenconcentraties zijn blijven stijgen. Alleen de methaanconcentraties zijn gedaald, een fenomeen waarvoor tot nu toe geen verklaring is.

Niet alle gassen dragen in dezelfde mate tot het broeikaseffect bij. De impact van 1 kg broeikasgas is afhankelijk van zijn verblijftijd in de atmosfeer en zijn impact op de stralingsbalans. De impact van de verschillende gassen wordt uitgedrukt met de indicator ‘Global warming Potential’ (GWP). Zo is de impact van lachgas (N_2O) ongeveer 310 keer groter dan die van koolstofdioxide (CO_2), terwijl de CO_2 -concentraties in de atmosfeer wel duizendmaal hoger liggen.

Klimaatveranderingen

Koolstofdioxide is het gas dat het meest bijdraagt tot de stijging van het broeikaseffect. Daar broeikasgassen een lange levensduur hebben en zich in de diverse luchtlagen vermengen, hebben ze een wereldwijde invloed.

Aërosolen in de lagere luchtlagen (de troposfeer) daarentegen hebben vaak een meer lokale invloed op het klimaat. De invloed van een aërosol op de stralingsbalans is afhankelijk van zijn afmeting en samenstelling. Het netto-effect van die troposferische aërosolen op de stralingsbalans is negatief, omdat ze invallende zonnestralen reflecteren en absorberen. Aërosolen hebben ook een indirect negatief effect omdat ze de wolkenvorming beïnvloeden, maar dat blijft nog heel moeilijk in te schatten. Positief is dat zij de door de aarde in de ruimte teruggestuurde warmtestralen absorberen. Toch kan worden bevestigd dat het netto-effect van aërosolen op de stralingsbalans negatief is. Weliswaar compenseert dat negatief effect slechts gedeeltelijk het positief effect ten gevolge van de toename van de broeikasgassen (zie figuur hieronder).



Huidige schattingen van de bijdrage aan de stralingsbalans als gevolg van de toegenomen concentratie van atmosferische componenten en andere mechanismen. Bepaalde aërosolen (sulfaten, aërosolen uit biomassaverbranding) leiden tot afkoeling, anderen (roet) tot opwarming. Over de indirecte bijdrage van aërosolen heerst nog de grootste onzekerheid. (IPCC-TAR – Climate Change 2001: The Scientific Basis).

2.4.2 Modellen

Hoe kan nu worden vastgesteld of menselijke activiteiten de hoofdoorzaak van de huidige klimaatveranderingen zijn en of daar geen samenloop van natuurlijke veranderingen aan ten grondslag ligt?

Om die vraag te beantwoorden, bouwen wetenschappers modellen waarin rekening wordt gehouden met zoveel mogelijk factoren die een invloed op het klimaat kunnen hebben. Aan de hand van de brongegevens (zonneshijn, stand van de aarde en de zon, vulkaanuitbarstingen, menselijke activiteiten, ...) wordt met die modellen getracht het klimaat van nu, gisteren of morgen te reconstrueren. Met die reconstructies van het klimaat nu en gisteren kunnen de modellen worden gevalideerd. Zo verkleint de heersende onzekerheid over hun predictieve waarde.

Onderzoekers van UCL-ASTR hebben in het kader van de Belgische onderzoeksnetwerken CLIMOD en MILMO diverse klimaatsysteemmodellen ontwikkeld. Door ze te gebruiken, is men tot een beter inzicht gekomen in een reeks belangrijke mechanismen die het klimaat sturen en werd een aantal onzekerheden weggewerkt over de klimaatontwikkeling. Volgende thema's zijn aan bod gekomen:

- ✓ Het reconstrueren van de krachtige katabatische winden langs de polaire ijschellingen op Antarctica met behulp van atmosferische modellen.
- ✓ Het identificeren van de processen die de variabiliteit regelen van het oppervlak en het volume van het zeeijs in beide halfronden. Dankzij die modellen krijgen men een beter inzicht in de natuurlijke variabiliteit van het systeem en in de reactie van het zeeijs op de opwarming in de laatste 50 jaar.

- ✓ Het simuleren van de reactie van het klimaatstelsel op de antropogene en natuurlijke factoren die in het tweede millennium een invloed hebben gehad op de stralingsbalans.
- ✓ Het analyseren van de potentiële wijzigingen in de thermohaliene oceaancirculatie.

De modellen die de wetenschappers nu gebruiken, laten zien hoe tot de industriële revolutie vooral natuurlijke variaties de klimaatveranderingen verklaren. Er zijn sterke vermoedens dat de opwarming in de jongste vijftig jaar vooral het gevolg is van menselijke activiteiten, met name omdat de modellen enkel de waargenomen klimaatveranderingen kunnen reconstrueren als die de antropogene emissies meerekenen.

De stijging van het zeeniveau is een van de moeilijkste te analyseren aspecten. Het is uiterst delicaat om de verschillende factoren te kwantificeren die bijgedragen hebben tot de waargenomen stijging van het zeeniveau met 10 tot 20 cm in de 20^e eeuw (zie paragraaf 2.1.3).

- Een van de belangrijkste bijdragen van de onderzoekers van VUB-DG tot het Belgische onderzoek inzake Antarctica en *global change* is de ontwikkeling van driedimensionale thermomechanische modellen voor de evolutie van de ijskappen. Die modellen werden met succes toegepast op de Antarctische ijskap, de Groenlandse ijskap en de quartaire ijskap van het noordelijk halfrond tijdens de ijstijden. De onderzoekers zijn erin geslaagd de vorm, de afmetingen en de fysische eigenschappen van die ijskappen te bepalen vanaf hun ontstaan tijdens de glaciële cycli in het Tertiair en het Quartair. Ook hebben zij hun gedrag kunnen inschatten bij een mogelijke verdere

- opwarming van de aarde. Die modellen werden in de 'General Circulation Models' (algemene circulatiemodellen) en de 'Earth System Models' (aardestelselmodellen) geïntegreerd om de interactie en terugkoppelingsmechanismen tussen de continentale cryosfeer, de atmosfeer en de oceanen te analyseren.

2.5 Wat in de 21^e eeuw?

2.5.1 Wereldwijd Uitgangspunt

In hun predictieve modellen gaan wetenschappers (Special Report on Emissions Scenarios, IPCC-SRES, 2000) ervan uit dat de mens tijdens de 21^e eeuw de samenstelling van de atmosfeer blijft beïnvloeden. Dat gaat zich vooral op de broeikasgas- en aerosolenconcentraties laten gevoelen. De uitgangspunten zijn:

- ✓ De CO₂-uitstoot als gevolg van de verbranding van fossiele brandstoffen blijft haast zeker de hoofdoorzaak van de toename van CO₂ in de atmosfeer in de 21^e eeuw.
- ✓ Tegen 2100 wordt in de atmosfeer een concentratie van 490 tot 1.260 ppm verwacht (aantal deeltjes CO₂ per miljoen luchtdeeltjes). Die concentratie bedroeg 280 ppm in 1750 en 380 ppm in 2004.
- ✓ Veranderingen in het bodemgebruik (voornamelijk ontbossing) beïnvloeden de CO₂-concentratie in de atmosfeer. In de veronderstelling dat er geen koolstofverlies zou geweest zijn door veranderingen in het bodemgebruik, zou de CO₂-concentratie nu 40 tot 70 ppm minder bedragen.

Verwachte wijzigingen

Volgende voorspellingen kunnen worden gedaan:

Klimaatveranderingen

- ✓ **Temperatuur**
 - Tegen 2100 zal de temperatuur van het aardoppervlak met 1,4 tot 5,8 °C ten opzichte van 1990 toenemen. De snelheid waartegen de aarde opwarmt ligt dan nog fors hoger dan in de 20^e eeuw, wat nog nooit gebeurd is in de laatste 10.000 jaar.
 - Een mogelijk veel sterker El Niño-effect in de tropische gebieden in de Stille Oceaan.
- ✓ **Neerslag**
 - Een hogere gemiddelde algemene luchtvochtigheid en meer neerslag. In de tweede helft van de 21^e eeuw zal er in de winter waarschijnlijk meer neerslag vallen op de middenbreedtegraden en de hoge breedtegraden en boven Antarctica. Op de lage breedtegraden zal afhankelijk van de regio meer of minder regen vallen.
- ✓ **Extreme weersomstandigheden en gezondheidsrisico's**
 - Extreme weersomstandigheden, te weten hittegolven, meer warme dagen, perioden met zware neerslag, minder koude dagen in gematigde gebieden en wellicht zwaardere tropische wervelstormen, gaan zich vaker, intenser en over een langere periode voordoen. Het risico op overstromingen of droogtes wordt evenwel groter, met gevolgen voor de natuurlijke ecosystemen, diverse sociaal-economische sectoren en de menselijke gezondheid.
 - De menselijke gezondheid, vooral in de tropische en subtropische landen, wordt steeds meer bedreigd. De gevolgen kunnen direct (effect van hittegolven, verlies van mensenlevens bij overstromingen en stormen) of indirect (wijziging in de geografische verdeling van ziektedragers zoals muggen, de kwaliteit van water, lucht of voedsel...) zijn. De impact op de gezondheid zal heel sterk afhangen van de lokale milieu- en sociaal-economische omstandigheden, alsook van sociale, institutionele, technologische en gedragsaanpassingen.
- ✓ **Thermohaliene circulatie**
 - Een mogelijke verzwakking van de thermohaliene circulatie in het noordelijk halfrond heeft voor gevolg dat die oceaanstromingen minder warmte transporteren naar Europa. Dat zou de opwarming van Europa door het toegenomen broeikaseffect evenwel niet tegenhouden. Voldoende ingrijpende wijzigingen in de stralingsbalans over een lange periode kunnen mogelijk zelfs die oceaancirculatie na 2100 volledig en zelfs misschien onherroepelijk doen stilvallen.
- ✓ **Sneeuw en ijs**
 - In het noordelijk halfrond blijft het sneeuw- en zeeijsoppervlak afnemen.
 - Gletsjers en ijskappen blijven in de 21^e eeuw wegsmelten.
 - Mogelijk kan de Antarctische ijskap aan volume winnen omdat er meer neerslag valt. De Groenlandse ijskap gaat waarschijnlijk in massa afnemen. Als de opwarming doorgaat na 2100, kan het afsmelten van beide ijskappen het zeeniveau met 60 cm per eeuw doen stijgen.
- ✓ **Zeeniveau**
 - Tussen 1990 en 2100 kan het zeeniveau met 9 cm tot 88 cm toenemen als gevolg van de thermische uitzetting van het water door de hogere temperatuur en het afsmelten van gletsjers en ijskappen. Die stijging kan meerdere eeuwen doorgaan na stabilisering van de broeikasgasconcentraties.

- Als alle gletsjers smelten, zou het zeeniveau met 0,5 m stijgen.
- De huidige bijdrage van Groenland en Antarctica tot de zeeniveaustijging is lichtjes negatief gelet op een accumulatie van sneeuw op Antarctica. In de loop van de volgende 1.000 jaar kan het afsmelten ervan het zeeniveau met 6 m doen stijgen.
- Er kunnen heel grote regionale verschillen optreden. Bovendien veroorzaken de steeds frequentere extreme weersomstandigheden meer en meer stormweer, waardoor extreem hoge zeewaterstanden frequenter voorkomen dan vroeger.

2.5.2 Regionaal niveau

De wetenschappelijke gemeenschap, de beleidsmakers en het publiek vragen steeds meer realistische projecties over de regionale impact van de toekomstige klimaatveranderingen. Daarbij moeten atmosferische factoren op grote schaal in rekening worden genomen (bijvoorbeeld de talrijke broeikasgassen) die de algemene circulatie bepalen, maar ook factoren op mesoschaal die de lokale circulatie beïnvloeden en de regionale distributie van de klimaatvariabelen regelen.

De modellen die de wetenschappers nu gebruiken, zijn de Algemene Circulatiemodellen ('General Circulation Models', GCM) die het klimaat over de hele aarde simuleren en voorspellen. Hun resolutie is echter niet hoog genoeg (ze gebruiken thans een horizontale resolutie van 300 km) om op passende wijze de impactfactoren op de stralingsbalans op mesoschaal te integreren en een regionale voorspelling te maken. Daarom moeten betere regionale klimaatmodellen met een horizontale resolutie van 10 tot 50 km worden ontwikkeld die bovendien in de algemene modellen kunnen worden geïntegreerd.

Er worden sterke verschillen verwacht tussen de algemene en de regionale veranderingen:

- ✓ Het vasteland zal in de meeste gevallen meer dan waarschijnlijk sneller opwarmen dan het algemeen gemiddelde, in het bijzonder op de hoge breedtegraden in de winter.
- ✓ Op de hoge breedtegraden zal het zowel in de winter als in de zomer meer regenen. In haast heel Europa zal het overstromingsgevaar toenemen.
- ✓ Er zijn heel wat regionale variaties in de zeeniveaustijging mogelijk vergeleken bij de gemiddelde geprojecteerde stijging.
- ✓ Het zuiden van Europa zal droger zijn.
- ✓ De helft van de alpiene gletsjers en grote delen van de permafrost (gebieden waar de grond altijd bevroren is) zouden op het einde van de 21^e eeuw kunnen verdwijnen.

■ Een multidisciplinair netwerk van Belgische onderzoekers (ULg-CEME, ULg-LGIH, FUSAGx-UHAGx, KU Leuven-H&EG, KMI) hebben drie hydrologische modellen in drie Belgische stroomgebieden bestudeerd (Gete, Jeker en Ourthe) om de invloed na te gaan van de klimaatveranderingen in die stroomgebieden. Uit de resultaten blijkt duidelijk dat de geprojecteerde klimaatveranderingen grote gevolgen kunnen hebben op de hydrologische cycli van die stroomgebieden, te weten een verlaging van de grondwaterspiegel, een vermindering van het rivierdebiet en een lagere bodemvochtigheid, vooral in de zomer. Om preciezer het grotere overstromingsgevaar te kunnen inschatten, moeten nieuwe resultaten van Algemene Circulatiemodellen in rekening worden gebracht

Klimaatveranderingen

2.6 Mogelijke onverwachte effecten op lange termijn

In de 21^e eeuw is het niet uitgesloten dat de door de broeikasgassen verstoorde stralingsbalans mogelijk plotse ingrijpende veranderingen in de fysische en biologische systemen teweegbrengt. Sommige van die veranderingen kunnen onomkeerbaar zijn, zoals het stilvallen van de thermohaliene circulatie of het versneld afvloeien van ijs en ijswater afkomstig van Groenland en de West-Antarctische ijskap.

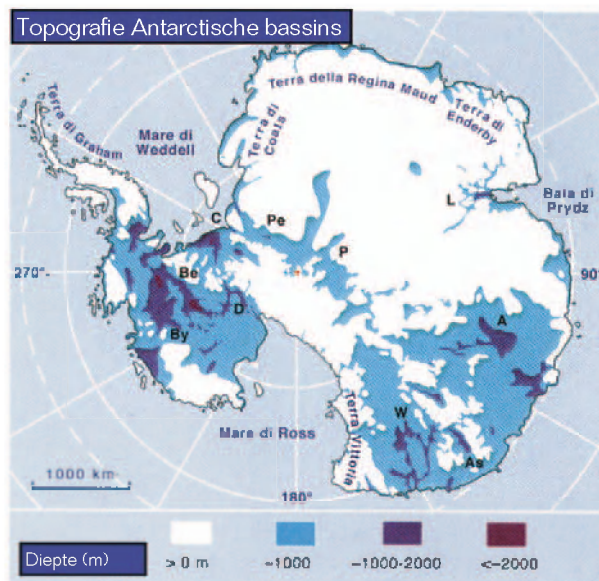
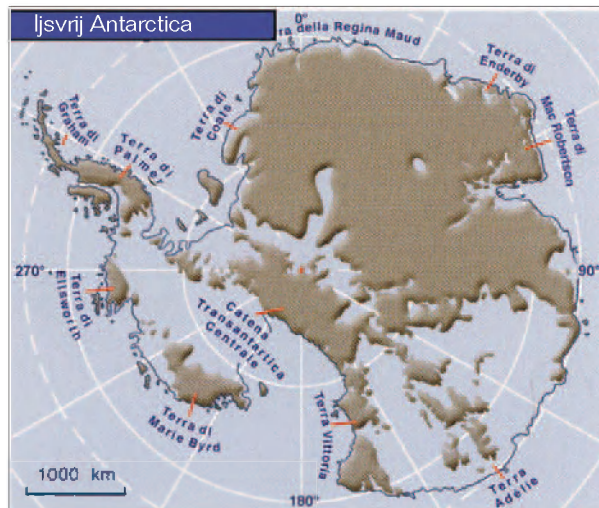
Vele ecosystemen kunnen ook plots verstoord worden, met gevolgen voor hun functie, biodiversiteit en productiviteit. Een voorbeeld daarvan is de verbleking van het koraal ten gevolge van de gestegen zeewatertemperatuur.

Op dit ogenblik is het heel moeilijk te voorspellen hoeveel kans er bestaat dat een van die fenomenen zich voordoet, daar over de processen die eraan ten grondslag liggen onvoldoende bekend is.

2.6.1 De West-Antarctische ijskap

In de West-Antarctische ijskap ('Western Antarctic Ice Sheet', WAIS) is er voldoende ijs om het zeeniveau met 6 meter te doen stijgen. De stabiliteit van die ijskap die in grote mate wordt gedragen door een bodem die zelf onder het zeeoppervlak ligt, wordt door heel wat wetenschappers in twijfel getrokken. Zij vinden het niet volledig ondenkbaar dat het ijs dat zich aan de randen van de ijskap bevindt, loskomt en dat zo een grote hoeveelheid WAIS-ijs in zee terechtkomt. Onder wetenschappers groeit er evenwel overeenstemming dat dit fenomeen zich wellicht niet in de 21^e eeuw zal voordoen. Dat risico is op lange termijn wel reëel. Volgens het WAIS-panel is er 50% kans dat het zeeniveau over een periode van 1.000 jaar met meer dan 2 mm per jaar stijgt, maar ook

50% kans dat de WAIS in de komende 1.000 jaar het zeeniveau niet doet stijgen (zie figuur hieronder).



Potentiële instabiliteit van de WAIS-ijskap (West Antarctic Ice Sheet). (ULB-GLACIOL).

2.6.2 De thermohaliene circulatie

Door die wereldwijde opwarming gaat vermoedelijk een deel van de Groenlandse ijskap afsmelten, waardoor het zeeniveau van nu tot 2100 met 9 cm kan toenemen (zelfs meer als de opwarming zich voortzet na de 21^e eeuw) en er een zoetwaterstroom kan ontstaan in de buurt van de twee Noord-Atlantische diepwaterformaties. Die toevoer van

zoet water zal bijdragen tot het moduleren van de thermohaliene circulatie. Het is dus uitermate belangrijk hiermee rekening te houden in de modellen, wat tot nu toe zelden het geval is geweest. Uit simulaties van Belgische wetenschappers onder andere zou dat fenomeen de Golfstroom haast volledig en plots doen stilvallen na de 21^e eeuw, met een lokale afkoeling in het noorden van de Atlantische Oceaan tot gevolg.

2.6.3 Biogeochemische verrassingen

Een ander gevolg van de klimaatveranderingen waar wetenschappers zich zorgen over maken, is het vrijkomen van grote hoeveelheden broeikasgassen, respectievelijk koolstofdioxide (CO₂) en methaan (CH₄) die nu als gashydraten in de permafrost en in sedimenten op de bodem van de zee en grote meren gevangen zitten. Als die gassen vrijkomen, wordt het broeikaseffect nog versterkt.

■ **Onderzoekers van UGent-RCMG bestuderen de destabilisering van de gashydraten in het Baikalmeer en de Zwarte Zee, dit laatste in het kader van een ander project.**

2.7 Klimaatveranderingen en ozon

In Hoofdstuk 1 werd de ozonproblematiek besproken. Er bestaan terugkoppelingsmechanismen tussen ozon en klimaatveranderingen: niet alleen heeft zowel de stratosferische als troposferische ozon invloed op de klimaatveranderingen, maar omgekeerd ook hebben de klimaatveranderingen invloed op de ozonconcentraties en -verdeling. De gevolgen blijven evenwel moeilijk in te schatten gelet op een nog beperkte kennis van de klimaatgerelateerde processen die de ozonconcentraties kunnen beïnvloeden.

Het gat in de ozonlaag en het broeikaseffect

hebben een aantal chemische en fysische processen gemeen. Vandaar dat het Protocol van Kyoto en het Protocol van Montreal nauw op elkaar moeten aansluiten. Als bijvoorbeeld de concentratie van ozonvernietigende CFK's (chloorfluorkoolwaterstoffen) in aansluiting op de uitvoering van het Protocol van Montreal afneemt, zal dat ten goede komen aan de algemene opwarming, daar CFK's ook krachtige broeikasgassen zijn. Maar sommige CFK-substituten zijn ook broeikasgassen.

Uit vele gebruikte modellen voor de studie van de terugkoppelingsmechanismen tussen klimaat en ozonlaag blijken de verdunning van de ozonlaag en de toename van de broeikasgassenconcentratie samen tot een afkoeling van de stratosfeer te hebben bijgedragen. Die afkoeling kan ook de vorming en het aanhouden van stratosferische wolken in de hand werken die de ozon afbreken.

Al die zeer complexe processen zijn aan elkaar gekoppeld. Of de klimaatveranderingen het ozongat gaan dichten of juist niet blijft een belangrijke open vraag.

In veel gebieden leidt de opwarming tot een drogere vegetatie. Een hogere CO₂-concentratie vergroot het risico op bliksemactiviteit, met mogelijk meer bosbranden waarbij de ozonprecursoren CO, NO_x en CH₄ vrijkomen.

Klimaatveranderingen beïnvloeden de uitstoot van ozonprecursoren, waarbij N₂O en NO voortkomen uit de bodem ten gevolge van een sterkere activiteit van micro-organismen en CH₄ uit wetlands en gashydraten op de zeebodem of onder de permafrost.

De uitstoot van biogene vluchtige organische stoffen die de vorming van ozonprecursoren en aerosolen met zich meebrengen, hangt af van de weersomstandigheden.

Hoe hoger de luchtvochtigheid is, hoe groter de concentratie van OH-radicalen die de verblijftijd van ozonprecursoren in de atmosfeer verkorten. Klimaatveranderingen beïnvloeden ook het ozontransport in de troposfeer en tussen de stratosfeer en de troposfeer.

2.8 Redt Kyoto het klimaat?

2.8.1 Waarom moet het klimaat worden gered?

Het IPCC voorspelt steeds meer klimaatveranderingen in de komende decennia en eeuwen, met zowel voor- als nadelen voor de mens. Voordelen zijn onder meer:

- ✓ er komt meer bouwland beschikbaar, daar sommige regio's waar het nu te koud is om aan landbouw te doen nu gunstigere weersomstandigheden genieten;
- ✓ door het afsmelten van de ijslaag rond de noordpool, komen nieuwe zeeroutes vrij;
- ✓ een lager sterftecijfer wegens minder strenge winters.

Maar die paar voordelen wegen helaas niet op tegen een hele reeks nadelen:

- ✓ minder oogstopbrengsten in de meeste tropische en subtropische regio's voor alle uitgetekende scenario's, alsook op de middenbreedtegraden bij een gemiddelde jaarlijkse temperatuurstijging van 2-3 °C;
- ✓ minder drinkwater, vooral in subtropische gebieden;
- ✓ meer mensen blootgesteld aan overdraagbare ziektes zoals malaria;
- ✓ een hoger sterftecijfer te wijten aan hittegolven;
- ✓ een groter overstromingsgevaar.

Die nadelen zouden veel zwaarder kunnen doorwegen dan die enkele voordelen.

De internationale gemeenschap heeft dat bevestigd met de goedkeuring van het UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 1992) met als hoofddoelstelling het '*stabiliseren van de broeikasgasconcentraties in de atmosfeer op een niveau waarop een gevaarlijke antropogene verstoring van het*

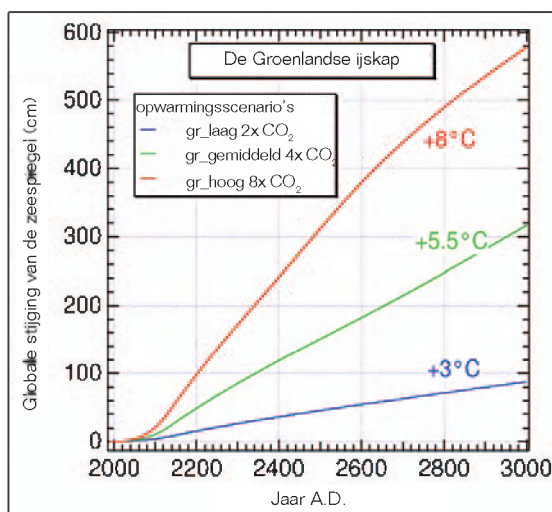
klimaatstelsel wordt voorkomen. Dat niveau dient te worden bereikt in een tijdsbestek dat toereikend is om de ecosystemen in staat te stellen zich op natuurlijke wijze aan de klimaatveranderingen aan te passen en om te zorgen dat de voedselproductie niet in gevaar komt en dat de economische ontwikkeling zich op duurzame wijze kan voortzetten.' (UNFCCC-Artikel 2). Over wat dat niveau in absolute kwantitatieve termen betekent, staat niets in het Klimaatverdrag. Zowel de sociale, natuur- en toegepaste wetenschappen kunnen bijdragen tot de bepaling van dat niveau door de kennis te vergroten en de onzekerheden te beperken. De definitie van 'gevaarlijke antropogene verstoring' blijft evenwel een waardeoordeel dat door sociaal-politieke processen moet worden geschraagd. Daarbij moet rekening worden gehouden met overwegingen over ontwikkeling, gelijkheid en duurzaamheid, alsook met de onzekerheden en de risico's (zie Kader 10).

Om eventuele beslissingen over het 'risiconiveau' te vergemakkelijken, werden de gevolgen van de mogelijke toekomstige klimaatveranderingen door het IPCC in vijf risicocategorieën ingedeeld. Onderstaande tabel toont duidelijk dat de risico's op negatieve gevolgen toenemen naarmate de veranderingen groter zijn. Elke risicocategorie wordt door de verschillende actoren en landen op een verschillende manier waargenomen. Vandaar dat er momenteel nog geen internationale overeenstemming is vanaf welk niveau klimaatveranderingen of broeikasgasconcentraties als gevaarlijk dienen te worden beschouwd. De Raad van Ministers van de Europese Unie heeft in 1996 echter een officieel standpunt ingenomen: "*Gezien het grote risico van zo'n toename en vooral het zeer snelle tempo van de klimaatveranderingen, is de Raad de mening toegedaan dat de gemiddelde temperatuur wereldwijd niet meer dan 2 °C boven het pre-industriële niveau zou mogen*

Kader 10: Enkele voorbeelden van kwetsbare fysieke systemen die door Belgische onderzoekers werden onderzocht

De Groenlandse ijskap

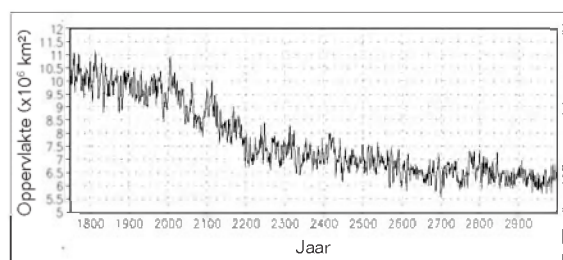
Zelfs nadat het klimaat zich heeft gestabiliseerd, zal de Groenlandse ijskap tijdens de volgende duizenden jaren blijven reageren op klimaatveranderingen. Op basis van modellen verwachten de onderzoekers dat die ijskap haast volledig zal verdwijnen als de *lokale* gemiddelde jaartemperatuur gedurende enkele millennia met 3°C stijgt. Als gevolg hiervan zou het zeeniveau wereldwijd met 7 meter toenemen. De opwarming op Groenland zou hoger moeten zijn dan het mondiale gemiddelde. Bij een opwarming van $5,5^{\circ}\text{C}$ op Groenland, zou de zeespiegel na duizend jaar met 3 meter stijgen.



Reactie van de Groenlandse ijskap op drie opwarmingsscenario's in het derde millennium. De cijfers bij de curven refereren aan de gemiddelde jaarlijkse temperatuurstijging boven Groenland tot het jaar 3000. De geprojecteerde temperatuurstijgingen voor Groenland liggen boven het mondiale gemiddelde (met een factor van 1.2 tot 3.1). (VUB-DG).

Het zeeijs in het zuidelijk halfrond

Volgens een simulatie in een algemeen atmosfeer-oceaan-zeeijsmodel, kan de reactie van de Zuidelijke Oceaan op een verhoging van de broeikasgasconcentraties in de atmosfeer in twee verschillende fases worden opgedeeld. In eerste instantie zal de oceaan door zijn hoge warmteopslagcapaciteit de opwarming aan het aardoppervlak temperen. Maar een eeuw na de forse toename van de broeikasgassen, zal de opwarming worden versterkt als gevolg van een positieve terugkoppeling die samenhangt met een sterker oceanisch warmtetransport naar de Zuidelijke Oceaan. Die fase die zich waarschijnlijk nog moet voordoen en waarin de opwarming wordt versterkt, zal leiden tot een forse inkrimping van het zeeijsoppervlak in de Zuidelijke Oceaan. De gevolgen daarvan moeten in de modellen en bij de interpretatie van de waarnemingen in rekening worden gebracht.



Ontwikkeling in de tijd (in jaren) van het gemiddelde zeeijsoppervlak (in miljoenen km²) rond Antarctica, gesimuleerd met een klimaatmodel waarin de geobserveerde stijging van de broeikasgasconcentratie in de periode 1750-2000 werd verwerkt. Tijdens het derde millennium blijft de broeikasgasconcentratie op het in 2000 geobserveerde niveau. Zelfs in dat te optimistische maar onrealistische scenario toont de simulatie een enorme inkrimping van de ijsmassa. (UCL-ASTR).

Klimaatveranderingen

stijgen (...)". De volgende figuur toont enkele redenen tot ongerustheid omtrent de gevolgen van klimaatveranderingen.

Om te antwoorden op de vraag of het Protocol van Kyoto het klimaat zal redden, wordt aangenomen dat 'het klimaat redden' het behalen van de doelstellingen van de Europese Unie inhoudt.

oorzakelijke verbanden tussen de emissies en de temperatuur begrijpen en de bronnen van inertie van het klimaatsysteem identificeren. Inertie is immers een kenmerk dat inherent is aan klimaat-, ecologische en sociaal-economische systemen. De gecombineerde effecten van de inertie van de componenten van de verschillende systemen zijn zo dat het klimaat en de daarvan afhankende systemen zich pas lang na de beperking van de

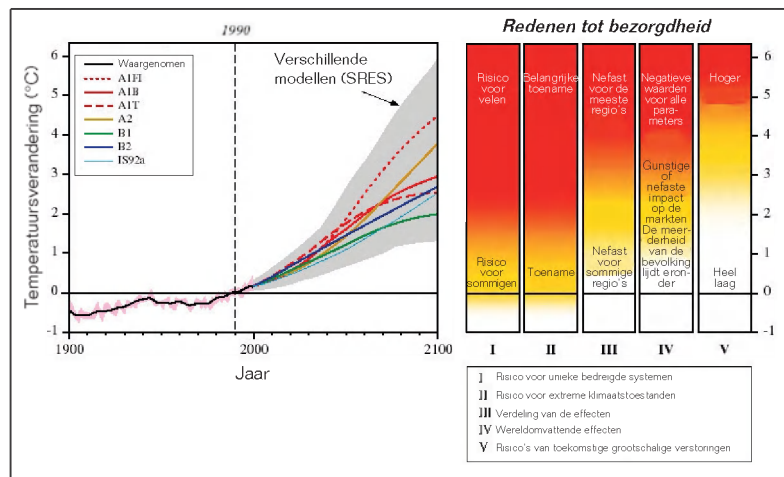
uitstoot zullen stabiliseren.

Atmosferische en oceanische storingen ten gevolge van antropogene CO₂-emissies sinds 1750 zullen gedurende eeuwen aanhouden gelet op de trage herverdeling van koolstof in de terrestrische en oceanische reservoirs.

Men verwacht ook dat de CO₂-concentratie in de atmosfeer zich nog gedurende

eeuwen zal stand houden op een niveau dat dicht bij het ooit bereikte maximumniveau ligt, daar natuurlijke processen de CO₂-concentratie pas na een heel lange periode (op geologische schaal) kunnen terugbrengen op pre-industrieel niveau. De stabilisering van de uitstoot van broeikasgassen met een kortere levensduur zoals methaan, kan misschien in enkele decennia tijd de concentraties in de atmosfeer stabiliseren.

Zoals voorheen vermeld, reageert het klimaat altijd met enige vertraging op een verstoorde stralingsbalans. De oceanen en de cryosfeer (ijskappen, gletsjers en permafrost) zijn de hoofdoorzaken van de natuurlijke inertie van het klimaatsysteem op millenniumschaal, gelet op hun massa en hun dikte. Het zeeniveau gaat over verscheidene millennia blijven stijgen om verschillende redenen. De penetratie van de warmte van de atmosfeer in de bovenste gemengde lagen van de oceaan duurt slechts enkele decennia, maar het kan eeuwen



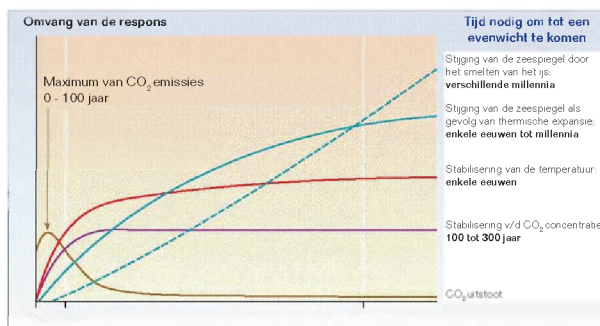
Redenen tot ongerustheid omtrent de gevolgen van de geprojecteerde klimaatveranderingen.

Het risico dat klimaatveranderingen een negatief effect hebben stijgt naarmate ze ingrijpender worden. Het linkse gedeelte van de tabel toont de waargenomen temperatuurstijging ten opzichte van 1990 en de geschatte temperatuur door Werkgroep 1 voor de scenario's van het Speciale Rapport over Emissiescenario's van het IPCC (IPCC-SRES, 2000). Het rechtse gedeelte bevat de vijf redenen tot ongerustheid omtrent het risico op een klimaatverandering van nu tot het jaar 2100. Wit staat voor de neutrale of weinig belangrijke negatieve of positieve gevolgen, geel voor de kleine negatieve gevolgen en rood voor de duidelijkere negatieve gevolgen.

2.8.2 Trage natuur

Om een inschatting te maken van de veranderingen in de emissietrajecten die nodig zijn om het klimaat te stabiliseren en te voorkomen dat de gemiddelde temperatuur wereldwijd 2 °C boven het pre-industriele niveau uitstijgt, moet men de aaneenschakeling van

duren vooraleer die warmte tot in de diepere waterlagen doordringt. Bijgevolg zal een stijging van het zeeniveau als gevolg van de thermische expansie van het zeewater zich over eeuwen uitspreiden, zelfs indien de atmosfeer al is gestabiliseerd. En bovendien zal het wegsmelten van de ijskappen nog meer tijd in beslag nemen (zie figuur hieronder).



CO₂-concentratie, temperatuur en zeeniveau blijven stijgen lang nadat de emissies zijn afgenomen. (IPCC-TAR – Climate Change 2001: The Scientific Basis).

2.8.3 Kyoto, een eerste belangrijke stap

De toekomstige klimaatveranderingen worden bepaald door de uitstoot van broeikasgassen vroeger, nu en in de toekomst. Hoe minder broeikasgassen worden uitgestoten en hoe sneller dat gebeurt, hoe minder fors en snel dan gepland de aarde zal opwarmen en het zeeniveau zal stijgen.

Het in 1997 goedgekeurde Protocol van Kyoto (1997) heeft als doel de uitstoot van broeikasgassen in de geïndustrialiseerde wereld in de periode van 1990 tot 2008-2012 met gemiddeld 5 % te verminderen. Die doelstelling staat ver af van wat nodig is om het klimaat te 'redden' en de temperatuurstijging op 2 °C boven het pre-industriële niveau te houden. Er kon worden opgemaakt dat bij de volledige uitvoering van het Protocol van Kyoto door alle geïndustrialiseerde landen, de CO₂-concentratie in 2100 maar 1 tot 1,5 ppm lager zou zijn dan wanneer geen enkele maatregel zou

zijn genomen. Toch is Kyoto belangrijk, zoals professor Bolin, de voormalige voorzitter van het IPCC het stelde: *"Gelet op de verblijftijd van CO₂ in de atmosfeer is zelfs de geringste verlaging van het groeipercentage van CO₂ in de atmosfeer van aanzienlijk belang op lange termijn"*. Niettemin moeten er nog heel wat andere stappen worden gezet.

2.9 Op te heffen onzekerheden in verder onderzoek

Er werd heel wat vooruitgang geboekt in het inzicht in de verschillende aspecten van de klimaatveranderingen en de antropogene respons. Toch zijn er volgens het derde assessment rapport van het IPCC (IPCC-TAR - Climate Change 2001) een aantal gebieden waar extra onderzoek nodig is:

- ✓ Opsporen en analyseren van de oorzaken van de klimaatveranderingen.
- ✓ Begrijpen en voorspellen van regionale klimaatveranderingen en -extremen.
- ✓ Kwantificeren van de impact van klimaatveranderingen op mondiaal, regionaal en lokaal niveau.
- ✓ Analyseren van de aanpassingen aan de veranderingen en van activiteiten om de wijzigingen te milderen.
- ✓ Inpassen van alle aspecten van de klimaatveranderingen in strategieën voor duurzame ontwikkeling.
- ✓ Verrichten van geïntegreerd en gedetailleerd onderzoek ter evaluatie van het begrip 'gevaarlijke antropogene verstoring van het klimaatsysteem'.

3. De rol van oceanen in *global change*



3.1 Van een bron van CO₂ naar een put voor CO₂

Tot voor kort waren de oceanen een bron van koolstofdioxide (CO₂) voor de atmosfeer. Elk jaar stootten ze in de atmosfeer 520 miljoen ton (Mt) CO₂ uit. Deze was afkomstig van chemische en biologische reacties die in de mariene koolstofcyclus waren betrokken.

De situatie is nu echter volkomen omgekeerd: de concentratie aan CO₂ in de atmosfeer is zo sterk toegenomen (zie Hoofdstukken 1 en 2), dat de oceanen er enorme hoeveelheden CO₂ uit opnemen. Even de cijfers: volgens het 'IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995' (IPCC, 1995a) stoot de mens jaarlijks in de atmosfeer 7.100 ± 1.100 Mt koolstof (onder de vorm van koolstofdioxide) uit. Daarvan wordt 3.800 ± 200 Mt weer weggevangen: het meeste door de oceanen (2.000 ± 800 Mt) en de rest door een hele resem acceptoren ('koolstofsinks' of koolstofputten) die slecht

zijn geïdentificeerd.

Ondanks het belang van de oceanen in het temperen van de klimaatwijziging, zijn lang niet alle parameters bekend die bij de complexe processen van de mariene koolstofcyclus zijn betrokken. Bovendien bevatten de metingen en modellen die de uitwisseling van CO₂ tussen de atmosfeer en de oceaan in kaart brengen, nog heel wat hiaten. Zo houden de globale modellen bijvoorbeeld alleen maar met de open zeeën en oceanen rekening, terwijl ze het belang van de kustzones, het continentaal plat en de continentale hellingen negeren. Maar het is precies in deze zones dat de actiefste biologische processen plaatsvinden.

3.2 Fysische, chemische en biologische pompen

3.2.1 Vormen van koolstof in de oceaan

In de hydrosfeer is koolstof (C) in anorganische (minerale) en organische vorm aanwezig. In het vervolg van dit hoofdstuk zullen we vaak

over opgelost CO_2 of CO_2 in water spreken. Opgelost in water zal koolstofdioxide (CO_2) vooral de vorm van bicarbonaationen (HCO_3^-) aannemen en in mindere mate de vorm van carbonaationen (CO_3^{2-}). Als we het over opgeloste CO_2 hebben, denken we impliciet aan de volgende evenwichtsreacties:



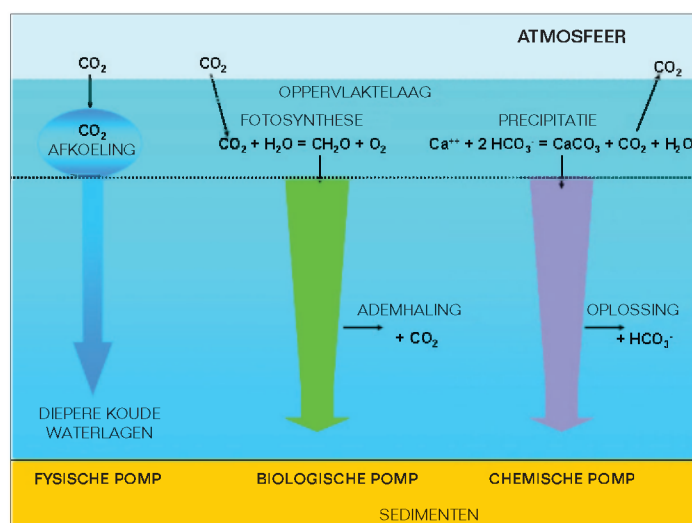
Deze reacties (waar het H^+ ion tussenkomt) tonen aan dat anorganisch koolstof een belangrijke rol speelt bij de regulatie van de zuurtegraad (pH) van het zeewater.

Verder is anorganisch koolstof ook in de vorm van calciumcarbonaat (CaCO_3) aanwezig, en dit als vaste deeltjes. Vele levende organismen (gaande van microscopisch kleine algen, over schelpen, tot koralen) maken CaCO_3 aan om hun in- of uitwendige skelet te produceren.

3.2.2 Van ondiep naar diep water

Koolstofdioxide (CO_2) is een gas dat gemakkelijk in water oplost. Vandaar dat er permanent een uitwisseling is van dit gas in de atmosfeer, in zeeën en oceanen. Als de concentratie aan CO_2 in de atmosfeer toeneemt, zal ook de concentratie in de oppervlakte waterlagen (die in contact met de atmosfeer staan) toenemen. De totale hoeveelheid CO_2 die tussen de oceaan en de atmosfeer wordt uitgewisseld, hangt in de eerste plaats af van de grootte van het contactoppervlak en de dikte van de waterlaag die met de lucht in contact staat. Meestal blijft de dikte van deze 'menglaag' tot enkele honderden meters beperkt. Een tweede belangrijke factor is de temperatuur. De oplosbaarheid van CO_2 is omgekeerd evenredig met de temperatuur van het water: hoe lager de temperatuur, hoe meer gasmoleculen er zullen oplossen.

De diepere waterlagen van de oceanen komen niet rechtstreeks met de atmosfeer in contact. Bij de accumulatie van CO_2 door deze lagen spelen andere mechanismen een rol. De drie belangrijkste processen die voor een transfer van CO_2 van de bovenste naar de onderste waterlagen zorgen, zijn de fysische-, biologische- en chemische (of carbonaat-) pompen (zie figuur hieronder).



Schematische voorstelling van de belangrijkste koolstofpompen in de oceaan.

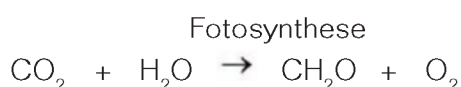
3.2.3 Fysische pomp

Door de verschillen in dichtheid van het oceaانwater (veroorzaakt door variaties in temperatuur en zoutgehalte) ontstaan er stromingen doorheen al de oceanen, wat men de thermohaliene stroming noemt. Koud en zwaar water (rijk aan opgelost CO_2) zakt in de Noord-Atlantische Oceaan naar de diepte. Op deze manier ontstaat een transfer van koolstof van het oppervlaktewater naar de diepere waterlagen. Dit proces (wat ook de fysische pomp wordt genoemd), vormt een koolstofput voor een periode van enkele duizenden jaren. Dit wil zeggen dat het koolstof dat op deze manier door de diepe waterlagen van de oceaan wordt opgenomen, gemiddeld pas na enkele duizenden jaren weer aan de atmosfeer wordt afgegeven.

De rol van oceanen in *global change*

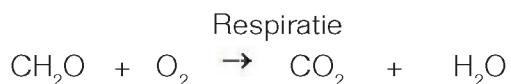
3.2.4 Biologische pomp

Een ander belangrijk mechanisme om koolstof uit de atmosfeer te binden, is fotosynthese. Fotosynthetiserende organismen zijn in staat om, onder invloed van licht, CO_2 in koolwaterstoffen om te zetten. Ze maken daarbij ook zuurstof (O_2) vrij. Een vereenvoudigde reactievergelijking van het proces kan als volgt worden uitgeschreven:



waarbij formaldehyde (CH_2O) de vereenvoudigde voorstelling van het gesynthetiseerde organische materiaal is.

Alleen in de bovenste zone van de oceanen (de eufotische zone) is er voldoende licht om fotosynthese te laten gebeuren. Vandaar dat het vooral algen zijn die in de oceanen voor fotosynthese zorgen. De levende of dode algen zijn het voedsel voor andere organismen (zooplankton, vissen, bacteriën). Deze zetten op hun beurt een deel van de organisch vastgelegde koolstof weer in CO_2 om. Dat proces heet verbranding en soms wordt het ook wel eens 'respiratie' genoemd. De verbranding verloopt precies omgekeerd aan de fotosynthese:



Als de respiratie in de bovenste waterlagen gebeurt, kan het vrijgekomen CO_2 in de fotosynthese worden gerecycleerd of naar de atmosfeer uitgestoten. Een deel van de organisch gebonden koolstof zakt echter in de vorm van dode organismen of fecaal afval naar diepere waterlagen. In de intermediaire waterlagen (boven de 1.000 meter) wordt deze organische koolstof (meestal door bacteriën) eveneens tot CO_2 afgebroken,

maar het vrijgekomen CO_2 kan echter niet worden uitgewisseld met de atmosfeer en blijft in opgeloste vorm. Deze intermediaire watermassa's vormen op een tijdschaal van enkele tientallen jaren een koolstofput.

Slechts een kleine fractie van de koolstof die in de bovenste waterlagen organisch werd gebonden, bereikt uiteindelijk de bodem van de oceaan. Deze moleculen worden na afzetting door organismen die op de zeebodem leven (de bentische organismen) verder afgebroken. Tenslotte wordt een nog kleinere fractie van het bezonken organisch materiaal begraven en in mariene sedimenten vastgehouden. Deze koolstof wordt gedurende miljoenen jaren opgeborgen.

3.2.5 Chemische pomp

De chemische pomp of carbonaatpomp wordt recentelijk ook beschouwd als een belangrijk mechanisme om koolstof van hogere naar diepere waterlagen te transfereren. Veel levende zeeorganismen bouwen vanuit opgelost bicarbonaat en calciumionen een skelet op van calciumcarbonaat (CaCO_3). De reactie is als volgt:



Dit is dus een proces waarbij CO_2 wordt geproduceerd maar het laat ook de sedimentatie toe van skeletten van dode organismen. In de diepere waterlagen kan een deel van de CaCO_3 onder invloed van lagere temperatuur en hogere druk, opnieuw in bicarbonaat- (HCO_3^-) en calcium- (Ca^{2+}) ionen uiteenvallen. Niettemin geraakt een belangrijke fractie van de CaCO_3 voor miljoenen jaren in mariene sedimenten begraven.

3.3 Hoe efficiënt is de oceaan als koolstofput?

3.3.1 Onderzoek kusten en de Zuidelijke Oceaan

Wetend dat de oceanen vandaag een aanzienlijk deel van de antropogene CO_2 -uitstoot in de atmosfeer opnemen. Het blijft echter moeilijk te voorspellen hoe de concentraties van CO_2 in de lucht zullen evolueren en hoe het klimaat verder zal veranderen. Eén van de grootste problemen is dat modellen die de koolstofcyclus beschrijven bijna allemaal uitsluitend rekening met de open oceanen en dus nauwelijks met de continentale hellingen, kustzones en estuaria houden. De heterogeniteit en de complexiteit van de processen in deze gebieden, maakt het moeilijk om deze de processen in globale modellen over de koolstofcyclus te integreren. En toch zijn deze gebieden (die maar 7% van het totale oceanoppervlak bestrijken) enorm belangrijk: er vinden zeer actieve fysische, chemische en biologische processen plaats die de koolstofcyclus van de oceanen heel sterk beïnvloeden en voor een belangrijk deel van de koolstofuitwisseling op mondiale schaal verantwoordelijk zijn.

Een ander heel belangrijk gebied is de Zuidelijke Oceaan rond Antarctica. Naar schatting draagt deze oceaan voor 30% bij aan de functie van de wereldwijde oceanen als koolstofput, terwijl ze slechts 10% van de totale oceanoppervlakte voor haar rekening neemt. Maar de processen die bij de koolstofcyclus in deze oceaan zijn betrokken, blijven grotendeels een blinde vlek in onze kennis.

Diverse Belgische onderzoekers hebben bijgedragen om deze onzekerheden op te lossen. Een deel van hun antwoorden wordt in de volgende paragrafen samengevat.

3.3.2 CO_2 in oppervlaktewater nabij kustgebieden

De beste methode om de uitwisseling van gassen tussen atmosfeer en oceaan over de hele wereld in te schatten, is wellicht het wereldwijd meten van de concentratie van CO_2 in de oppervlaktewateren, op zoveel mogelijk verschillende plaatsen. Ook Belgische onderzoekers dragen hierin bij, en zelfs in belangrijke mate. Want het blijft opvallend hoe gebrek aan gegevens over kustgebieden, continentale randen en de Zuidelijke Oceaan blijven.

Rivieren en estuaria

Rivierwater bevat hoge concentraties aan opgelost CO_2 , te wijten aan de afbraak van organisch materiaal uit afvalwater dat door de mens wordt geloosd en van organisch materiaal dat van het land afspoelt. Ook in deze toegenomen erosie heeft de mens de hand.

■ De distributie van opgelost koolstofdioxide (CO_2) en de uitwisseling met de atmosfeer in estuaria worden intensief door ULg-OCEANCHEM bestudeerd. De onderzoekers ontwikkelden zelf een groot deel van hun meetapparaten. Hiermee zijn zij niet alleen in staat om de concentratie aan opgelost CO_2 te meten, maar kunnen ze ook rechtstreeks de gasuitwisseling tussen het lucht- en wateroppervlak meten. Hun eerste metingen voerden ze in het estuarium van de Schelde uit, waar de concentratie aan CO_2 ruim 25 keer de evenwichtsconcentratie overschrijdt. Daardoor is de Schelde een belangrijke bron van CO_2 voor de atmosfeer. Dagelijks zou het een hoeveelheid tot 790 ton koolstof betreffen. De ULg onderzoekers hebben inmiddels het aantal meetgebieden fors uitgebreid. Ze hielden tien estuaria van verschillende

De rol van oceanen in *global change*

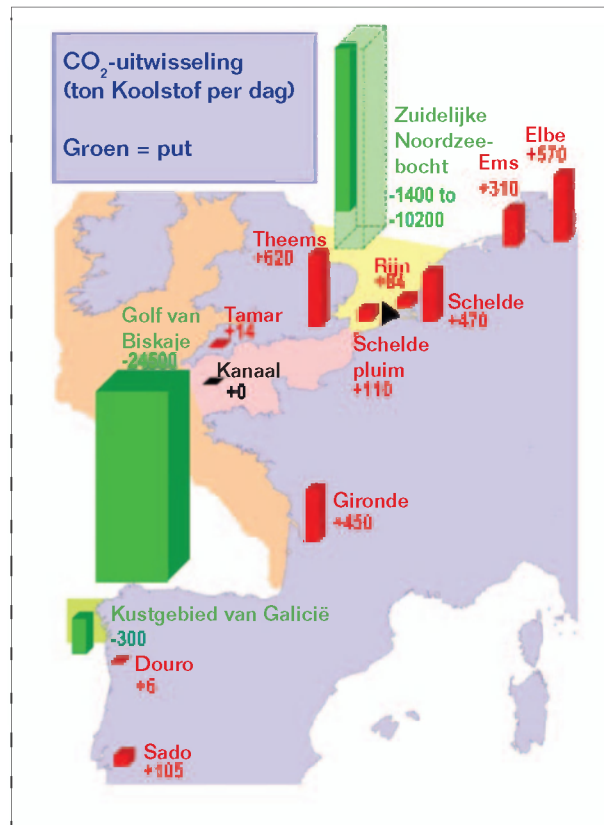
Europese rivieren in de gaten (EU project BIOGEST, 'Biogas Transfer in Estuaries'). Uit dat onderzoek blijkt dat de Europese rivieren jaarlijks 30 tot 60 Mt koolstof in de lucht brengen, wat ongeveer 5 tot 10% van de totale Europese antropogene uitstoot is.

Onderzoekers van ULg-OCEANCHEM en VUB-ANCH voeren nu tevens hun metingen buiten Europa uit, onder meer in een aantal mangrove-estuarium in Zuid-Oost Azië en Oost-Afrika.

Kustgebieden

In het water van de kustgebieden is de concentratie aan opgelost CO_2 afhankelijk van diverse processen: er is de instroom van CO_2 -rijk water uit de rivieren, maar ook de opwelling van water uit diepere waterlagen. Deze opwelling aan de randen van het continentaal plat is onder meer beïnvloed door de wind. Het water uit de diepere waterlagen is niet alleen koud, maar als gevolg van de afbraak van bezonken organisch materiaal, ook rijk aan CO_2 . Tevens is het water rijk aan voedingsstoffen waardoor de groei van algen wordt gestimuleerd en er op termijn een verhoogde opname van CO_2 gebeurt.

van Gallicië en de Noordzee; zie figuur hieronder) fungeren op jaarbasis als koolstofputten. De bijdrage op mondiale schaal van kustgebieden blijft echter een punt van discussie. Vandaar dat onderzoek van andere kustgebieden noodzakelijk is.



CO₂-uitwisseling tussen de atmosfeer en de zee voor verschillende Europese kustgebieden. (ULg-OCEANCHEM).

3.3.3 Biologische pomp in kustgebieden

De biologische pomp wordt op het continentale plat door een groot aantal andere parameters beïnvloed dan in de open oceanen. In een kustzone zullen deeltjes met organisch materiaal sneller tot op de bodem zinken en sneller worden begraven. Bovendien zijn de kustgebieden tevens de zones waar het organische materiaal uit de rivieren en estuarium neerslaat. Door deze snelle accumulatie van organische sedimenten wordt een veel

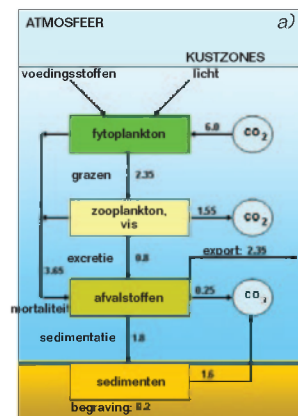
intensere biologische activiteit ondersteund (mollusken, vissen, wormen, bacteriën, etc.) dan in de open oceanen.

■ Een aantal Belgische onderzoeksteams hebben een multidisciplinaire samenwerking opgezet die de belangrijkste processen en parameters met betrekking tot de koolstofcyclus in de Zuidelijke Noordzeebocht (in het Engels 'the Southern Bight') tracht te ontrafelen. Door hun onderzoek kregen ze een beter inzicht op de verticale distributie van organisch materiaal, benthische organismen (in en op de zeebodem levende organismen), oxidanten en metabolieten in mariene sedimenten.

■ Verder ontwikkelden ze diverse modellen: hydrodynamische (KBIN-MUMM), chemische (ULB-GMMA, ULB-OCEAN, ULg-OCEANCHEM, VUB-ANCH) en biologische (UGent-MARBIOL, ULB-GMMA, ULB-ESA, ULB-OCEAN, ULg-OCEANBIO, VUB-ECOL). Daarmee kunnen ze de gegevens beter integreren over lange termijn, wat ze tevens toelaat om te voorspellen wat de gevolgen zijn voor het leefmilieu bij veranderende milieuomstandigheden (bijvoorbeeld bij baggerwerken).

■ Samengevat hebben de onderzoekers aangetoond dat de fotosynthetische productie in de Zuidelijke Noordzeebocht ongeveer 230 g koolstof per m² per jaar bedraagt, wat ongeveer drie keer meer is dan in de open oceaan. Het overgrote deel van deze productie wordt echter opnieuw afgebroken en tot CO₂ omgezet of naar het noordelijke deel van de Noordzee geëxporteerd. Ongeveer 4% van de totale productie wordt afgezet en in de sedimenten begraven.

De Belgische resultaten stemmen sterk overeen met wat andere onderzoekers in kustgebieden aan de Noord-Atlantische Oceaan of het noordelijk deel van de Stille Oceaan vonden. Door al deze gegevens samen te brengen, werd een voorlopige balans van de koolstof flux van alle kustgebieden over de wereld opgesteld, zoals weergegeven in onderstaande figuur.



Koolstofcyclus voor alle kustgebieden van de hele wereld (in miljard ton koolstof -C- per jaar). (ULB-OCEAN).

3.3.4 Biologische pomp in de diepe oceaan

Het belang van de biologische pomp in de zeeën rond Antarctica was tot voor kort onvoldoende in kaart gebracht. Dankzij lange termijn onderzoek (onder meer door Belgische wetenschappers) weten we nu dat deze oceanen op jaarbasis een koolstofput vormen. Zo zou alleen al de Indische sector van de Zuidelijke Oceaan op jaarbasis 250 Mt koolstof opnemen. Deze CO₂ blijft gedurende verschillende decennia tot enkele eeuwen in de diepere waterlagen van deze oceaan opgevangen. De biologische pomp is niet enkel actief in de diepe oceaan maar ook op de continentale randen, zoals een aantal Belgische onderzoeksgroepen in de Golf van Biskaje hebben aangetoond.

■ VUB-ANCH en ULB-OCEAN spitsen zich toe op de verbetering van de technieken voor het meten van de concentratie

De rol van oceanen in *global change*

- organisch gebonden koolstof in diepere waterlagen. Tevens is men door 10-jaar lange oceanografische metingen en het opstellen van modellen (VUB-ANCH, ULB-ESA, ULg-OCEANCHEM, UCL-ASTR, KMMA) heel wat over de rol van oceanen rond Antarctica als koolstofput te weten gekomen.

3.3.5 Belang van de chemische pomp

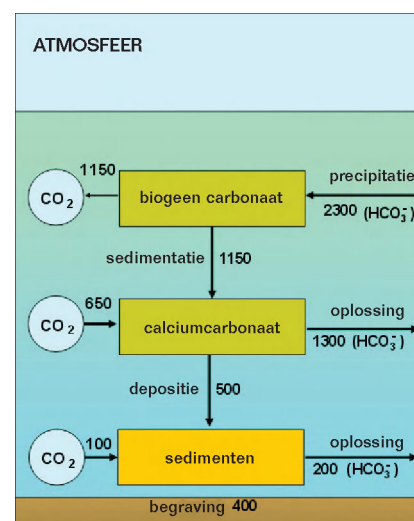
Tot nu toe was er in het onderzoek naar de koolstofcyclus weinig aandacht voor de anorganische koolstofcyclus. Veruit de meeste aandacht ging naar de organische koolstofcyclus. Toch is de koolstof die in calciumcarbonaat (CaCO_3) is gebonden, een belangrijke speler in de globale koolstofcyclus. Kalkgesteente op het land is immers gevoelig voor erosie en lost in regenwater op tot bicarbonaat- (HCO_3^-) en calcium- (Ca^{2+}) ionen. Deze komen uiteindelijk in de zeeën en de oceanen terecht aan een wereldwijde rato van maximaal 390 Mt koolstof per jaar. Om de chemische samenstelling van de oceanen te behouden, zal de ene helft van deze koolstof als CaCO_3 neerslaan en de andere als CO_2 in de atmosfeer opgaan.

Coccolieten zijn een belangrijke groep van algen die een kalkskelet aanmaken. Ze zijn bijvoorbeeld het meest dominante species in de Golf van Biskaje. Per m^2 wateroppervlakte kunnen zij tot 100 g koolstof per jaar tot CaCO_3 omzetten. Toch wordt slechts een klein deel van dat kalkgebonden koolstof ook op de bodem afgezet en begraven. Een groot deel wordt wellicht in calcium- en bicarbonaationen opnieuw opgelost.

- **Koraalriffen zijn de voornaamste producenten van calciumcarbonaat. Naar schatting fixeren ze wereldwijd 100 miljoen ton koolstof per jaar. Maar omdat ze door algen met een relatief actief koolstofmetabolisme worden opgebouwd,**

- **is het vaak moeilijk om hun netto-effect op de CO_2 -balans te berekenen. Volgens onderzoek dat door ULg-OCEANCHEM werd uitgevoerd, zijn koraalriffen eerder een bron van CO_2 die nog wordt versterkt bij een toenemende atmosferische CO_2 -concentratie. Alleen in een voedselrijk (eutroof) milieu zouden koraalriffen een functie als koolstofput vervullen.**

Onderstaande figuur geeft een voorlopige globale balans weer van de fluxen die verbonden zijn aan de chemische pomp. Deze toont aan dat het neerslaan van carbonaat (CO_3^{2-}) in oppervlaktewateren, het terug oplossen ervan in diepere waterlagen en de sedimentatie op de bodem een efficiënte koolstofpomp vormen die, die zoals de biologische pomp, verantwoordelijk is voor een verticale flux van koolstof.



Voorlopige globale cyclus van calciumcarbonaat (CaCO_3) in het mariene systeem (alle fluxen zijn in miljoen ton koolstof -C- per jaar aangegeven). (R. Wollast, ULB-OCEAN).

Uit deze figuur valt op te maken dat de oceaan op dit ogenblik geen systeem in evenwicht is: er is een overmaat aan carbonaat dat wordt afgezet ten opzichte van de input uit rivieren. Toch vormt deze afzetting geen additionele koolstofput voor CO_2 omdat de

neerslag van één carbonaatmolecuul ook één CO_2 -molecuul genereert. Er blijven in de oceanische carbonaatcyclus nog vele parameters onbekend en binnen de Belgische onderzoeksgemeenschap zijn er verschillende initiatieven om deze onzekerheden weg te werken.

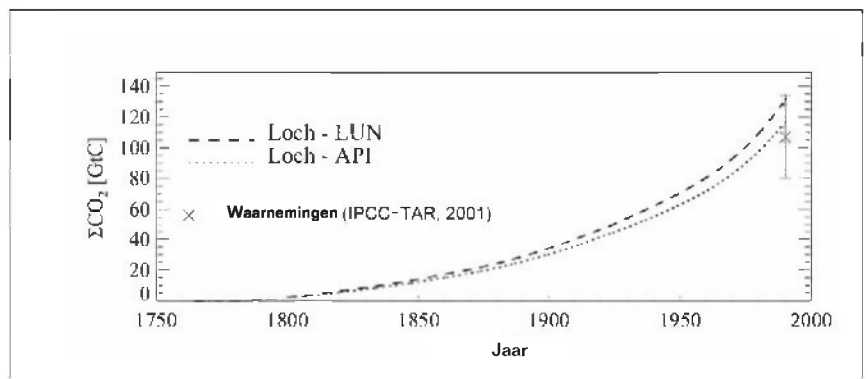
3.3.6 Gebruik van modellen

Zoals hierboven vermeld, is gebleken dat oceanen op dit ogenblik aanzienlijk veel koolstof opnemen. Om nu te weten welke de invloed van menselijk handelen is op dit fenomeen, zijn er modellen gemaakt die ook voorspellingen kunnen doen.

Belgische onderzoekers zijn al enige tijd betrokken bij metingen en de ontwikkeling van modellen die de uitwisseling van koolstof tussen atmosfeer en hydrosfeer beschrijven. Dit werk is niet alleen belangrijk om de flux te berekenen, maar ook om de toekomstige evolutie van de gehele koolstofcyclus te voorspellen. Een voorbeeld van een dergelijk model is LOCH, dat door ULg-LPAP werd ontwikkeld. Het gaat om een driedimensionaal reactie-transportmodel dat de evolutie van talrijke koolstofparameters in de oceanen nagaat: de totale hoeveelheid organisch en anorganisch koolstof, de alkaliniteit en het gehalte aan fosfaten (PO_4^{3-}), silica (SiO_2) en zuurstof (O_2). De belangrijkste processen die in het model worden meegenomen, zijn de uitwisseling van gas aan het zeeoppervlak tussen hydrosfeer en atmosfeer, alsook de fysische, biologische

en chemische processen waarmee koolstof naar de diepere waterlagen migreert.

LOCH functioneert binnen de 'Oceanic General Circulation Scale' modellen die de algemene oceaancirculatie beschrijven, en laat onder meer toe om in te schatten hoeveel koolstof er sinds 1765 inmiddels door de oceanen is opgenomen (zie figuur hieronder). Bovendien blijkt dat de totale uitwisseling van koolstof tussen de oceanen en de atmosfeer in werkelijkheid een veelvoud is van de 2.000 Mt die de oceaan jaarlijks opneemt.



Hoeveelheid koolstof (C) die sinds 1765 in de oceanen wordt opgeslagen volgens verschillende numerieke modellen. Deze houden rekening met de stijging van de stikstofdioxide (CO_2) concentratie in de atmosfeer. (ULg-LPAP).

3.4 Belang van voedingstoffen

3.4.1 Meer dan licht

Fotosynthetiserende organismen hebben niet voldoende aan licht alleen. Ze moeten ook over voedingstoffen kunnen beschikken. De belangrijkste hierin zijn stikstof (N) en fosfor (P), maar sporenelementen als ijzer (Fe) en zink (Zn) mogen eveneens niet ontbreken. Bovendien hebben sommige organismen, zoals diatomeeën (kiezelwieren), ook opgelost silica (SiO_2) nodig voor de constructie van hun skelet. Als de beschikbaarheid van deze voedingsstoffen onvoldoende is, zal de primaire productie

De rol van oceanen in *global change*

stilvallen. Daarom speelt de beschikbaarheid van deze elementen in het oceaanmilieu een belangrijke rol bij de functie van oceanen als koolstofput.

3.4.2 Stikstof

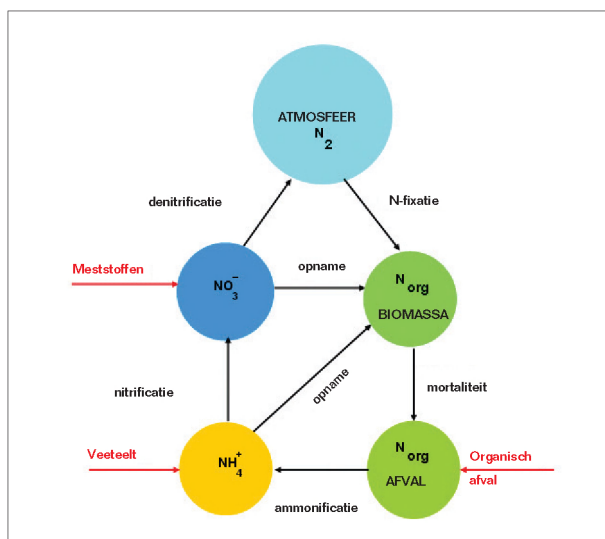
Vervuilde rivieren

Stikstof (N), in de vorm van nitraat (NO_3^-) of ammonium (NH_4^+), wordt vaak als de belangrijkste limiterende voedingsstof in de meeste mariene systemen beschouwd. Vandaar dat het meer aandacht dan andere nutriënten krijgt.

De stikstofcyclus is relatief complex (zie figuur hieronder). Stikstof komt in water het meest als opgelost stikstofgas (N_2) voor. Maar in deze vorm is het slechts heel moeilijk bruikbaar als stikstofbron voor het fytoplankton. In de vorm van nitraten kan fytoplankton wel het stikstof opnemen en aanwenden om biomassa te produceren. Als deze biomassa terug wordt afgebroken, komt de stikstof opnieuw in het water vrij, en dit in de vorm van ammonium. Op die manier is het gemakkelijk opneembaar door het fytoplankton. Bovendien kan het door bacteriën tot nitraat worden omgezet (nitrificatie). Bij afwezigheid van zuurstof

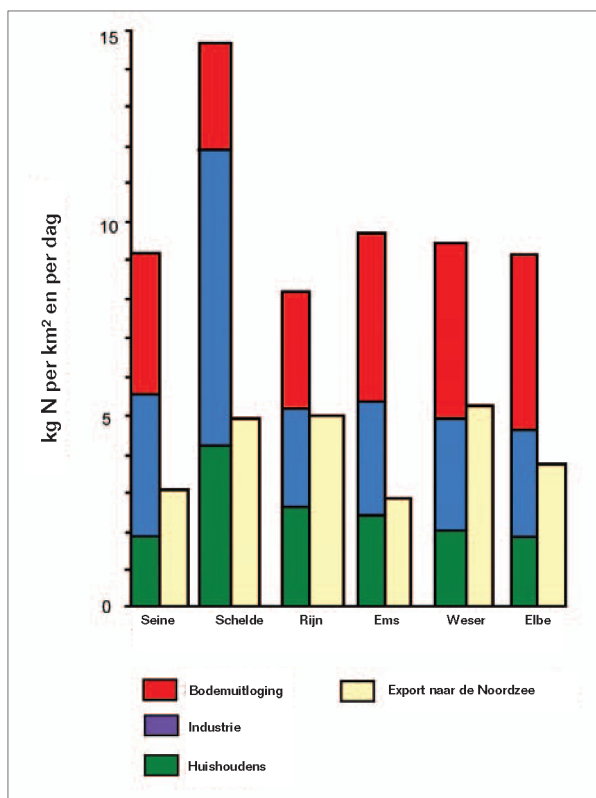
(O_2) kunnen bacteriën nitraat ook terug tot stikstofgas omzetten (denitrificatie).

Door zijn activiteiten grijpt de mens zwaar in de stikstofcyclus in. Onder meer door overbemesting en het lozen van afvalwater (zowel industrieel als huishoudelijk) komen er massaal stikstofverbindingen in de rivieren terecht, wat tot een overmatige algengroei leidt. Toch zijn de rivieren lang niet de enige bron van stikstof voor het zeewater van de kustgebieden.



Schematische voorstelling van de stikstofcyclus (N) in rivieren en mariene milieu's.

De stikstofcyclus in de hydrosfeer werd door UA-MiTAC, ULB-GMMA, ULB-ESA, ULB-OCEAN en VUB-ANCH bestudeerd. Uit hun onderzoek kan worden afgeleid dat in de Europese rivieren de concentratie aan stikstofverbindingen met een factor tien tot honderd groter is dan in onvervuilde rivieren. Daardoor ontstaat een overmatige algengroei, een proces dat ook wel eutrofiëring wordt genoemd. Het is echter verrassend dat slechts de helft van die overmaat aan stikstof uiteindelijk in de Noordzee terechtkomt (zie figuur op de volgende bladzijde). Dit betekent dat een deel onderweg wordt 'verwerkt', enerzijds door anaërobe bacteriën die de stikstofverbindingen tot stikstofgas omzetten en anderzijds doordat de stikstofverbindingen op de bodem van de rivieren neerslaan. Volgens een studie van ULB-GMMA zou de conventionele zuivering van afvalwater voor een vermindering van de denitrificatie in de rivieren verantwoordelijk zijn. Het zuiveringsproces zorgt immers voor een daling van de totale organische belasting, waardoor de waterkolom en de sedimenten aërober blijven. Dit fenomeen wordt tevens door het huidige rivierbeleid versterkt, dat in een hogere stroomsnelheid en het beter



Schatting van de hoeveelheden stikstof (N) die via landbouw, industrie en huishoudelijke activiteiten terechtkomt in rivieren die in de Noordzee uitmonden. (ULB-GMMA).

- beluchten van de waterkolom voorziet.
- Die hoge investeringen in conventionele waterzuivering en rivierbeleid resulteren dus eerder in het paradoxale effect dat er meer stikstof in de zee terechtkomt.
- In een andere studie toonde ULB-ESA aan dat tertiaire waterbehandeling (de verwijdering van stikstof en fosfor uit afvalwater) onvoldoende is om de toenemende eutrofiëring van de kustgebieden in de Zuidelijke Noordzeebocht en de Noordzee op te lossen als niet tegelijkertijd de input van stikstof vanuit de landbouw wordt aangepakt.
- ULB-GMMA en ULB-OCEAN bestuderen eveneens de processen die de stikstofcyclus in sedimenten beïnvloeden.
- Zij ontwikkelden modellen om de recycling van organisch stikstof te beschrijven

- en de stromen van verschillende stikstofverbindingen (NO_3^- , NH_4^+ , N_2) te voorspellen. Hieruit bleek dat de snelle recyclage van stikstof in de sedimenten een belangrijke oorzaak is van de hoge productiviteit van het continentale plat.

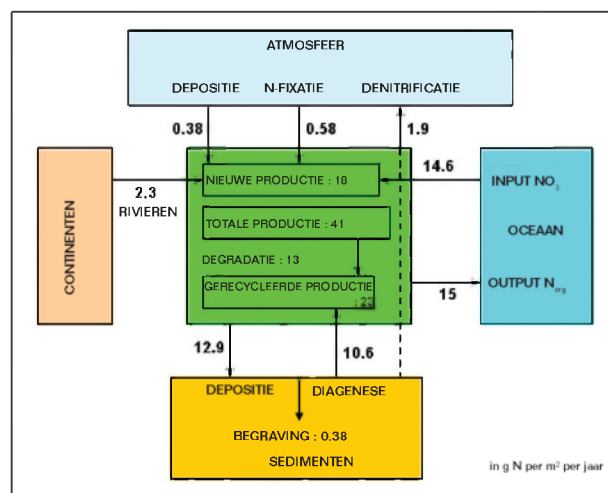
Diepe waterlagen

In de jaren 1960-1970 waren onderzoekers ervan overtuigd dat de belangrijkste bron van nutriënten voor de kustgebieden de instroom van rivieren was. Toch blijkt uit recenter onderzoek dat de opwelling van nutriëntrijke, diepe waterlagen langsheen het continentale plat zijn belang heeft. Hoe groot dat uiteindelijk is, was tot voor kort onduidelijk. Belgische onderzoekers waren bij de eerste om hierover experimenten op te zetten.

- ULB-OCEAN, ULg-OCEANCHEM en VUB-ANCH onderzochten de opwelling van diepe waterlagen en de invloed ervan op de stikstofcyclus in de Golf van Biskaje.
- De verticale vermenging van intermediaire waterlagen zorgt volgens hen voor een productie van organisch gebonden koolstof die tot 200 g koolstof per m^2 en per jaar bedraagt. Dat is meer dan dubbel zoveel in vergelijking met de productie die wordt gemeten in nabijgelegen meetstations in de open oceaan waar deze opwelling niet gebeurt. Verder toonden de onderzoekers aan dat het nutriëntrijke opwellende water niet tot de Golf van Biskaje blijft beperkt. Het wordt door de stroming mee in het Kanaal gestuwd, en dit tot aan de Zuidelijke Noordzeebocht. In heel dit gebied zouden de diepe waterlagen van de Atlantische Oceaan de belangrijkste bron van stikstofnutriënten zijn, veel belangrijker dan de rivieren die in de Noordzee uitmonden.

De rol van oceanen in *global change*

Een voorlopige raming van de stikstofluxen in kustgebieden over de hele wereld wordt in de volgende figuur gegeven. Deze schatting werd gemaakt op basis van meetgegevens en modellen ontwikkeld door UA-MiTAC, ULB-GMMA, ULB-ESA, ULB-OCEAN en VUB-ANCH. Daarin is de rol van de stikstofrecyclage opvallend, evenals de flux van stikstof uit de diepere waterlagen. De geëxporteerde nutriënten dienen in het oppervlaktewater te worden vervangen, ofwel door verticale vermenging van de waterkolom ofwel door de invoer vanuit rivieren en de atmosfeer. De productie die met deze niet-gerecycleerde nutriënten wordt geassocieerd, wordt ook wel eens 'nieuwe productie' genoemd. De bijdrage vanuit de rivieren is relatief bescheiden: 15% van de nieuwe productie.



Gemiddelde globale flux van stikstof (N) in de kustzones. (UA-MiTAC, ULB-GMMA, ULB-ESA, ULB-OCEAN en VUB-ANCH).

3.4.3 Fosfor

Fosfor (P) in de vorm van fosfaten (PO_4^{3-}) is een tweede belangrijke nutriënt voor het fytoplankton. In de meeste natuurlijke mariene systemen is de beschikbaarheid aan fosfor voldoende. Zelden raakt deze stof in de waterkolom volledig uitgeput.

Proportioneel is de input van antropogeen fosfor in de hydrosfeer lager dan deze van

stikstof. Sinds het verschijnen op de markt van waspoeders zonder fosfaten is de lozing van fosfaten in het oppervlaktewater zelfs aanzienlijk afgenomen. Daarom kan in sommige stroomgebieden fosfor toch de groeilimiterende factor worden. In deze omgevingen is fosforrecycling een belangrijke factor voor de primaire productie van organisch gebonden koolstof.

- Onder meer ULB-OCEAN, ULB-ESA en VUB-ANCH bestuderen de fosfordynamiek in de Zuidelijke Noordzeebocht. Zij trachten uit te zoeken welke organismen bij de fosforopname en recyclage zijn betrokken. Uit preliminaire resultaten blijkt dat in kustgebieden vooral bacteriën de belangrijkste consumenten van opgeloste fosfaten zijn.

3.4.4 Silica

Antropogene activiteiten dragen in belangrijke mate bij tot de toename van de nutriënten (vooral stikstof en fosfor) die door de rivieren naar de Noordzee worden getransporteerd. Hierdoor eutrofiëert het Belgische kustwater.

Voor sommige micro-organismen, zoals diatomeeën (kiezelwieren), is opgelost silica (siliciumdioxide, SiO_2) eveneens een belangrijke nutriënt: zo hebben diatomeeën deze stof nodig voor de opbouw van hun skelet.

Door dammen en sluizen te bouwen en andere interventies in de hydrologische cyclus, zorgt de mens ervoor dat er een verhoogde retentie en opvang van silicaten in meren, reservoirs en rivieren is. Daardoor ontstaat er in het kustwater een relatief tekort aan silica in vergelijking met de overmaat aan nitraat en fosfaat. Zodoende kan de samenstelling van het fytoplankton veranderen en bijgevolg de hele voedselketen van de mariene kustgebieden wijzigen.

- ULB-OCEAN en UGent-PAE trachten met het project SISCO ('Retentie van silica langs het Schelde continuüm en de impact op eutrofiëring in de kustzone') de silica flux in de Schelde in kaart te brengen en de impact ervan op de eutrofiëring van het zeewater aan de kustgebieden te berekenen.
- Als gevolg van de sterke stikstof- en fosforbemesting vanuit de rivieren, ontstaat er elk jaar in de lente een explosieve groei van algen (Phaeocystis-kolonies) in het water van de Zuidelijke Noordzeebocht. Volgens onderzoekers van ULB-ESA zijn deze kolonies sterk resistent tegen de traditionele grazers van fytoplankton en hebben ze een negatieve impact op het mariene ecosysteem en de omgeving. In een niet-verstoord marien milieu, waar er geen stikstof- en fosforbemesting gebeurt en er voldoende silica aanwezig is, worden de Phaeocystis-kolonies door een vroege lentebloei van diatomeeën in de hand gehouden. ULB-ESA heeft een complex biologisch model ontwikkeld (MIRO&CO) waarmee de timing, grootte en geografische verspreiding van de diatomee- en Phaeocystis-bloei kan worden berekend, dit uitgaande van de synergie tussen klimaat en antropogene activiteiten.

3.4.5 IJzer

Recent werd aangetoond dat voor de productie van organische materie door fytoplankton de beschikbaarheid van ijzer (Fe) een limiterende factor kan zijn. Dit is onder meer het geval in de Zuidelijke Oceaan rond Antarctica. Dat heeft geleid tot enkele grootschalige experimenten waarbij de oceaan met ijzer werd 'bemest'. Bij één van deze experimenten waren Belgische onderzoekers betrokken, waarover meer in de volgende paragraaf.

3.5 De oceaan een handje toesteken

3.5.1 Bemesten of injecteren

Koolstofdioxide (CO_2) is het belangrijkste broeikasgas (zie Hoofdstukken 1 en 2). Het draagt naar schatting voor tweederde bij aan het proces van klimaatwijziging. De belangrijkste reden waarom de concentratie aan CO_2 in de atmosfeer stijgt, is de verbranding van fossiele brandstoffen door de mens. Eén manier om die uitstoot te verminderen, ligt in de overschakeling op alternatieve energiebronnen die geen broeikasgassen genereren. Een ander alternatief bestaat erin de uitgestoten broeikasgassen in zogenaamde koolstofputten of -reservoirs te laten opnemen.

De oceanen bevatten naar schatting al 40.000 miljard ton aan koolstof: dit is zowat 50 keer meer dan er in de atmosfeer zit opgeslagen. Alleen al die cijfers maken duidelijk dat de hydrosfeer verreweg het meest geschikt lijkt om als potentiële afzetplaats voor de overmaat aan CO_2 dienst te doen.

Wetenschappers onderzoeken hoe we de opname van koolstof door de oceanen kunnen versnellen. Ze denken daarbij aan twee technieken: de bovenste lagen van de oceaan met voedingsstoffen bemesten of CO_2 rechtstreeks in de diepere waterlagen injecteren.

Het onderzoek naar deze processen wordt sterk aangemoedigd door een aantal landen, zoals de VS, Japan en Noorwegen. Zij ondersteunen grootschalige experimenten en er werden zelfs al octrooien aangevraagd. Dit is een duidelijke indicatie dat er enorme economische belangen met de ontwikkeling en exploitatie van deze technologieën zijn gemoeid.

Toch zijn andere onderzoekers minder gelukkig met deze experimenten. Zij vinden dat de mogelijke risico's onvoldoende tegen de voordelen worden afgewogen en dat er een gebrek is aan dialoog over het vastleggen van grondige, wetenschappelijke evaluatiecriteria.

De rol van oceanen in *global change*

3.5.2 Efficiëntie van bemesten

De theorie

Een verhoging van de primaire productie van organische materie aan het zeeoppervlak zou tot een verhoogde opname van koolstof uit de atmosfeer moeten leiden. Het idee is dat de organische materie bezinkt en wordt afgebroken in de diepere waterlagen waar de vrijgekomen CO_2 voor vele tientallen tot zelfs duizenden jaren in oplossing blijft. Volgens de voorstanders van dit proces is een bijkomend voordeel dat een hogere concentratie aan organisch gebonden koolstof de voedselketen stimuleert, wat uiteindelijk de visproductie ten goede zou moeten komen.

Het experiment

Zowel in de Zuidelijke Oceaan als de Stille Oceaan ter hoogte van de evenaar wordt de productie van fytoplankton door een gebrek aan ijzer belemmerd. Stikstof en fosfor zijn in die gebieden in voldoende mate aanwezig. Vandaar dat onderzoekers hun oog op deze twee gebieden hebben laten vallen om er vier grootschalige bemestingsexperimenten met ijzer uit te voeren.

De resultaten

Uit experimenten blijkt dat de productie van fytoplankton na de ijzerbemesting sterk toeneemt. Toch zijn niet alle wetenschappers overtuigd. Volgens sommigen is die toename slechts heel tijdelijk: de predators van het fytoplankton zijn nog niet aan de nieuwe situatie aangepast. Verder observeren zij dat slechts heel weinig koolstof naar intermediaire waterlagen bezinkt. Daardoor zou de verhoogde opname van koolstof net na bemesting met ijzer een koolstofput zijn die slechts enkele jaren meegaat.

Zelfs als er meer koolstof naar diepe waterlagen bezinkt, is er een risico op onaangename neveneffecten. De toegenomen

bezinking van organisch koolstof zou immers tot een hogere respiratie leiden, waardoor er snel een zuurstofgebrek in de diepere waterlagen zou ontstaan. Hierdoor zou het toxische gas waterstofsulfide (H_2S), maar ook methaan (CH_4) en stikstofoxiden (NO_x) worden gevormd. En beide laatste zijn veel sterkere broeikasgassen dan koolstofdioxide (CO_2)!

Gezien het grote aantal onzekerheden dat met de grootschalige bemesting van oceanen samenhangt, wensen heel wat wetenschappers een consensus over wetenschappelijke evaluatiecriteria. Helaas stellen zij vast dat op dit ogenblik een grondige discussie ontbreekt.

3.5.3 Efficiëntie van injectie

Bij deze techniek zou koolstofdioxide (CO_2), in bijna zuivere vorm, in de oceaan worden gebracht. Om te vermijden dat het gas snel terug in de atmosfeer komt, zou het in één keer op grote diepte ($> 1.000\text{m}$) in de oceaan worden geïnjecteerd, zodat het voor duizenden jaren opgeslagen blijft. De techniek zou in feite een versnelling van de natuurlijke mechanismen betekenen, waarbij koolstof in de bovenste lagen wordt opgevangen en slechts heel langzaam naar de onderste lagen migreert.

Tot nu toe werden diverse technieken voor het injecteren van CO_2 in diepere waterlagen voorgesteld. De mogelijke risico's voor het ecosysteem zijn echter nog grotendeels onbekend. Wetenschappers vrezen in de eerste plaats een plaatselijke verzuring van het water. Lokaal zou de zuurtegraad van het water tot een pH van 4 kunnen dalen, wat zeker een bedreiging voor de plaatselijke ecosystemen betekent. Hoe dan ook moet er rekening mee worden gehouden dat de biomassa van de levende materie in de oceanen dieper dan 1.000 meter relatief beperkt is.

Of de massale injectie van CO_2 in de diepere waterlagen een optie is om de klimaatwijziging te temperen, lijkt in eerste instantie van sociale



en politieke argumenten af te hangen. Rekening houdend met het principe van voorzichtigheid tegenover de ecosystemen van de oceaan, lijkt dat de implementering van deze strategie pas mogelijk is indien alle partijen (publiek en privaat) aan het debat kunnen deelnemen.

4 *Global change in ecosystems*



4.1 **Het verlies aan biodiversiteit**

Het leven op aarde is al vanaf het prille begin - een 3,8 miljard jaar geleden - aan talrijke veranderingen onderhevig. Perioden waarin het biologische leven zich sterk diversifieerde, werden met perioden van massaal afsterven afgewisseld. Biologen schatten dat er tot nu toe vijf keer een massale extinctie van soorten voorkwam. Ook vandaag bevinden we ons in een tijdperk waarin soorten in grote hoeveelheden afsterven: naar schatting verdwijnen er dagelijks 137 diersoorten. Aan dit tempo zullen over 100 jaar zowat de helft van de hedendaagse soorten verdwenen zijn. Het huidige tijdperk wordt dan ook wel als de zesde golf van massaal uitsterven bestempeld. Het verschil is dat het verlies aan soorten zich voltrekt aan een snelheid die vele malen groter is dan deze van de voorgaande extinctiegolven én dat de oorzaken niet altijd natuurlijk zijn.

4.1.1 **Effecten van diversiteit op de ecosysteemfunctie**

Om de teloorgang van de biologische diversiteit een halt toe te roepen, wordt steeds meer getracht om biotische systemen tegen het verlies aan soorten, habitat en ecosystemen te beschermen. Een gevolg van de groeiende belangstelling voor deze problematiek is ondermeer het tot stand komen van het Biodiversiteitsverdrag ('Convention on Biological Diversity', CBD). Daarmee werd een nieuwe impuls gegeven aan onderzoeksprojecten die zich op het verdwijnen van soorten, de implicaties op de biodiversiteit en de effecten op de ecosysteemfunctie richten. Sindsdien hebben veld- en vooral modelonderzoek zich op de relatie tussen het verlies aan diversiteit en de stabiliteit van de ecosysteemfunctie geconcentreerd. De resultaten zijn niet altijd eenduidig en soms zelfs tegenstrijdig. Maar ze tonen globaal toch aan dat een vermindering in de biodiversiteit rechtstreeks gevolgen op de ecosysteemfunctie heeft (zie Kader 11).

Kader 11: Biodiversiteit en Stabiliteit

Biodiversiteit = soortenrijkdom +
soortenevenwicht

Soortenrijkdom ('species richness') wordt ten onrechte vaak als synoniem voor diversiteit gebruikt, want de biodiversiteit is eveneens van het evenwicht van de soorten ('species evenness') afhankelijk. Alle soorten komen binnen hun natuurlijk verspreidingsgebied (het areaal van een soort) in een bepaalde hoeveelheid voor. Dit noemen we de abundantie van een soort. Binnen een habitat worden het aantal soorten en de maximale abundanties gelimiteerd door de hulpbronnen die slechts beperkt aanwezig zijn. Als er binnen eenzelfde natuurlijk gebied of habitat verschillende soorten met elk hun eigen abundantie voorkomen, wordt van een 'dominantiehiërarchie' gesproken. Hierbinnen verhouden de abundanties van de verschillende soorten zich tot elkaar. We spreken bijgevolg van dominante en sub-dominante soorten die in aantal beperkt voorkomen.

Een voorbeeld:

- ✓ Als de abundantie van de verschillende soorten ongeveer gelijk is en het maximaal aantal soorten dus evenwichtig over het aantal beschikbare plaatsen binnen een habitat (zogenoemde niches) is verdeeld, zal de diversiteit hoog zijn.
- ✓ Als de abundantie van de verschillende soorten echter niet gelijk is en slechts één soort zeer abundant aanwezig is, zal deze soort een groot aantal niches bezetten die bijgevolg niet door andere soorten kunnen worden ingenomen. Hierdoor zal het aantal soorten in de habitat beperkter en ook de diversiteit lager zijn. Wanneer één soort vrijwel alle habitat niches bezet en andere soorten zeer beperkt aanwezig zijn, spreken we van 'een monocultuur'. Veel van onze huidige agrarische systemen zijn voorbeelden van monoculturen.

Stabiliteit = weerstand + veerkracht

De mate waarin een ecosysteem of gemeenschap tegen stresssituaties en verstoringen is opgewassen, wordt als de 'stabiliteit' uitgedrukt. Onder stress vallen alle antropogene en natuurlijke factoren die de groei negatief beïnvloeden, bijvoorbeeld het gebrek aan voedingstoffen of licht, en suboptimale temperaturen. Verstoring duidt op alle (niet-)mechanische processen en factoren die de biomassa reduceren. Voor planten kan het hierbij om herbivorie en pathogenen gaan. De stabiliteit van een ecosysteem wordt door twee factoren bepaald: de weerstand of de mate waarin van de beginsituatie wordt afgeweken en de veerkracht of de tijd die nodig is om tot de beginsituatie terug te keren.

Diversiteit $\approx$ Stabiliteit

De relatie tussen de diversiteit en stabiliteit van een ecosysteem wordt in de 'diversiteit-stabiliteit' hypothese vertaald. Hoewel dit niet louter een 'oorzaak-gevolg'-relatie is, zijn beide wel sterk van elkaar afhankelijk. Gemeenschappen en ecosystemen met een hoge diversiteit kunnen het effect van verstoringen en stresssituaties over verschillende soorten verspreiden en zo de gemeenschap tegen decimering bufferen. Daartegenover staat dat, in een stabiel systeem, ook gevoelige soorten een kans krijgen. Daardoor zal het aantal soorten (en daarmee ook de diversiteit van het ecosysteem) toenemen. Er is, met andere woorden, ook een terugkoppeling tussen stabiele systemen en biodiversiteit. Volledige duidelijkheid omtrent het 'oorzaak-gevolg'-karakter van de diversiteit en de stabiliteit is er nog niet, maar zeker is dat beide componenten elkaar op verschillende gebieden beïnvloeden.

Global change in ecosystemen

Bovendien zou het verlies aan biodiversiteit ook indirecte effecten hebben op de manier waarop ecosystemen op andere globale (klimatologische) veranderingen reageren. Zo kon in simulatie-experimenten van natuurlijke hittegolven worden aangetoond dat de stabiliteit van de ecosysteemfunctie afhankelijk van de aanwezige soortendiversiteit is. Volgens voorspellingen door 'General Circulation Models' (Algemene Circulatiemodellen) (GCMs) zullen er zich in de toekomst meer van deze hittegolven, alsook andere extreme weergebeurtenissen, zoals overstromingen, tropische stormen, etc., manifesteren (zie Hoofdstuk 2).

■ **Onderzoekers van UA-PLECO en UGent-PP gebruikten artificiële modeecosystemen (graslandculturen) om het effect van soortenrijkdom op de overleving na extreme temperaturen te testen. Klimaatmodellen voorspellen een toename van dergelijke klimatologische extremen. De experimenten tonen verrassend genoeg aan dat minder diverse systemen niet noodzakelijk minder tegen extreme gebeurtenissen zijn opgewassen. Dit impliceert wel dat maatregelen die klimaatsverandering afremmen vooral diverse systemen zullen beschermen, door precies daar het biodiversiteitsverlies in te perken.**

■ **Andere experimenten die de effecten van diversiteit in een vegetatiegemeenschap onderzochten, ondersteunen de hypothese van de 'complementariteit van hulpbronnen'. Volgens deze, algemeen aanvaarde, hypothese zouden interspecifieke verschillen en voorkeuren van soorten tot een efficiëntere exploitatie van de verschillende hulpbronnen binnen een ecosysteem leiden. Door het grote aantal soorten wordt voorkomen dat**

■ **hulpbronnen uit het systeem verdwijnen. Een daling van de soortendiversiteit zal dus in een verarming van het gehele ecosysteem uitmonden.**

4.1.2 Effecten van beheer op diversiteit

In België vormen graslanden kwantitatief de belangrijkste (beheerde) ecosystemen: ze bedekken 50% van de landbouw- en 30% van de totale oppervlakte. Ter vergelijking: bossen en braakland bedekken slechts 12% van het Belgische grondgebied. Deze dominante positie van graslanden vloeit voort uit de economische voordelen die ze bieden. Toch zijn ze ook ecologisch waardevol. Als gevolg van hun permanent karakter vormen ze een habitat voor een groot aantal plantensoorten. Daarenboven vereist hun beheer geen gebruik van bestrijdingsmiddelen. Enkel bemesting kan een ecologisch probleem vormen, maar dan enkel indien de toevoer van nutriënten te hoog is.

Graslanden zijn dus dominant en permanent in het Belgische landschap aanwezig en vormen zodoende een belangrijke bron voor de vegetatieve diversiteit. Soortenrijkdom kan door een juist beheer worden behouden of gemaximaliseerd.

■ **Het effect van verschillende beheersmethoden voor grasland (3, 4, 5 of 6 maaibeurten per jaar en 100, 250 of 400 kg stikstof –N– per ha per jaar) op de diversiteit werd experimenteel onderzocht. Uit deze studie kon worden geconcludeerd dat een hoge maaifrequentie (6 maaibeurten per jaar) in combinatie met een lage stikstofbemesting (100 kg N per ha per jaar) tot de meest diverse soortenrijkdom in graslanden leidt. Door de lage nutriëntentoevoer en een continue afvoer van nutriënten via maaibeurten kunnen zowel competitiekrachtige als**

- minder competitieve soorten voorkomen.
- Het totaal aantal soorten in Belgische graslandecosystemen kan bijgevolg toenemen indien van een intensief naar een extensief (wat nutriënteninput betreft) exploitatiebeleid wordt overgestapt.

4.1.3 De ondergang van een soort voorspellen en voorkomen

Onder de term 'Global Change' vallen niet alleen alle mondiale fysische en biologische natuurlijke veranderingen, maar ook deze die door de mens zijn geïnduceerd. Natuurlijke veranderingen verlopen meestal geleidelijk en vrij constant in de tijd. Bovendien zijn ze nauwelijks beïnvloedbaar. Antropogeen geïnduceerde veranderingen verlopen meestal zeer snel en op lokale schaal. Door hun algemeen voorkomen over de gehele aarde kunnen ze echter een mondiaal karakter krijgen. Deze antropogene impact op biologische systemen valt, in tegenstelling tot natuurlijke veranderingen, wel te reduceren (zeker op lokale schaal).

De ontwikkeling van analytische modellen, die de ecosysteem- of populatiefunctie simuleren, laat toe om deze antropogene impact in rekening te brengen en zo op voorhand de effecten ervan op lange termijn te voorspellen.

Habitatfragmentatie is een voorbeeld van een zeer lokale antropogene component van *global change*. De vernietiging en versnippering van resthabitats zijn ingrijpende processen met verstrekende gevolgen voor populaties en soorten. De effecten van deze antropogene component vallen modelmatig te voorspellen en ontwikkelingen kunnen lokaal gemakkelijk worden bijgesteld.

- Aan UCL-ECOL werd in dit kader de 'Populatie Leefbaarheids Analyse' ontwikkeld. Deze is in staat om de reacties van moerasparelmoervlinder

- populaties op verschillende scenario's te voorspellen. Deze vlinder komt voornamelijk in (veen)moerassen voor, zoals in de vallei van de Lienne (Lierneux, België). Het was de bedoeling om in dit gebied als beheersmaatregel runderen te introduceren. Op basis van voorspellingen, door de 'Populatie Leefbaarheids Analyse' gemaakt, werd de introductie tot bepaalde gebieden beperkt. Zo werd voorkomen dat heel de duizendknoopvegetatie zou worden verorberd. Want aangezien de duizendknoop een elementaire schakel in de levenscyclus van de moerasparelmoervlinder vormt, zou het verdwijnen ervan desastreuze gevolgen voor de vlinderpopulatie hebben (zie figuur hiernaast).

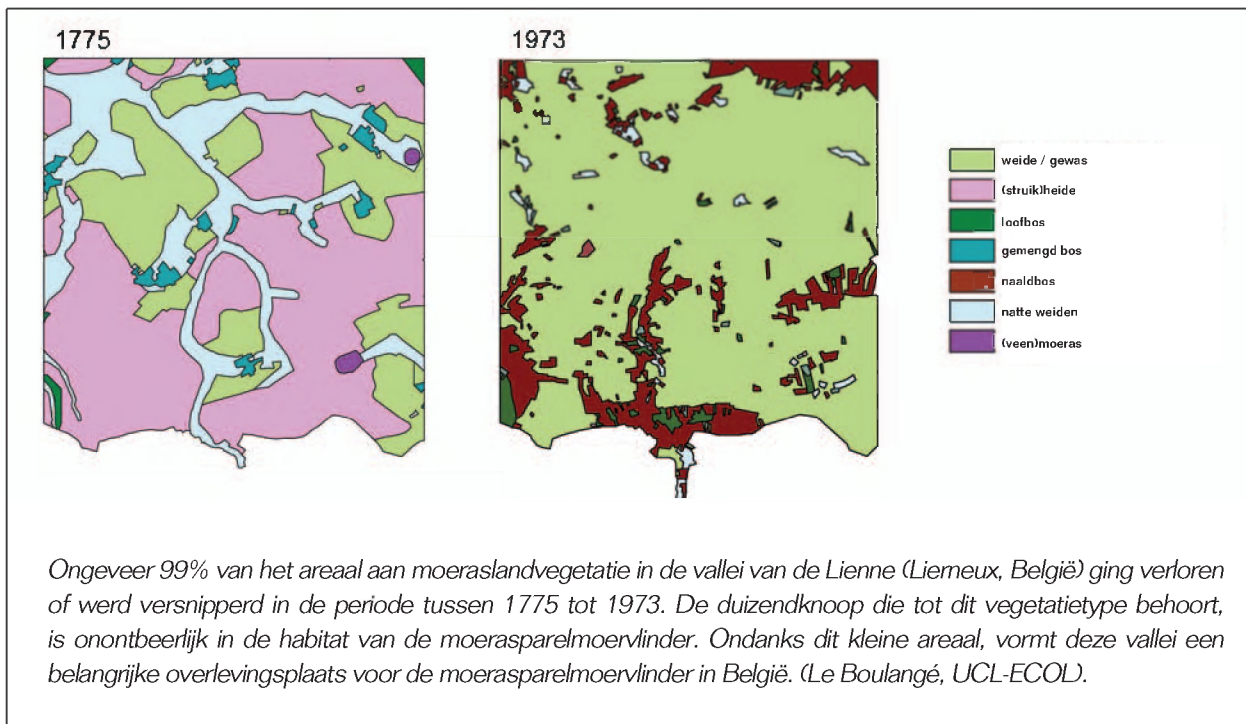
Modellen en analyses als de 'Populatie Leefbaarheids Analyse' geven onderzoekers en beheerders de kans om te reageren voor het te laat is. Een volgende stap in het proces is de ontwikkeling van modellen die aan verschillende landschapsvormen, regio's en soortenreeksen zijn aangepast. Zo worden de beheerders voorzien van een instrument dat ze toelaat om de effecten van verschillende beheersvormen te evalueren alvorens ze worden toegepast.

4.2 Ecosystemen en de toename aan broeikasgassen

4.2.1 Koolstofputten op het Belgische vasteland

Koolstofuitwisselingen tussen de atmosfeer, terrestrische systemen en de bodem worden door de fotosynthese en respiratie van de vegetatie op het land en de respiratie van bodembewonende organismen gecontroleerd. Toch zijn niet alle koolstofmoleculen in deze circulatie betrokken: een deel wordt onder meer in terrestrische ecosystemen opgeslagen. De

Global change in ecosystemen

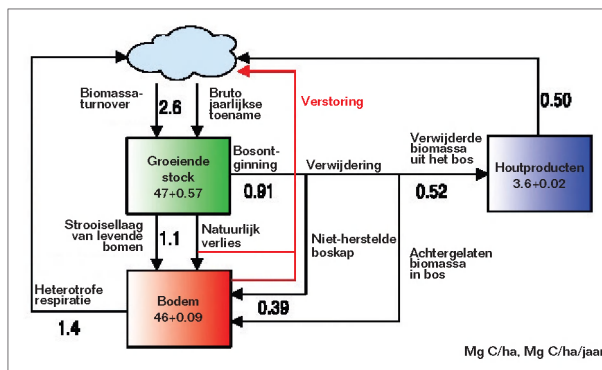


hoeveelheid koolstof die wordt opgeslagen, is van de 'Netto Ecosysteem Productie' (NEP) afhankelijk. Hoewel er verschillende factoren op de doorstroming en opslag van koolstof inwerken, zijn temperatuur en neerslag op globale schaal veruit de belangrijkste factoren (zie Kader 12).

Modellen

Als gevolg van de kwantificeerbare relaties tussen de koolstofvoorraden (levende biomassa, houtproductie en bodem) en de koolstofstromen (heterotrofe respiratie, houtkap) kunnen bostypes modelmatig aan de hand van de oppervlakte, het volume en de jaarlijkse toename per leeftijdsklasse worden beschreven. Het 'European Forest Information Scenario Model' (EFISCEN) beschrijft op deze wijze 2.689 Europese bostypes. Op basis van deze modellen en de verzamelde gegevens van veldwerk, kunnen voorspellingen over de hoedanigheid van de Europese bossen worden gemaakt (zie figuur hiernaast). Deze zijn uiterst relevant in het kader van het Kyoto Protocol (artikels 3.3 en 3.4) en de

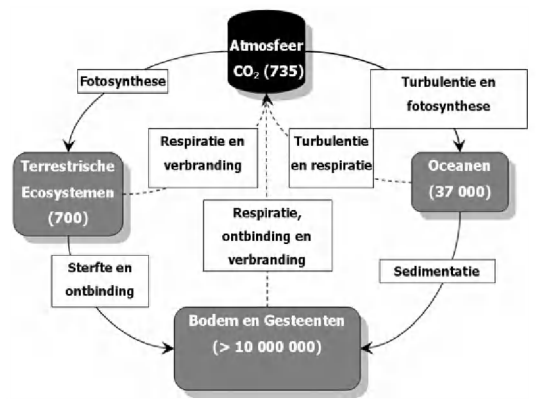
betrokken 'Conferences of the Parties' (COPs, Conferenties van de Partijen).



Schema van de onderlinge verbanden tussen koolstofvoorraden (levende biomassa, hout en de bodem) en -stromen (houtkap en heterotrofe respiratie) volgens het European Forest Information Scenario Model - EFISCEN. (Pussinen et al., 2000).

Van de koolstofstromen en -putten vallen de houtkap en -productie onder de beheersmaatregelen. In het EFISCEN-model worden de bosbeheersmaatregelen in twee niveau's opgedeeld: enerzijds het basisbeheer (waaronder uitdunning en houtkap) en anderzijds het totale oogstvolume (gespecificeerd voor het land en de boomsoort). Deze

Kader 12: Koolstofputten



De hoeveelheid koolstof (C) in de compartimenten is in 10⁹ ton (Gt) koolstof uitgedrukt. (naar IPCC, 1995b).

Onder de vastlegging van koolstof vallen alle processen waarin koolstof op een quasi permanente manier wordt gebonden. Het betreft de opname van koolstof in terrestrische ecosystemen, in de bodem en gesteenten, alsook in de oceanen. In deze koolstofputten komt koolstof onder verschillende vormen voor: in alle terrestrische ecosystemen als levende materie, in de oceanen in oplossing of als calciumcarbonaten en in de bodem als strooisel en gesteente. De oceaan- en bodemput vormen veruit de grootste. De koolstof die in de atmosfeer aanwezig

is en in levende organismen zit verrat, is kwantitatief van minder belang, maar behoort wel tot de circulerende koolstofput. Deze koolstof wordt door fotosynthese en respiratie continu tussen het terrestrische en het atmosferische systeem uitgewisseld. Een maat voor de hoeveelheid koolstof die in de vegetatie wordt geassimileerd, verminderd met het deel dat in het respiratieproces gaat verloren, is de Netto Primaire Productie (NPP). Dit is niet de eigenlijke 'opbrengst' voor een vegetatie aangezien steeds een bijkomstig deel door heterotrofe organismen wordt verbruikt. De NPP verminderd met dit deel is dan de Netto Ecosysteem Productie (NEP).

Hoewel de gesteenten en mineralen als koolstofput een zeer statisch karakter hebben, is daarin voornamelijk vanaf de industriële revolutie verandering gekomen. Door de verbranding van fossiele brandstoffen (en terrestrische systemen) vindt er een belangrijke verplaatsing van de koolstofmoleculen naar de atmosfeer plaats. Aangezien deze koolstof als koolstofdioxide (CO₂) vrijkomt en dit molecuul een broeikasgas is, blijven de gevolgen voor het klimaat niet uit.

beheersmaatregelen worden in het model op nationaal niveau bekeken waardoor 'het land' de basis ruimtelijke eenheid van het model vormt.

De hoeveelheid koolstof in de bodem is van de ontbindingssnelheid afhankelijk, die op haar beurt door de boven- en ondergrondse biomassa, de verhouding van houtachtige tot niet-houtachtige bestanddelen en de concentratie aan lignine in de bladeren wordt bepaald. Zo wordt het verschil van de hoeveelheid koolstof (C) in de bodem tussen loofbossen (120 kton C per ha) en naaldbossen (150 kton C per ha)

door de invloed van strooiselkwaliteit op de ontbindingssnelheid verklaard.

- **Onderzoek naar de Belgische terrestrische koolstofputten en -stromingen, dat door VITO-TAP en UCL-GEOG werd uitgevoerd, toonde aan dat de koolstofput in de bosbodem in evenwicht is met deze in de levende biomassa (zie tabel hieronder).**
- **Om tot deze cijfers te komen, werden gegevens uit de Vlaamse en Waalse regionale bosinventarissen gebruikt. De**

Global change in ecosystemen

Koolstofvoorraden en –stromen van Belgische terrestrische ecosystemen en bodems. (F. Veroustraete, VITO-TAP en B. Van Wesemael, UCL-GEOG).

Vorraden	Per eenheid land (ton C/ha)	Totalen voor België (kton C)
Bos biomassa	94.4	53,800
Bodem (van nationale bodemkartering 1950-1970)		
Humuslaag in bossen	61.5	35,000
Bodem (0-30 cm)	58 (10-190)	144,000
Bodem (0-100 cm)	98 (18-986)	241,000
Stromen	Per eenheid land (ton C/ha/yr)	Totalen voor België (kton C/yr)
Totale vegetatie NEP	4.8	14,600
Bos biomassa toenamen (NEP)	5.0	2,800
Houtkap	2.1	1,200
Bodem als gevolg van beheer	?	500-800

informatie over koolstof in de bodem is afkomstig van 13.000 beschrijvingen van bodemprofielen, opgemaakt tussen 1950 en 1970. Tevens werd van de gegevens van de BELSPO-projecten 'Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems' CASTEC en 'Modelling Ecosystem Trace Gas Emissions' METAGE gebruik gemaakt.

De resultaten zijn in overeenstemming met de bevindingen van de meeste Europese bossen. De hoeveelheid (circulerende) koolstof per oppervlak ligt in België weliswaar hoger dan het Europese gemiddelde. Dit is een gevolg van de gunstige temperatuur- en neerslagcondities in ons land.

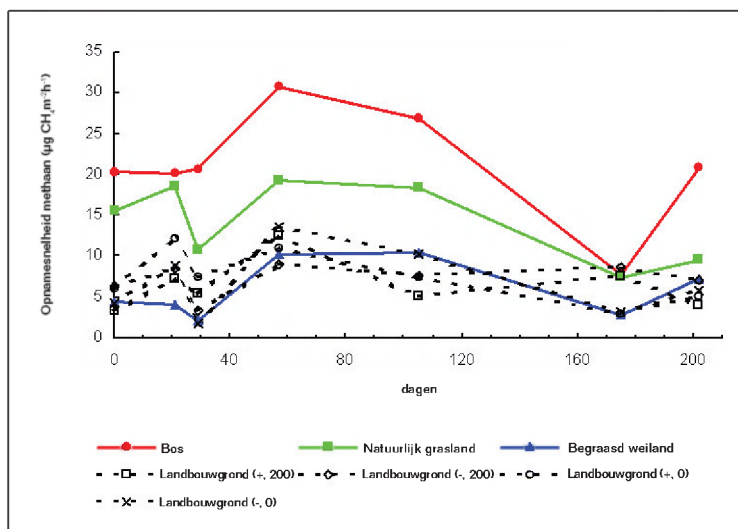
Aangezien in ons land de totale hoeveelheid koolstof in de bodem (276.000 kton C) in grote mate deze van de bosbiomassa (53.800 kton C) overschrijdt, is het duidelijk dat veranderingen in de bodem ingrijpende gevolgen op de nationale balans van broeikasgassen kunnen hebben. Daarom is verder onderzoek vereist om mogelijke veranderingen in deze koolstofput (als gevolg van wijzigingen in landgebruik, landbeheer en klimaat) te kwantificeren.

4.2.2 Andere gassen met impact op klimaat en ozon

Verscheidene bio- en geochemische reacties die in terrestrische ecosystemen plaatsvinden, dragen bij tot de vorming of opname uit de atmosfeer van gassen als methaan (CH_4), stikstofdioxide (N_2O) en andere stikstofoxiden (NO_x). Sommige zijn broeikasgassen (zie Hoofdstuk 2), terwijl andere een invloed op de concentratie van ozon in de atmosfeer hebben (zie Hoofdstuk 1). Daarom is het belangrijk om de uitwisseling van deze gassen tussen de terrestrische systemen en de atmosfeer grondig te bestuderen. Zo kunnen aërobe bodems tot 29.000 kton CH_4 per jaar opnemen. Ze vormen daarmee de belangrijkste afvoer van methaan naar de terrestrische koolstofput. Landbouwbodems zijn daarentegen met 60% van de globale NO_2 -emissie de belangrijkste bron van NO_2 voor de atmosfeer.

Uit onderzoek van onder meer UGent-ISOFYS blijkt dat de opname- en productiefunctie met betrekking tot CH_4 en N_2O van een aërobe bodem sterk van het klimaat en het bodembeheer afhankelijk is. Toch kan er algemeen worden gesteld dat

- de opnamecapaciteit voor CH_4 vermindert
- en de productie van N_2O vermeerdert door
- de conversie van een natuurlijke bodem
- naar een landbouwgrond (zie figuur
- hieronder).



Het effect van landgebruik op de opnamecapaciteit van methaan (CH_4) door terrestrische ecosystemen. Het '+' teken staat voor een bijkomstige bemesting met 175 kg ammoniumnitraat (NH_4NO_3) per ha en '200' voor een bemesting met 200 kg stikstof (N) per ha onder de vorm van drijfmest. (P. Boeckx, UGent-ISOFYS).

- Er werden emissiefactoren (EF) voor
- stikstofdioxide (N_2O) en stikstofoxide (NO)
- ontwikkeld die op de Belgische landbouw
- toepasbaar zijn. De resultaten van deze
- studies wezen op (i) de grote onzekerheid
- die bestaat i.v.m. de emissie van N_2O en (ii)
- het feit dat de EF voor N_2O voor intensieve
- landbouwsystemen groter is dan deze
- die in de richtlijnen voor inventarisatie
- van emissies van broeikasgassen van
- het 'Intergovernmental Panel on Climate
- Change' (IPCC, Intergouvernementeel
- Panel over Klimaatsverandering) in 1996
- werden opgenomen.

4.2.3 Jaarlijkse veranderingen

De koolstofvastlegging in de natuur vertoont jaarlijkse fluctuaties, en dit zowel op globale

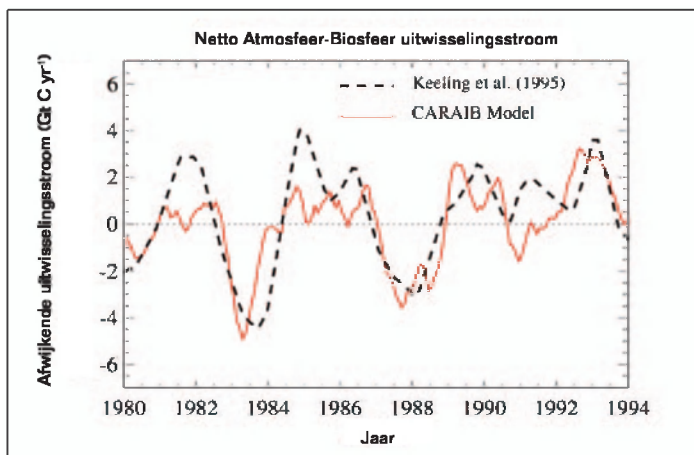
als lokale schaal. Deze variaties in de opname van koolstof zijn aan het weerspatroon toe te schrijven. Sommige van die weerspatronen gelden echter ook op globale schaal, zoals de 'El Niño'-effecten (zie Hoofdstuk 2). Het is uitermate belangrijk om deze variaties te begrijpen, aangezien de bijdrage van een ecosysteem met betrekking tot de koolstofvastlegging over langere perioden moet worden bepaald (minstens 10 jaar). Bovendien vormen ze door hun klein tijdsinterval een unieke kans om de voorspellingen van modellen aan de reële respons van ecosystemen te toetsen.

- De variaties in de netto stroom van
- koolstofdioxide (CO_2) van de atmosfeer
- naar de biosfeer kan op twee manieren
- worden berekend: door directe
- metingen van de hoeveelheid CO_2 in
- de atmosfeer op verschillende punten
- of van biosferische modellen gebruik
- te maken. Dergelijke metingen werden
- door ULg-LPAP uitgevoerd en in een
- vergelijkend onderzoek met het CARAIB-
- model ('Carbon Assimilation In the
- Biosphere') gebruikt. Deze vergelijking
- over de periode van 1980 tot 1993,
- weergegeven in de volgende figuur, leert
- dat de opname van CO_2 door terrestrische
- ecosystemen tijdens El Niño-periodes
- wordt gereduceerd.

4.2.4 Uitstoot van koolstof en opname in bossen

De belangrijkste antropogene bron van atmosferisch koolstof is de verbranding van fossiele brandstoffen. Ook de productie van cement levert een, niet te verwaarlozen, bijdrage aan de actuele CO_2 -emissie. Ondanks de toenemende bewustwording van de broeikasproblematiek neemt deze uitstoot van CO_2 nog steeds toe. Zo werd voor het 'Special Report on Radiative Forcing' (IPCC, 1995b) een

Global change in ecosystemen



De netto koolstofdioxide (CO_2) uitwisselingsstroom tussen de atmosfeer en de biosfeer tussen 1980 en 1993, berekend door het CARAIB (Carbon Assimilation In the Biosphere) model (ULg-LPAP) en gereconstrueerd door Keeling et al. (1995) uit metingen van de atmosferische CO_2 -concentraties en de isotoopsamenstelling. De weergegeven waarden zijn de verschillen ten opzichte van de gemiddelde waarde over de periode 1980-1993. (L. François, ULg-LPAP).

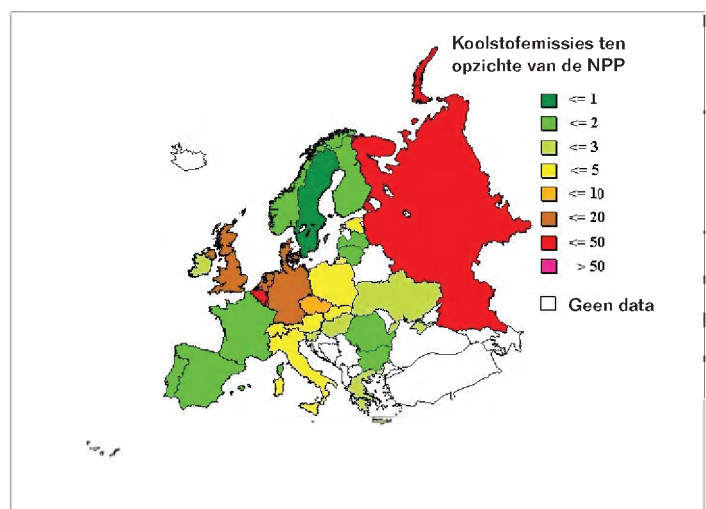
gemiddelde uitstoot van 5.500 miljoen ton (Mt) koolstof (C) per jaar voor de jaren 1980-1990 en 6.300 Mt C per jaar voor de jaren 1990-2000 berekend.

Natuurlijke systemen en bossen kunnen een belangrijke rol in de compensatie van alle teveel aan uitgestoten CO_2 spelen. Bossen zijn immers een belangrijk afvoerkanal van atmosferisch koolstof: ze kunnen grote hoeveelheden koolstof gedurende verschillende eeuwen onder de vorm van staande biomassa en strooisel op en in de bodem fixeren.

Ook de verschillende bostypes die België herbergt, bezitten deze koolstoffixerende eigenschap. Ze kunnen dus eveneens als een koolstoffixator worden ingezet om de stijging van broeikasgassen tegen te gaan. De opname van CO_2 in de vastleggingscyclus van een bepaald bostype door een correcte afstemming van de beheersmaatregelen, de herbebossing van kaalgekapte gebieden en het behoud van bestaande bostypes worden verhoogd en bespoedigd. Om een voorafgaande evaluatie van

de te treffen maatregelen mogelijk te maken, zijn computermodellen van de initiële en voorspelde vastlegingssnelheden onontbeerlijk.

■ Het 'C-Fix model', ontwikkeld door VITO-TAP, laat toe om de koolstoffixerende eigenschappen van een bos of een ecosysteem in kaart te brengen. Volgens dit model bedraagt de koolstoffixerende capaciteit van de huidige Europese vegetatie 111.000 Mt per jaar. Dit is slechts 7 tot 12% van de totale hoeveelheid antropogeen uitgestoten Europese koolstof. In geen enkel Europees land is de koolstofemissie op dit ogenblik met de koolstoffixerende capaciteit van de bossen in evenwicht. In de Benelux is de uitstoot-opname balans zelfs volledig uit evenwicht: er wordt 50 keer meer CO_2 uitgestoten dan er wordt opgenomen (zie figuur hieronder).



De ratio tussen de Netto Primaire Productie (NPP, in koolstof-C eenheden) en de totale antropogene koolstofemissies per land voor Europa in 1997. (VITO-TAP).

4.2.5 Landgebruik en beheersmaatregelen

De vastlegging van koolstof in de vegetatie en bodem zijn mogelijke wegen waarlangs de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer kan worden gereduceerd. Het is dan ook van cruciaal

belang dat de ingrepen zijn gekend die het vastleggingsproces kunnen bevorderen. Aangepaste beheersmaatregelen en verantwoord landgebruik hebben immers een invloed op de vastlegingssnelheid. Daarom vormen ze, bijkomend aan de reductie van de uitstoot, een mogelijke methode om de normen betreffende CO₂-emissie te bereiken zoals opgelegd door het Kyoto Protocol (artikel 3.3). Zo heeft de overschakeling van bos naar landbouwgrond meestal een daling van de hoeveelheid organische koolstof in de bodem tot gevolg. Dit is het resultaat van een afname van de strooiselininput, de verschillen in decompositiesnelheid van bladeren en oogstoverschotten en de bewerkingseffecten (toegenomen aëratie en afgenomen fysieke bescherming van de organische materie in de bodem). Tot de beheersmaatregelen die de hoeveelheid koolstof in de bodem verhogen, behoren onder meer het gebruik van bio-energieoogsten, het beperken van mestverspreiding tot de landbouwgronden, het regenereren van bossen, etc.

■ **Aan de hand van twee Belgische studies kan worden aangetoond dat de koolstofvastlegging in de bodem door veranderingen in het landgebruik en –beheer wordt beïnvloed en dat de potentiële koolstofopname van de bodem toeneemt. Tussen 1775 en 1973 onderging de vastlegging van koolstof in de Ardennen onder de vorm van ‘Soil Organic Carbon’ (SOC) ingrijpende veranderingen. Uit bodemprofielen (de geologische database) en een tijdserie van topografische kaarten konden veranderingen in landgebruik worden gereconstrueerd. In een periode van 200 jaar is de hoeveelheid SOC met 10,2 ton C per ha toegenomen. Toch is dat eerder beperkt indien de verhoging met de totale jaarlijkse opname van**

■ **koolstof door de Belgische ecosystemen (5 kton C per ha) wordt vergeleken. Helaas kunnen bestaande en geplande beheersmaatregelen in België slechts op een zeer beperkt gebied worden toegepast. Precies deze ruimtelijke beperkingen vormen de oorzaak van het zeer geringe opnamepotentieel van 180 tot 320 kton C per jaar, wat slechts 0,5 tot 0,8% van de Belgische emissie aan broeikasgassen tijdens het jaar 1990 vertegenwoordigde.**

4.2.6 Bodemverzuring en stikstofdepositie

De verrijking van het milieu met nutriënten (in het bijzonder stikstof) als gevolg van menselijke activiteiten vormt een ernstig probleem in verscheidene Belgische regio's. Deze 'bemesting' veroorzaakt verstoringen in ecologische processen (zoals biogeochemische cycli). De beperkte beschikbaarheid van de belangrijke nutriënt stikstof (N) reguleert in een niet vervuilde omgeving immers de competitie tussen plantensoorten. De vrijstelling van stikstof in een natuurlijke omgeving heeft dan ook een zware impact op de dominantiehiërarchie binnen de vegetatie.

De toevoer van nutriënten kan van de afzetting van stikstof- en zwavelverbindingen uit de atmosfeer afkomstig zijn. Gasvormige verbindingen, zoals zwaveldioxide (SO₂) en stikstofoxiden (NO_x), kunnen over zeer lange afstanden worden getransporteerd, terwijl andere gassen (zoals ammoniak, NH₃) eerder een lokale verspreiding kennen. Wanneer deze verbindingen in de bodem terecht komen, zorgen ze bovendien voor verzurende processen, zoals nitrificatie. De eind- en intermediaire producten van deze processen kunnen uitloggen en komen dan in het grondwater terecht.

Om al deze effecten in te perken, werden door de 'United Nations Economic Commission for Europe' (UNECE, Economische Commissie

Global change in ecosystemen

voor Europa van de Verenigde Naties) de zogenaamde 'Critical Loads' ontwikkeld. Deze kunnen worden gedefinieerd als: 'de maximale depositie van een gegeven component dat geen langdurige, schadelijke effecten aan de ecosysteemstructuur en -functie veroorzaakt'.

■ **Ook voor België werden 'Critical Loads' voor loof- en naaldbossen vastgelegd. Het BELFOR ('Belgian Forest ecosystems') project bepaalde de stikstofdepositie in vijf experimentele boscystemen in Vlaanderen en Wallonië. Het toonde aan dat in de Vlaamse loof- en naaldbossen de lange termijn 'Critical Loads' worden overschreden. Naast de controle van de atmosferische depositie toonde deze studie tevens aan dat 'Critical Loads' zeer lokaal dienen te worden bepaald en verschillend voor loof- en naaldbossen moeten zijn. Bovendien kan de hoge stikstofdepositie in noordelijk België tot een afname van het aantal micro-organismen in de bodem, een toenemende dominantie in ecosystemen van stikstofminnende vegetatie en een waarschijnlijke verontreiniging van het grondwater leiden.**

4.2.7 Belgische bossen in de 21^e eeuw

Wetenschappers verwachten dat de atmosferische CO₂-concentratie tegen het einde van de 21^e eeuw tot 550 à 1.000 ppmv (d.w.z. het aantal CO₂-moleculen op 1 miljoen luchtmoleculen) zal zijn opgelopen: een verdubbeling van de huidige concentratie van ongeveer 370 ppmv. Er wordt aangenomen dat de globale temperatuur daardoor met 1,4 tot 5,8°C zal toenemen. In België zal de temperatuur met 2 tot 4 °C stijgen, een fenomeen dat met een seizoens- en plaatsgebonden herverdeling van de neerslag zal toenemen. De wetenschappers verwachten voor onze regio een trend naar meer

neerslag in de winter en geen verandering tot minder neerslag in de zomer.

Ecosystemen, zoals bossen, zullen sterk door deze wijzigingen in concentratie aan koolstofdioxide (CO₂), temperatuur en neerslag worden beïnvloed. De grootte van die impact is moeilijk te voorspellen en kan alleen gebeuren met behulp van groeimodellen die rekening houden met de energie-, water-, koolstof- en nutriëntenhuishouding van deze ecosystemen en de impact daarop van buitenaf.

■ **Binnen het BELFOR-project hebben onderzoekers van ULg-LPAP het ASPECTS-model ontwikkeld ('Atmosphere-Soil-Plant Exchange of Carbon in Temperate Sylvae' of Uitwisseling van Koolstof door Atmosfeer-BodemPlanten in Gematigde Bossen). Dit werd op verscheidene bosgebieden in België getest. Onder meer onderzoekers van UA-PLECO en de FUSAGx-ECOPHYS hebben hieraan vanuit hun experimentele meetstations in Brasschaat en Vielsalm meegewerkt. Volgens hun onderzoek en de voorspellingen van ASPECTS zou de netto koolstofopname door de Belgische bossen in de 21^e eeuw toenemen, dit als gevolg van de versnelde fotosynthese (als resultaat van de hogere koolstofdioxideconcentratie in de lucht) en een verlenging van het groeiseizoen. De toename is echter afhankelijk van de ouderdom van het bos waarbij de maximale vastlegging door bossen tussen 20 en 40 jaar oud gebeurt. Bovendien spelen beheersmaatregelen en de jaarlijkse weercondities hierin een rol.**

4.3 Invloed op structuur, functie en verspreiding van ecosystemen

4.3.1 De productiviteit van Belgische graslanden

De toenemende atmosferische concentraties van koolstofdioxide (CO_2) en de daarmee gepaard gaande, mondiale temperatuurstijging, hebben een duidelijke invloed op het fotosyntheseproces en de respiratiesnelheid van de vegetatie. Een groot deel van de Belgische vegetatie bestaat uit graslanden en ook deze zullen als gevolg van deze *global change* effecten veranderen. Omwille van het economische belang en de dominante positie werden graslanden door verscheidene onderzoeksgroepen als modelsysteem uitgekozen.

■ Experimenten door UA-PLECO en UGent-PP bewijzen dat een langdurige blootstelling aan een verhoogd CO_2 -gehalte een invloed op de verschillende grassoorten heeft. Verschillende ecosysteemprocessen veranderen: de fotosynthesesnelheid neemt toe, maar het waterverbruik van de vegetatie neemt af. Dit laatste wordt veroorzaakt door de huidmondjes in het blad die zich als gevolg van de hogere CO_2 -concentratie meer sluiten. De hogere koolstofaanvoer zorgt bovendien voor dikkere bladeren en een dichter bladerdek. De temperatuur speelt voornamelijk in op biogeochemische processen die een invloed op de nutriëntenopname en groei hebben. Het temperatuurseffect is moeilijker te onderzoeken omdat temperatuuroptima tussen plantensoorten verschillen. Zo kan een temperatuurstoename in het voorjaar een heilzame werking hebben, terwijl dezelfde toename in de zomer voor droogtestress zorgt. De productiviteit van

■ graslanden kan dan ook sterk wijzigen als gevolg van een hogere temperatuur, en dit zowel in positieve als in negatieve zin. De invloed van de stijgende temperatuur op de productiviteit van graslanden heeft dan ook zijn invloed op de Belgische landbouw. Die wordt positief in het voorjaar (meer en snellere productie) beïnvloed, maar dit effect wordt door de negatieve invloed in de volle zomer overschaduwd. En daar doet zich een probleem voor, want de graslanden schieten nu reeds in het zomerseizoen te kort in de voedselvoorziening van de veestapel. Dit effect wordt in de toekomst nog meer uitgesproken als de CO_2 -concentraties verder blijven toenemen. Want alhoewel de graslandproductie daardoor verhoogt, heeft de geproduceerde biomassa een lagere kwaliteit doordat het eiwitgehalte daalt.

4.3.2 Beheersmaatregelen

Weinig maatregelen baten als reactie op een toenemende temperatuur. Volgens sommige onderzoekers zou een beperking van de nutriëntentoevoer een goede maatregel kunnen zijn. Dit zal immers de fotosynthesesnelheid doen afnemen en daarmee ook de openingsgraad van de huidmondjes verminderen. Zodoende zal de transpiratiesnelheid en dus eveneens de uitdroging verlagen, waardoor de vegetatie minder temperatuurgevoelig wordt. Deze maatregel zal echter het productieverlies (als gevolg van de temperatuurverhoging) niet kunnen voorkomen, aangezien een beperking van de nutriëntentoevoer op zich al een productiviteitsverlies met zich meebrengt. Alleen de overschakeling op plantensoorten die beter in een warmer klimaat gedijen, is een radicale maatregel die eventueel uitkomst biedt.

4.3.3 Mondiale vegetatiepatronen

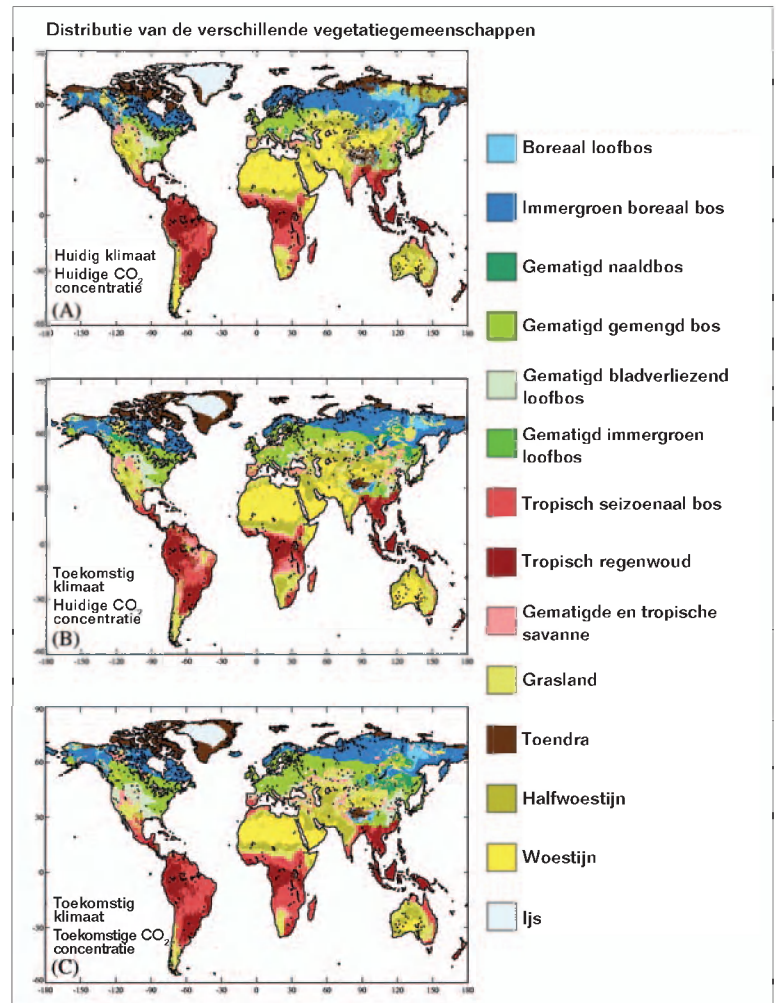
Niet alleen de functie, maar ook de verspreiding van de vegetatie op mondiale schaal zal door de stijgende temperatuur en CO_2 -concentratie worden beïnvloed. Modellen voorspellen dat er zich grote verschuivingen in de verspreiding van de verschillende vegetatiegemeenschappen (biomen) op aarde zullen voordoen.

- Een afname van de toendra aan de ene
- en een toename van de woestijnen
- aan de andere kant zijn enkele van de
- voorspellingen die worden gemaakt door
- het CARAIB (Carbon Assimilation In the
- Biosphere) model dat door ULg-LPAP werd
- ontwikkeld (zie figuur hiernaast). In dit model
- worden CO_2 -en temperatuursgeïnduceerde
- veranderingen gescheiden. Deze
- voorspellingen zijn echter uiteenlopend
- als één enkel of beide effect(en) in de
- berekeningen worden geïncorporeerd.
- Toch kan er worden verwacht dat soorten
- met een nauw tolerantiebereik onder
- de snel veranderende klimatologische
- omstandigheden zullen verdwijnen. Indien
- er geen substituu-soorten voor handen
- zijn, zal de koolstofopslag afnemen en
- het broeikas effect toenemen door emissie
- van CO_2 . Kortom, we zitten in een vicieuze
- cirkel.

4.4 Global change en impact op de waterbalans

4.4.1 Impact op Belgische hydrologische bekkens

Zoet water is, zowel in kwalitatief en kwantitatief opzicht, een waardevol goed. Dit wordt overduidelijk in de Europese (Water Framework Directive 2000/60/EC) en internationale (AGENDA 21, Chapter 18 on water resources) wetgeving benadrukt. *Global change* scenario's

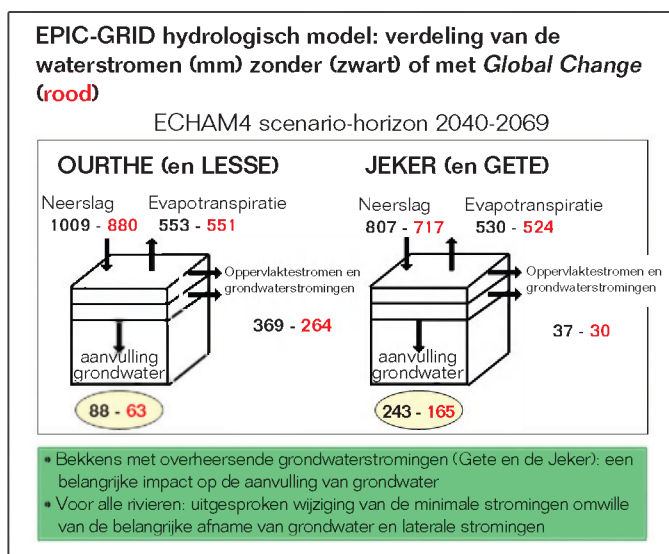


Geografische distributie van de verschillende vegetatiegemeenschappen, berekend met het CARAIB-vegetatiemodel (Carbon Assimilation In the Biosphere) dat door ULg-LPAP werd ontwikkeld. Het model toont de afzonderlijke impact van toekomstige klimaatsveranderingen (temperatuur en neerslag) en veranderingen van de atmosferische CO_2 -concentratie op de vegetatie: (A) standaard simulatie met de huidige klimatologische omstandigheden en CO_2 -concentraties, (B) simulatie met toekomstige klimatologische omstandigheden en huidige CO_2 -concentraties en (C) simulatie met de toekomstige klimatologische omstandigheden en CO_2 -concentraties. Met 'huidig' wordt naar de periode 1990-1999 en met 'toekomstig' naar 2090-2099 verwezen. (L. François, ULg-LPAP).

voorspellen een toename van de temperatuur en veranderingen in de neerslagpatronen. Deze wijzigen de hydrologische cyclus door de hoeveelheid water die een ecosysteem binnenkomt, wat op zijn beurt ondermeer de

relatie tussen de bodem en vegetatie verandert. Wat zijn de gevolgen voor België?

- **Onderzoekers van FUSAGx-UHAGx voerden simulaties uit met het 'EPIC-GRID' hydrologisch model van Belgische rivierbekkens. Ze onderscheiden daarbij twee belangrijke componenten: de laterale stromen (oppervlaktestromen) en de aanvulling van grondwater. Afhankelijk van de permeabiliteit van de bodem overheerst één van beide componenten. Bij een weinig permeabele bodem zullen oppervlaktestromen overheersen (zoals in de bekkens van de Lesse en de Ourthe). In een meer permeabele bodem zal de rol van grondwaterstromingen meer uitgesproken zijn. Voorbeelden hiervan zijn het bassin van de Gete en de Jeker. Uit de voorspellingen blijkt dat voor alle rivierbeddingen (of de waterstromingen nu door grondwater- of oppervlaktestromen worden gedomineerd) de stroomsnelheden significant zullen afnemen (zie schema hieronder).**



Verdeling van waterstromingen binnen Belgische stroomgebieden en de invloed van de klimaatverandering hierop (EPIC-GRID simulaties, ECHAM4 scenario, horizon 2040-2069). (C. Sohier en S. Dautrebande, FUSAGx-UHAGx).

4.4.2 Veranderingen voor het grondwaterregime

Klimaatveranderingen beïnvloeden de hydrologische cyclus, wat ondermeer gevolgen voor de bodemvochtigheid, aanvulling van de grondwatertafel, waterkwaliteit en grondwaterstromingen heeft. Het KMI werkte op basis van de resultaten van drie 'General Circulation Models' (GCM's) drie scenario's van klimaatverandering voor België uit waarin de temperatuur toeneemt.

- Twee van de drie scenario's toonden aan dat global change tot een afname van de jaarlijkse hoeveelheid neerslag in België zou leiden; de derde voorspelde weinig verandering. Alle scenario's toonden aan dat de hoeveelheid neerslag tijdens de zomermaanden zou dalen. FUSAGx-UHAGx paste deze drie scenario's toe in het hydrologisch EPIC-GRID model dat toelaat de impact van potentiële klimaatveranderingen op de hydrologische cyclus te berekenen. Twee van de drie scenario's geven op jaarbasis een aanzienlijke vermindering van de laterale stromingen en de aanvulling van de grondwatertafel aan. Simulaties op maandbasis wijzen op een toename van deze stromingen in de winter (afhankelijk van de neerslag). Het tekort in de aanvulling van de grondwatertafel varieert naargelang het gebruikte scenario van 1 tot 34% en zal belangrijke implicaties voor de watervoorziening hebben (voornamelijk in de zomermaanden met negatieve effecten op de gewassen).

4.4.3 Veranderingen in de landbouw

De toename van temperatuur, een vermindering in waterbeschikbaarheid en een toename van de CO₂-concentratie in de atmosfeer leiden tot veranderingen in de evapotranspiratie (d.w.z.

Global change in ecosystemen

verdamping van water uit plant en bodem), wat consequenties voor de vegetatie en de landbouwproductie heeft.

Simulaties met het EPIC-GRID model tonen aan dat met een stijgende temperatuur de evapotranspiratie in het voorjaar door de vroegere ontwikkeling van de gewassen zal toenemen. Maar in de zomer zal ze, als gevolg van waterstress en het vroeger rijp zijn van de oogst, afnemen. Door de verhoging van het CO₂-gehalte zal de landbouwproductie meestal toenemen, afhankelijk van het gewas en de beschikbaarheid van grondwater. Een vermindering van neerslag in de zomer maakt dat gevoelige gewassen moeten worden geïrrigeerd. Het watertekort, in combinatie met een afname van de bodemvochtigheid, beïnvloedt de productiviteit van graslanden en zorgt hierdoor voor een beperkter voedselaanbod voor het vee. De toegankelijkheid van het land wordt door een hogere bodemvochtigheid in het voorjaar negatief beïnvloed.

4.4.4 Veranderingen in moerasgebieden

Door de vrijwel permanente aanwezigheid van water boven het maaiveld speelt de hydrologie in moerasgebieden een centrale rol. In de volledig verzadigde bodem worden biogeochemische processen door de aanwezigheid van water gedomineerd. Toch is deze bodemchemie dynamischer dan eerst werd aangenomen. Zo zakt de watertafel in de droge zomermaanden, waardoor een deel van het bodemoppervlak droog komt te liggen en aan de lucht wordt blootgesteld. De chemische processen die zich dan manifesteren, veroorzaken een verzuring van de bodem. *Global change* versterkt dit fenomeen.

■ **Onderzoekers van UA-ECOB-E voerden een internationaal onderzoeksproject uit in de Belgische provincies Brabant (Torfbroek) en Luxemburg (Marais de Vance), alsook**

■ **in Groot-Brittannië (Buxton Heath). Dit bracht meer klaarheid in de veranderingen die in de moerasbodem plaatsvinden. De experimenten toonden aan dat, bij een afnemende hoeveelheid bodemwater, de zuurtegraad (pH) daalt en de concentraties aan sulfaat- (SO₄²⁻), magnesium- (Mg²⁺) en calcium- (Ca²⁺) ionen toenamen. Aangezien de hoeveelheid ijzer (Fe), aluminium (Al) en chloor (Cl) nagenoeg constant bleef, was de toename aan SO₄²⁻-, Mg²⁺- en Ca²⁺-ionen niet te wijten aan een zuiver concentratie-effect als gevolg van verdamping van de watermoleculen. Deze hogere concentraties vloeien eerder voort uit de toegenomen zuurtegraad, wat o.a. de oplosbaarheid van kationen doet stijgen. Dit proces leidt op termijn tot een verarming aan nutriënten (zie Kader 13).**

4.5 Drijfveren achter ecosysteemveranderingen

4.5.1 Initiële condities, drijfveren en feedback

De veranderingen in terrestrische ecosystemen worden door een complexe combinatie van sociaal-economische en biofysische factoren veroorzaakt. In de afgelopen decennia vormden de veranderingen in het landgebruik de belangrijkste bedreiging voor habitats en de soorten die erin voorkwamen, alsook voor de bodem, waterstromen en de kwetsbaarheid van ecosystemen en bevolkingsgroepen. Deze factoren spelen niet enkel in op de veerkracht van terrestrische ecosystemen, maar vormen ook een medium waarlangs verschillende antropogene reacties plaatsvinden.

In deze ketting van veranderingen in ecosystemen onderscheiden zich steeds drie groepen van factoren. Om veranderingen te detecteren, dienen de interacties tussen deze groepen te zijn gekend. Allereerst zijn

Kader 13: Zuurtegraad (pH) en oplosbaarheid

Nutriënten in de bodem zitten voor 98% in humus (afgebroken organisch materiaal) en klei vastgelegd. Ze kunnen niet rechtstreeks door planten worden opgenomen en zijn dus niet beschikbaar. Door afbraak- en verweringsprocessen wordt een zeer klein deel (0,2%) van deze nutriënten toch in het bodemwater opgelost, waardoor ze wel beschikbaar worden.

Deze opgeloste en beschikbare nutriënten zijn grotendeels aan bodemdeeltjes geadsorbeerd: kleine negatief geladen deeltjes (0,1 tot 10 μm), zoals klei en humus. In kleideeltjes is het basis kation (d.w.z. positief geladen ion) silicium (Si^{4+}) vaak door de minderwaardige kationen aluminium (Al^{3+}) of calcium (Ca^{2+}) vervangen, waardoor deze kleideeltjes netto één of meerdere negatieve

ladingen zullen dragen. Humus wordt uit aminozuren opgebouwd, die bij een neutrale zuurtegraad (pH) onder de vorm van een 'zwitterion' voorkomen (binnen het molecuul is een negatieve en positieve lading aanwezig waardoor het deeltje in globaliteit neutraal is). Door hun negatieve lading kunnen zowel klei- als humusdeeltjes kationen binden en zo verhinderen dat deze uitlogen. Bij verzuring van de bodem (door natuurlijke omstandigheden of menselijk handelen) zullen deze negatief geladen plaatsen door waterstofionen (H^+), die dan in hoge concentraties aanwezig zijn, worden ingenomen. Hierdoor verdringen ze de andere aanwezige kationen die met het grondwater wegspoelen. Omdat kationische nutriënten gradueel verdwijnen, leidt dit proces tot een verarming van de bodem.

er de initiële condities (omgevingskenmerken en historiek), op de tweede plaats worden alle drijfveren gegroepeerd (directe oorzaken en onderliggende drijfveren), en op de derde plaats komen alle feedbackmechanismen. Een samenvattend voorbeeld voor de aanpak en analyse van de factoren die de verandering van ecosystemen beïnvloeden, wordt in de volgende figuur gegeven.

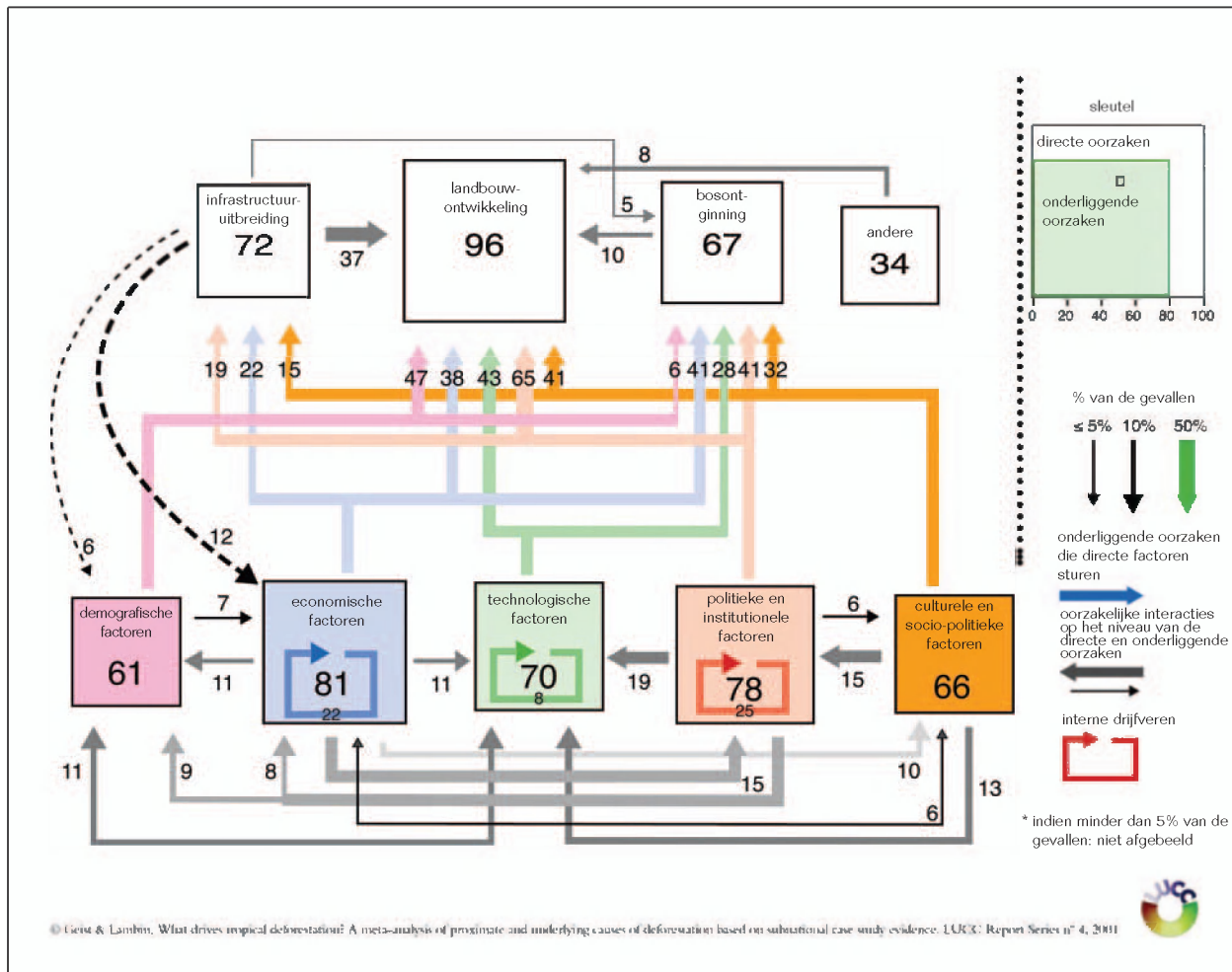
4.5.2 De sleutelfactor

Uit onderzoek blijkt dat er meestal geen enkelvoudige sleutelfactor bestaat die de veranderingen in landgebruik als drijfveer binnen ecosystemen determineert. Het is eerder een combinatie van verschillende factoren die variabel in tijd en ruimte zijn en die sterk van antropogene condities afhangen. Sommige tegengestelde synergetische reacties kunnen tot een neutralisatie van hun effect leiden, wat maakt dat er helemaal geen verandering

wordt ingezet. Het kan echter ook gebeuren dat de interactie van verschillende factoren werkt als een autokatalytisch proces dat, wanneer het wordt gestart, ongenaakbaar doorgaat. Of de verandering binnen een ecosysteem de richting van degradatie dan wel restauratie uitgaat, is bovendien afhankelijk van feedbackmechanismen die erbij zijn betrokken. Een uitkomst voorspellen is dan ook enkel mogelijk indien zoveel mogelijk factoren zijn gekend en in rekening worden gebracht.

■ In een analyse van 300 locaties in zowel tropische als gematigde ecosystemen zochten onderzoekers van UCL-GEOG naar de proportie van systemen waarin de veranderingen die erin optraden, door één enkele factor waren te verklaren: een zogenaamde 'sleutelfactor'. In slechts 10% van de gevallen was het mogelijk deze aan te duiden. De proportie van de louter

Global change in ecosystemen



Voorbeeld van een systematische en generaliserende analyse van de patronen die tot ontbossing van tropische regenwouden leiden. De eenduidige impact van een sleutelvariabele (zoals bevolkingsgroei en cultiveringveranderingen) is niet te achterhalen. Een combinatie van directe oorzaken en onderliggende (sociale) drijfveren kunnen meestal het best het verlies van tropische wouden verklaren. Een steeds terugkerende combinatie van economische, politieke en institutionele drijfveren ondersteunt het patroon van directe factoren (zoals landbouwontwikkeling, infrastructuuruitbreiding en houtkap) die tot ontbossing leiden. Hoewel sommige onderzoekers beweren dat de interacties binnen deze patronen onherleidbaar complex zijn, moet het toch mogelijk zijn om onmiskenbare regionale patronen te achterhalen en te verklaren. (H. Geist en E. Lambin, UCL-GEOG).

- 'oorzakelijke drijfveren' was eveneens klein (5 tot 8%).
- In het merendeel van de gevallen (70 tot 90%) domineerden combinaties van interacties.

4.5.3 Socio-economische drijfveren

Naast de biofysische drijfveren die veranderingen in ecosystemen sturen, zijn er ook socio-economische drijfveren. Hoewel er vaak een onderscheid tussen de biofysische en socio-economische drijfveren wordt gemaakt, is dit eerder een artificiële opdeling. Want

ecosysteemveranderingen doen zich steeds in een gekoppeld antropogeen-natuurlijk systeem voor.

4.6 Conclusies en vooruitzichten

De impact van *global change* is divers en complex. Een aantal gelijktijdige globale veranderingen beïnvloeden vandaag een reeks van gerelateerde processen over een uiteenlopende reeks van ecosystemen. Sommige veroorzaken *global change*, maar

vallen tezelfdertijd ook onder de gevolgen ervan. Zo is het verlies aan biodiversiteit een gevolg van deze globale veranderingen, maar heeft het op zijn beurt weer invloed op de ecosysteemfunctie en het landgebruik.

Niet alleen zijn gevolgen soms oorzaken en omgekeerd, maar vaak zijn de gevolgen via een terugkoppeling aan hun causale factoren gerelateerd. Bodemrespiratie is hiervan een voorbeeld. Daar het organische materiaal in de bodem tweemaal zo veel koolstof dan de atmosfeer bevat en er jaarlijks 10% van de koolstof uit de bodem vrijkomt, kunnen kleine veranderingen in de koolstofopslag in bodems grote gevolgen voor de CO₂-concentratie in de atmosfeer hebben. Temperatuur beïnvloedt namelijk de bodemrespiratie op een positieve manier: hoe warmer, hoe hoger de graad van respiratie. Door die respiratie wordt koolstof (C) uit de bodem aan zuurstof (O₂) gebonden, waardoor ze als koolstofdioxide (CO₂) in de atmosfeer vrijkomen. Dat zorgt voor een versterking van het broeikaseffect, waardoor de temperatuur verder zal toenemen en we in een vicieuze cirkel kunnen terechtkomen.

Als gevolg van de klimaatwijziging zullen we ook frequenter met extreme weergebeurtenissen worden geconfronteerd. Omdat ze het verlies van de plantensoorten (die al het meest gevoelig zijn aan de uitersten van het huidige klimaat) in de hand werken, kunnen deze gebeurtenissen een decimering van de ecosystemen teweegbrengen. Daarom moet toekomstig onderzoek zich prioritair op het robuust maken van ecosystemen richten. Er zijn nieuwe beheersinstrumenten op basis van de populatiedynamiek voor een beter ecosysteembeheer ontwikkeld om zo het verlies van soorten te beperken.

Modelberekeningen en atmosferische observaties van de CO₂-emissie en -opname leren ons dat ongeveer 1/3 van de jaarlijkse atmosferische CO₂-emissie (afkomstig van de

verbranding van fossiele brandstoffen en van ontbossing) door de terrestrische biosfeer terug wordt opgenomen. Dit fenomeen voltrekt zich voornamelijk in de bossen van de middelste breedtegraden van het noordelijk halfrond. Het beheer en gebruik van deze ecosystemen heeft, met andere woorden, dus een belangrijke impact op de broeikasgasconcentraties in de atmosfeer. Er bestaan dan ook mogelijkheden om via deze weg *global change* en de gevolgen ervan in te dijken.

Invasieve soorten vormen een bijkomende bedreiging van de biodiversiteit in ecosystemen. Als gevolg van menselijke activiteiten zijn veel van de natuurlijke verspreidingsbarrières weggevallen en kunnen ook de minder mobiele soorten een nieuwe en gunstige habitat binnendringen. De economische schade van invasieve soorten is enorm (oogstverliezen, bestrijdingskosten), maar hun impact op de (geringe) resterende natuur in onze cultuurlandschappen is evenzeer belangrijk.

Of het nu om het verlies aan biodiversiteit of de toegenomen concentratie aan broeikasgassen gaat: steeds is de oorzaak een combinatie van zowel antropogene als natuurlijke factoren. Meestal zijn deze ook nog van elkaar afhankelijk en zijn er talrijke terugkoppelingsmechanismen.

Bijlage 1 - Belgische onderzoeksinstituten

Instelling	Contact	Website
Federale Wetenschappelijke Instellingen		
BIRA	Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie	De Mazière M., Muller J.-F.
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut van België	De Backer H., Tricot C.
KBIN	Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen	
Invertebraten	Invertebraten	Grootaert P., Willenz Ph.
MUMM	Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee en het Schelde-estuarium	Pichot G.
KMMA	Koninklijk Museum voor Midden-Afrika	
GEO	Geologie en mineralogie	André L.
Universiteiten		
FPMS	Faculté Polytechnique de Mons	
FLUIDMACH	Groupe Mécanique	Passelecq Ch., Hanton J.
FUNDP	Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix	
URBO	Unité de Recherches en Biologie des Organismes	Descy J.-P.
FUSAGx	Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux	
ECOPHYS	Unité de Biologie végétale - Ecophysiology des arbres forestiers	Laitat E.
UHAGx	Unité de Hydrologie et Hydraulique agricole	Dautrebande S., Sohler C.
KULeuven	Katholieke Universiteit Leuven	
H&EG	Laboratorium voor Hydrogeologie en ingenieursgeologie	Dassargues A.
PAC	Afdeling voor Fysische en Analytische Chemie	Peeters J., Vinckier C.
LFNL	Laboratory for Forest, Nature and Landscape Research	Van Orshoven J.
LSWM	Laboratory for Soil and Water Management	Feyen J.
UA	Universiteit Antwerpen	
DECO	Laboratory of Animal Ecology	Mathysen E.
ECOBIE	Département Biologie - Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer	Meire P., Verheyen R.
EFB	Département Biologie Ecofysiologie en Biochemie	Blust R.
MiTAC	Département Scheikunde - Centrum voor Micro- en Sporenanalyse	Van Grieken R.
Phar	Laboratorium voor Biomoleculaire Massaspectrometrie	Claeys M.
PLECO	Laboratorium voor Plantecologie	Ceulemans R., Nijs I.
UCL	Université catholique de Louvain	
ASTR	Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître	Berger A., Deleersnijder E., Fichet Th., Schayes G., van Ypersele J.-P.
ECOL	Unité d'Ecologie et de Biogéographie	Le Boulangé E., Baguette M.
EFOR	Unité des Eaux et des Forêts	André P.
GEOG	Unité de Géographie	Geist H., Lambin E., Van Wesemael B.
GEOL	Unité de Géologie	Seret G.
UGent	Universiteit Gent	
INW	Troposferisch Aërosolonderzoek en Nucleaire Micro-analyse	Maenhaut W.
ISOFYS	Vakgroep voor Toegepaste Analytische en fysische Chemie	Boeckx P., Van Cleemput O.
MARBIOL	Instituut voor Dierkunde Mariene Biologie	Vincx M.
OC	Organische Chemie	Van Langenhove H.
PAE	Protistologie en Aquatische Ecologie	Vyverman W., Cocquyt Ch.
PLANTECO	Laboratorium voor Plantecologie	Lemeur R., Vandewalle I.
PP	Vakgroep Plantaardige Productie	Reheul D., Behaeghe T.
RCMG	Renard Centre of Marine Geology	De Batist M.
SOILMAN	Department of Soil Management and Soil Care	Hofman G.
ULB	Université Libre de Bruxelles	
BIOMAR	Centre Interuniversitaire de Biologie Marine	Dubois Ph.
ESA	Ecologie des Systèmes Aquatiques	Lancelot C.
GLACIOL	Glaciologie Polaire	Lorrain R., Souchez R.
GMMA	Groupe de Microbiologie des Milieux Aquatiques	Billen G.
OCEAN	Laboratoire d'Océanographie Chimique et Géochimie des Eaux	Chou L., Wollast R.
SPECAT	Unité de Spectroscopie de l'Atmosphère	Colin R., Carleer M.

Bijlage 1 - Belgische onderzoeksinstituten (vervolg)

Instelling	Contact	Website
Universiteiten		
ULg	Université de Liège	http://www.ulg.ac.be
BOT	Institut de Botanique	http://www.ulg.ac.be/facsc
CEME	Centre d'Etude et de Modélisation de l'Environnement	
CIP	Centre d'Ingénierie des Protéines	http://www.ulg.ac.be/cingprot
ECOHYD	Unité d'Ecohydrodynamique	http://modb.oce.ulg.ac.be/ECOHYD/welcome.htm
GIRPAS	Groupe Infrarouge de Physique Atmosphérique et Solaire	http://sunset.astro.ulg.ac.be/girpas/girpesf.html#CONT
LGIH	Laboratory of Engineering Geology, Hydrogeology and Geophysical Prospecting	http://www.lgih.ulg.ac.be
LPAP	Laboratoire de Physique Atmosphérique et Planétaire	http://www.astro.ulg.ac.be/GRech/lpap_f.html
OCEANBIO	Laboratoire d'Océanologie	http://www.ulg.ac.be/oceanbio
OCEANCHEM	Chemical Oceanography Unit	http://www.ulg.ac.be/oceanbio/co2
URAP	Unité de Recherche Argiles et Paléoclimats	http://www.ulg.ac.be/urap
UMH	Université de Mons-Hainaut	http://www.umh.ac.be
FS	Service d'Informatique Générale	http://sinfo.umh.ac.be/equipes.htm
VUB	Vrije Universiteit Brussel	http://www.vub.ac.be
ANCH	Laboratorium voor Analytische Scheikunde	http://we.vub.ac.be/dsch
DG	Department of Geography	http://www.vub.ac.be/DGGF
ECOL	Laboratorium voor Ecologie en Systematiek	http://we.vub.ac.be/-ecol
Regionale Instellingen		
CELINE / IRCEL	Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu	http://www.irceline.be
CLO	Centrum voor Landbouwkundig Onderzoek	http://www.clo.fgov.be
DFE	Departement voor Fytotechnie en Ecofysiologie	http://www.ibw.vlaanderen.be
IBW	Instituut voor Bosbouw en Wildbeheer	Van Slycken J.
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek	http://www.vito.be
TAP	Teledetectie en aardobservatieprocessen	http://www.vito.be/milieu/teledetectie.htm

Opmerking: De hier vermelde instellingen zijn deze die vernoemd worden in het rapport

Bijlage 2 - Acroniemen en afkortingen

Naam	Beschrijving	Webstek
6EAP	Zesde Milieuactieprogramma - EU (Sixth Environment Action Programme - EU)	http://europa.eu.int/comm/environment/newprg/
6° MAP	Zesde Milieuactieprogramma - EU (Sixth Environment Action Programme - EU)	http://europa.eu.int/comm/environment/newprg/
AD	Anno Dominus	
AGENDA 21	een actieplan - mondiaal, nationaal en lokaal uit te voeren door organisaties van het systeem van de Verenigde Naties, overheden en andere groepen - om de wereld op een ecologisch verantwoorde, economisch haalbare en sociaal rechtvaardige manier veilig te stellen voor de volgende generaties van de 21 ^{ste} eeuw	http://www.un.org/ga/special/sids/agenda21/
ASPECTS	Atmosphere-Soil-Plant Exchange of Carbon in Temperate Sylvae	
ATMOS	Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy	http://atmos.jpl.nasa.gov/atmos
BASCOE	model over de atmosferische chemie dat gebruik maakt van de gegevens van de milieusatelliet ENVISAT (Belgian Assimilation System of Chemical Observations from ENVISAT)	http://www.bascoe.oma.be/index.html
BELEUROS	European Operational Smog Model adapted to Belgium	http://www.beleuros.be/
BELFOR	Belgian Forest ecosystems	http://www.vito.be/belfor/
BELSP0	Federaal Wetenschapsbeleid (Belgian Federal Science Policy Office)	http://www.belspo.be
BIOGEST	Biogas Transfer in Estuaries	http://www.ulg.ac.be/oceanbio/biogest/
CAFE	Clean Air For Europe	http://europa.eu.int/comm/environment/air/cafe/
CALMARS	Calcareous Marine Skeletons	http://www.vub.ac.be/calmar/
CARAIB	Carbon Assimilation In the Biosphere	http://gaim.unh.edu/Structure/Intercomparison/EMDI/models/caraib.html
CASTEC	Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems	http://allserv.rug.ac.be/~ovcleemp/
CBD	Biodiversiteitsverdrag (Convention on Biological Diversity)	http://www.biodiv.org/
C-Fix	A Satellite Based Carbon Budgeting Tool	
CFK	Chloorfluorkoolwaterstof	
CLIMOD	Climate Modelling	http://www.climate.be/popwork/introclim.html
CLRTAP	Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution	http://www.unece.org/env/lrtap/
COPs	Conference of the Parties	http://unfccc.int/cop3/
DIVERSITAS	internationaal programma ter bevordering van onderzoek inzake biodiversiteit	http://www.diversitas-international.org/
DMS	Dimethylsulfide	
EASOE	European Arctic Stratospheric Ozone Experiment	http://badc.nerc.ac.uk/data/easoe/
EC	Europese Commissie	http://europa.eu.int/comm/index_en.htm
ECHAM4	actuele versie van het klimaat model dat ontwikkeld werd op basis van het ECMWF atmosfeer model en een parameterisatie pakket ontwikkeld in Hamburg	http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/examine/echam4_info.html
ECMWF	Europees Centrum voor Weersverwachtingen op Middellange Termijn (European Centre for Medium range Weather Forecasts)	http://www.ecmwf.int/
EF	Emissie Factor	
EFISCEN	European Forest Information Scenario model	http://agrifor.ac.uk/hb/4c3701607bfdc93fcc662fc89bf3bdb2.html
ENSO	El Niño Zuidelijke Oscillatie (El Niño Southern Oscillation)	
ENVISAT	Environmental Satellite	http://envisat.esa.int/
EPIC-GRID	hydrologisch model van rivierbekkens in België	http://styx.esrin.esa.it/cliff/Partners/UnivGemb.html
ESA	Europese ruimtevaartorganisatie (European Space Agency)	http://www.esa.int ; http://www.esa.int/esaCP/Belgium_du.html
ESF	European Science Foundation	http://www.esf.org
ESSP	Earth System Science Partnership	http://www.ess-p.org/
EU	Europese Unie	http://europa.eu.int/
EURECA	European Retrievable Carrier	http://www.esa.int
EUREKA	pan Europees netwerk voor de promotie van marktgericht en industrieel R&D	http://www.eureka.be
EUROCORES	ESF Collaborative Research Programmes	http://www.esf.org/esf_activity_home.php?language=0&domain=0&activity=7
EUROS	European Operational Smog model	
EUROTRAC	The EUREKA project on the transport and chemical transformation of trace constituents in the troposphere over Europe	http://www.gsf.de/eurotrac/
FP6	Zesde Kaderprogramma - EU (Sixth Framework Programme - EU)	http://fp6.cordis.lu/fp6/home.cfm
GCM	General Circulation Model	
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment	http://earth.esa.int/services/esa_doc/doc_gom.html
GRIP	Greenland Ice Core Project	http://nsidc.org/data/gisp_grip/index.html
GWP	Global Warming Potential	
HadCM	Hadley Centre Coupled Model	http://www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/models/modeltypes.html
HCFK	Waterstofchloorfluorkoolwaterstof	
HFK	Gehalogeneerde Fluorkoolwaterstof	
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme	http://www.igbp.kva.se
IGFA	International Group of Funding Agencies for Global Change Research	http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/outreach/funding/world/IGFA.HTML

Naam	Beschrijving	Webstek
IHD	International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change	http://www.ihd.uni-bonn.de/
IMAGES	Intermediate Model for the Annual and Global Evolution of Species	http://www.ucar.edu/communications/acronyms/l.html
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	http://www.ipcc.ch
IPCC-SAR	IPCC Second Assessment Report	http://www.ipcc.ch/
IPCC-SRES	IPCC Special Report on Emission Scenarios	http://www.ipcc.ch/
IPCC-SYR	IPCC Climate Change 2001: Synthesis Report	http://www.ipcc.ch/
IPCC-TAR	IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001	http://www.ipcc.ch/
ISSJ	International Scientific Station of the Jungfrauoch	http://www.ifjungo.ch/
JRC	Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek - EC (Joint Research Centre - EC)	http://www.jrc.it/
KP6	Zesde Kaderprogramma - EU	http://fp6.cordis.lu/fp6/home.cfm
LAQUAN	Late Quarternary climate history of coastal Antarctic environments: a multi-proxy approach	http://www.laquan.ugent.be
LOCH	an off-line three-dimensional (3-D) reaction-transport model of the marine carbon cycle	
LS fit	least squares fit	
METAGE	Modelling Ecosystem Trace Gas Emissions	http://www.geo.ucl.ac.be/metage/
MILMO	Modelling the evolution of climate and sea level over the Third Millennium	http://www.climate.be/research/MILMO/
MIRO&CO	3-Dimensional coupled physical-biological model	http://www.igbp.kva.se/obe/OBE_PS10.pdf
NAO	Noord-Atlantische Oscillatie (North Atlantic Oscillation)	
NDSC	Network for the Detection of Stratospheric Change	http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/
NEC	National Emissions Ceilings	http://europa.eu.int/comm/environment/air/ceilings.htm
NEP	Netto Ecosystem Productie (Net Ecosystem Production)	
NGO	Niet-Gouvernementele Organisatie	
NMVOS	Niet-methaan Vluchtige Organische Stoffen	
NPP	Netto Primaire Productie (Net Primary Production)	
OMEX	Ocean Margin Exchange	http://www.pol.ac.uk/bodc/omex/omex.html
ORA	Occultation Radiometer	
PDSI	Palmer Drought Severity Index	
PM	Particulate Matter	
PODO	Plan voor wetenschappelijke ondersteuning van een beleid gericht op duurzame ontwikkeling	http://www.belspo.be/belspo/home/port_en.stm
ppbv	deeltjes per biljoen (10 ⁹) in volume (parts per billion by volume)	
ppm	deeltjes per miljoen (10 ⁶) (parts per million)	
ppmv	deeltjes per miljoen (10 ⁶) in volume (parts per million by volume)	
PSW	Polaire Stratosferische Wolken	
R&D	Onderzoek en Ontwikkeling (Research and Development)	
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu - Nederland (National Institute for Public Health and the Environment - the Netherlands)	http://www.rivm.nl/
SESAME	Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment	
SISCO	Silica Retention in the Scheldt continuum and its Impact on Coastal Eutrophication	http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/ocean/SISCO/frame.html
SOA	Secondaire Organische Aerosolen	
SOC	Bodem Organische Koolstof (Soil Organic Carbon)	
THESEO	Third European Stratospheric Experiment on Ozone	http://www.nilu.no/projects/theseo2000/
UN	Verenigde Naties (United Nations)	http://www.un.org/
UNECE	Europese economische commissie van de Verenigde Naties (United Nations Economic Commission for Europe)	http://www.unece.org/env/lrtap/
UNEP	United Nations Environment Programme	http://www.unep.org/
UNFCCC	Klimaatverdrag (United Nations Framework Convention on Climate Change)	http://www.unfccc.de/
UV	Ultraviolet	
UV-A	Ultraviolet met golflengte tussen 315-400 nm	
UV-B	Ultraviolet met golflengte tussen 280-315 nm	
UV-C	Ultraviolet met golflengte minder dan 280 nm	
UVI	Ultra-Violet Index	
VINTERSOL	Validation of International Satellites and Study of Ozone Loss	
VN	Verenigde Naties	http://www.un.org/
VOS	Vluchtige Organische Stoffen	
WAIS	West Antarctische ijskap (West Antarctic Ice Sheet)	http://igloo.gsfc.nasa.gov/wais/
WCRP	World Climate Research Programme	http://www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html
WMO	Wereld Meteorologische Organisatie (World Meteorological Organization)	http://www.wmo.ch/

Bijlage 3 - Afkortingen van chemische stoffen en chemische formules

Afkortingen			
Naam	Beschrijving	Naam	Beschrijving
CFK	Chloorfluorkoolwaterstof	HFK	Gehalogeneerde Fluorkoolwaterstof
CFK-11	CCl_3F , trichloorfluormethaan	NMVOS	Niet-methaan Vluchtige Organische Stoffen
CFK-12	CCl_2F_2 , dichloordifluormethaan	SOA	Secondaire Organische Aerosolen
DMS	Dimethylsulfide	SOC	Bodem Organische Koolstof (Soil Organic Carbon)
HCFK	Waterstofchloorfluorkoolwaterstof	VOS	Vluchtige Organische Stoffen

Formules			
Symbool	Naam	Symbool	Naam
Al, Al^{3+}	aluminium, aluminiumion	HF	waterstoffluoride
As	arsenicum	HNO_3	salpeterzuur
Br	broom	HOBr	hyper- of onderbromigzuur
BrO	broomoxide, hypobromiet	HOCl	hyper- of onderchlorigzuur
BrONO_2	broomnitraat	HO_x	radical peroxy (HO) of peroxy-radicaal (HO_2)
C	koolstof	Hg, Hg^{2+}	kwik, kwikion
Corg	organisch koolstof	Mg, Mg^{2+}	magnesium, magnesiumion
^{12}C	koolstofisotoop-12	Mn, Mn^{2+}	mangaan, mangaanion
^{13}C	koolstofisotoop-13	N	stikstof
^{14}C	koolstofisotoop-14	Norg	organisch stikstof
$\delta^{13}\text{C}$	relatieve hoeveelheid koolstofisotoop-13	N_2	stikstofmolecuul
CCl_2F_2	dichloordifluormethaan (CFK-12)	N_2O	lachgas, distikstofoxide
CCl_3F	trichloorfluormethaan (CFK-11)	N_2O_4	distikstoftetraoxide
CHClF_2	chloordifluormethaan (HCFK-22)	NH_3	ammoniak
CH_3CCl_3	methylchloroform	NH_4^+	ammonium
CCl_4	tetrachloorkoolstof	NH_4NO_3	ammoniumnitraat
CH_4	methaan	NO	stikstofoxide
C_2H_2	acetyleen, etheen	NO_2	stikstofdioxide
C_2H_6	ethaan	NO_x	stikstofoxiden
CH_2O (HCHO)	formaldehyde	NO_3^-	nitraat
CO	carbonoxide	Ni	nikkel
CO_2	koolstofdioxide, kooldioxide	O	zuurstof
CO_3^{2-}	carbonaat	$\delta^{18}\text{O}$	relatieve hoeveelheid zuurstofisotoop-18
COF_2	carbonylfluoride	O_2	zuurstofmolecuul
COS	carbonylsulfide	O_3	ozon
Ca, Ca^{2+}	calcium, calciumion	OCIO	chloordioxide
CaCO_3	calciumcarbonaat	OH^-	hydroxide
Cd	cadmium	P	fosfor
Cl, Cl ⁻	chlooratoom, chloorion	Porg	organisch fosfor
ClO	chlooroxide	PO_4^{3-}	fosfaat
ClO_x	chlooroxiden	Pb	lood
ClONO_2	chloornitraat	^{210}Pb	loodisotoop-210
Cl_2	chloor	ROOH	alkyl hydroperoxides
Cl_y	anorganisch chloor	RO_2	peroxyl radicaal
Fe	ijzer	S	zwavel
H, H^+	waterstof, waterstofion	SF_6	zwavehexafluoride
H_2O	water	SO_2	zwaveldioxide
H_2O_2	waterstofperoxide	SO_4^{2-}	sulfaat
H_2S	waterstofsulfide	Si, Si^{4+}	silicium, silicium ion
H_2SO_4	zwavelzuur	SiO_2	silica, siliciumdioxide
HCl	zoutzuur, waterstofchloride	Th	thorium
HCN	blauwzuur, waterstofcyanide	^{234}Th	thoriumisotoop-234
HCO_3^-	bicarbonaat	Zn	zink
HDO	zwaar water		

Eenheden van het internationale systeem (SI, Système Internationale)			
Grootheid	Naam	Symbool	
hoeveelheid stof	mol	mol	
lengte	meter	m	
massa	kilogram	kg	
tijd	seconde	s	
Voorvoegsels van het internationale systeem (SI)			
Deel	Voorvoegsel	Symbool	Definitie
10^{-1}	deci	d	tiende
10^{-2}	centi	c	honderste
10^{-3}	milli	m	duizendste
10^{-6}	micro	μ	miljoenste
10^{-9}	nano	n	miljardste
10^{-12}	pico	p	biljoenste
10^{-15}	femto	f	biljardste
Veelvoud	Voorvoegsel	Symbool	Definitie
10	deca	da	tien
10^2	hecto	h	honderd
10^3	kilo	k	duizend
10^6	mega	M	miljoen
10^9	giga	G	miljard
10^{12}	tera	T	biljoen
10^{15}	peta	P	biljard
Afgeleiden van SI-eenheden en andere eenheden			
Grootheid	Naam	Symbool	Definitie
druk	bar	b of bar	
hoeveelheid	deeltjes per miljoen (10^6)	ppm	
lengte	micron	μm	
luchtkolomdichtheid	Dobson Unit	DU	$2,687 \cdot 10^{16}$ ozonmoleculen per cm^2
massa	gram	g	
massa	ton	t	
oppervlakte	vierkante meter	m^2	
oppervlakte	hectare	ha	10.000 m^2
temperatuur	graden Celcius	°C	
tijd	jaar	yr	
vermogen	watt	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ (energie per tijdseenheid)
volume	kubieke meter	m^3	
volume	liter	l	
volume	deeltjes per biljoen (10^{12}) in volume	ppbv	
volume	deeltjes per miljoen (10^6) in volume	ppmv	
zuurtegraad	potentiaal waterstof	pH	
Speciale symbolen			
Grootheid	Naam	Symbool	
lengte	diameter	Ø	

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC):

1995. IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995 (IPCC-SAR).

1995. Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J.P., Lee, H., Callander, B.A. and Haites, E.F. (ed.). Cambridge University Press, UK. ISBN 0521559626, 9780521559621.

1996. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Vols 1–3. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D.J. and Callender, B.A. (ed.). IPCC/OECD/IEA. UK Meteorological Office, Bracknell. (www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm).

2000. Emissions Scenarios (IPCC-SRES). Nakicenovic, N. and Swart, R. (ed.). Cambridge University Press. Cambridge, UK. ISBN 0 521 80493 0.

2001. IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001 (IPCC-TAR):

Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0521 01495 6.

Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0 521 01500 6.

Climate Change 2001: Synthesis Report (IPCC-SYR). Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Watson, R.T. et al (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0 521 01507 3.

Keeling, C.D., Whorf, T.P., Wahlen, M. and van der Plicht, J., 1995. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, pp. 666-670.

Pussinen, A., Schelhaas, M.J., Verkaik, E., Nabuurs, G.J., 2000. Manual of the EFISCEN Model. European Forest Institute, Joensuu, Finland. (internal report).

Putaud, J.-P., Baltensperger, U., Brüggemann, E., Facchini, M.-C., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.-C., Harrison, R.M., Jones, A.M., Laj, P., Maenhaut, W., Mihalopoulos, N., Müller, K., Palmgren, F., Querol, X., Rodriguez, S., Spindler, G., ten Brink, H., Tunved, P., Van Dingenen, R., Wehner, B., Weingartner, E., Wiedensohler, A., Wählin, P., Raes, F. 2002. A European aerosol phenomenology. Physical and chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe, Joint Research Centre, European Commission, Report nr. EUR 20411 EN (2002).

Belgisch global change onderzoek 1990 – 2002 : Synthese van het assessment- en integratierapport

Eindbewerking

G. den Ouden – gerard.den.ouden@telenet.be – tel: +32-2-7676803

M. Vanderstraeten - Federaal Wetenschapsbeleid– vdst@belspo.be – tel: +32-2-2383610

Wetenschapsschrijver:

P. Raeymaekers, LyRaGen

Depot nr. D/2004/1191/51

Layout: Mainpress

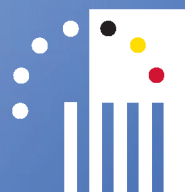
Taalrevisie: E. Joncqheere (Timesaver), M. Vandenbossche (Federaal Wetenschapsbeleid),
L. De Bosscher (Federaal Wetenschapsbeleid)

Gedrukt door Van In, Lier

Een uitgave van het Federaal Wetenschapsbeleid, 2004

De missie van het Federaal Wetenschapsbeleid is de maximalisatie van het Belgische wetenschappelijke en cultureel potentieel ten dienste van de politieke beleidsmakers, wetenschappers, de industriële sector en de burgers: 'een beleid voor en door de wetenschap'. Stukken uit deze publicatie mogen worden gereproduceerd voor zover het doel van de reproductie van niet-commerciële aard is, en aansluit bij de bovenvermelde missie van het Federaal Wetenschapsbeleid. De Belgische Staat kan niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die voortvloeit uit het gebruik van gegevens die in deze publicatie voorkomen

FEDERAAL WETENSCHAPSBELEID



Wetenschapsstraat 8 rue de la Science
Brussel 1000 Bruxelles
www.belspo.be