

Tussen Aarde en Leven

## Verkenningen, deel 4

Eerder verschenen in deze reeks:

1. De toekomst van het wiskunde-onderzoek in Nederland
2. Bio-exact. Mondiale trends en nationale positie  
in biochemie en biofysica
3. De toekomst van de theologie in Nederland

Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen  
Verkenningcommissie Biogeologie

## Tussen Aarde en Leven

# Strategische verkenning van de biogeologie in Nederland

Amsterdam, 2003

*Op het omslag:* De foto geeft een detail weer van een blaadje van de veenmos-soort *Sphagnum imbricatum*. Deze soort, die een voorkeur heeft voor een koel, vochtig klimaat, gaat domineren in de hoogvenen na de klimaatomslag van het Subboreaal naar het Subatlanticum.



Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen  
Postbus 19121, 1000 GC Amsterdam T 020-551 07 00  
F 020-620 49 41 E [knaw@bureau.knaw.nl](mailto:knaw@bureau.knaw.nl), <http://www.knaw.nl>

Voor het bestellen van publicaties:  
T 020-551 07 80 E [edita@bureau.knaw.nl](mailto:edita@bureau.knaw.nl)

ISBN 90-6984-376-5

Het papier van deze uitgave voldoet aan  iso-norm 9706 (1994) voor permanent houdbaar papier

© 2003 Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (knaw). Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, via internet of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de rechthebbende, behoudens de uitzonderingen bij de wet gesteld.

# Voorwoord

Inzicht in de ontwikkeling van de wetenschapsbeoefening is een voorwaarde voor een beleid dat recht doet aan de wetenschap. Het ligt op de weg van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen om dit inzicht te verschaffen. Niet voor niets kondigde het Wetenschapsbudget 2000 dan ook aan dat de Akademie een centrale taak heeft bij het totstandkomen van verkenningen vanuit wetenschappelijk perspectief.

Onder een wetenschapsverkenning verstaat de Akademie het verwerven van inzicht in de wetenschappelijke ontwikkelingen op langere termijn op een bepaald gebied, het in dat licht bepalen van de internationale positie van het Nederlands onderzoek en het doen van aanbevelingen voor het te voeren beleid.

Op voorstel van de Raad voor Aarde en Klimaat en de Biologische Raad van de knaw is de Verkenningscommissie Biogeologie door het knaw bestuur ingesteld. De Verkenningscommissie is in januari 2002 aangevangen met haar werkzaamheden. Het resultaat van haar werk treft u hierbij aan.

Biogeologisch onderzoek vindt plaats op de grensvlakken van biologische en aardwetenschappelijke disciplines. Biogeologie is een snel groeiend veld van wetenschap waarin mondiale, regionale en lokale ecosystemen bezien worden in de context van een veranderend aards systeem. De variatie in bestudeerde tijd- en ruimteschalen maakt de biogeologie bij uitstek van belang voor een beter begrip van *Global Change*: de veranderende aarde.

Uit het verkenningsrapport blijkt dat van de biogeologie verrassende nieuwe, grensverleggende inzichten mogen worden verwacht in de wijze waarop het systeem Aarde functioneert.

De Akademie hoopt en verwacht dat dit Biogeologie-verkenningsrapport en de daarin geformuleerde aanbevelingen als belangrijk richtsnoer zullen dienen bij het voor de biogeologie te voeren beleid.

prof. dr. W.J.M. Levelt  
president

## Inhoud

*Summary* 10

Samenvatting 11

1. Inleiding 15
  - 1.1. Voorgeschiedenis en opdracht 15
  - 1.2. Werkwijze 16
  - 1.3. Het werkterrein van de biogeologie 17
2. Verleden: de biogeologie in Nederland 19
  - 2.1. Een terugblik 19
  - 2.2. Heroriëntatie op het biogeologisch onderzoek 22
3. Heden: ontwikkelingen binnen de biogeologie – sterkten en zwakten 25
  - 3.1. Status-quo biogeologie 25
  - 3.2. Nederland 26
    - 3.2.1. Het Nederlandse onderzoek in de biogeologie 26
    - 3.2.2. Fundamenteel onderzoek 28
    - 3.2.3. Toegepast onderzoek 41
  - 3.3. Internationale ontwikkelingen 44
  - 3.4. Onderwijs 48
  - 3.5. Biogeologie: beleid en ontwikkelingen in de omgeving 49
4. De toekomst: speerpunten van onderzoek in de biogeologie 53
  - 4.1. Keuze van speerpunten 53
  - 4.2. Evolutie 54
  - 4.3. Biodiversiteit 55
  - 4.4. Biogeochemische cycli 59
  - 4.5. Paleomilieu reconstructies en *proxies* 59
  - 4.6. Modellen, opschaling en complexiteit 60
5. Kennisinfrastructuur 65
  - 5.1. Onderzoek 65
  - 5.2. Onderwijs 69
  - 5.3. Faciliteiten 72

*Conclusions and recommendations* 74

Conclusies en aanbevelingen 75

Ter illustratie zijn een aantal Position Papers toegevoegd:

- Proxies*, Henry Hooghiemstra 30
- Mariene biologie en organische geochemie, Jan de Leeuw 32
- Mariene paleo-ecologie, Bert van der Zwaan 36
- De biogeologische rol van bodems, Nico van Breemen 38
- Moleculaire biologie en genomics, Jeanine Olsen 56
- Microbiële ecologie, Riks Laanbroek 62
- Plantenfysiologie en biogeologie, Rens Voesenek 64
- Biogeochemie, Philippe Van Cappellen 70

Literatuur (chronologisch) 86

Bijlagen 87

1. Samenstelling Verkenningscommissie Biogeologie 88
2. Opdracht aan Verkenningscommissie Biogeologie 89
3. Enquêtevragen en -resultaten 91
4. Lijst geraadpleegde personen 94
5. Universitaire onderzoeks-(leerstoel)-groepen op het terrein van de 'Biogeologie' 95
6. Overzicht relevante onderzoekscholen waar biogeologisch onderzoek plaatsvindt 98
7. Biogeologische onderzoekprogramma's van enkele niet-universitaire onderzoekinstellingen 101

Lijst met gebruikte afkortingen 104





# Summary

In this report the Biogeology Foresight Committee (*Verkenningcommissie Biogeologie*) sets out the findings of its study of the possibilities for future developments in Biogeology in the Netherlands. The Committee concludes that biogeological research is a pioneering field in many respects and one which is likely to produce surprising new insights into the way in which System Earth functions. The Committee also concludes that the social relevance of this fundamental research will increase rapidly in the light of the changes being brought about in natural processes by human agency. The Committee concludes further that the Netherlands occupies a strong position internationally in this rapidly developing field of research, and is an international leader in some areas. The Committee recommends that certain strengths be further encouraged and that there should be a pooling of top-level research resources in order to increase the striking power of the researchers. In the view of the Committee, this pooling of resources is likely to lead to inspiring new research which transcends national borders, to an enhanced ability to attract funding and to a higher international profile. With this in mind the Committee suggests the setting up of a (virtual) centre, the Darwin Biogeology Centre (*Darwin Centrum voor Biogeologie*).

Biogeology is a rapidly growing field of science in which global, regional and local ecosystems are viewed in the context of a changing System Earth. The

# Samenvatting

In dit rapport beschrijft de Verkenningscommissie Biogeologie de uitkomsten van het onderzoek dat zij heeft gedaan naar de mogelijkheden voor de toekomstige ontwikkelingen in Nederland op het terrein van de biogeologie. De commissie concludeert dat biogeologisch onderzoek in veel opzichten grensverleggend is en in staat zal zijn tot verrassende nieuwe inzichten in de wijze waarop het systeem Aarde functioneert. De commissie concludeert tevens dat het maatschappelijk belang van dit fundamenteel onderzoek snel zal toenemen in het licht van de veranderingen die de mens teweegbrengt in natuurlijke processen. De commissie concludeert dat Nederland op dit zich snel ontwikkelende onderzoeksterrein een internationaal sterke positie heeft en op sommige onderdelen internationaal leidend is. Zij beveelt aan om bepaalde sterke punten verder te stimuleren en voorts te komen tot bundeling van toponderzoek om de slagkracht van de onderzoekers te vergroten. Bundeling zal naar de mening van de commissie leiden tot grensoverschrijdend en inspirerend nieuw onderzoek, een betere positie om fondsen te verwerven en een grotere internationale zichtbaarheid. Hiertoe doet de commissie de suggestie om te komen tot de oprichting van een (virtueel) centrum, het Darwin Centrum voor Biogeologie.

Biogeologie is een snel groeiend veld van wetenschap waarin mondiale, regionale en lokale ecosystemen gezien worden in de context van een veranderend

variation in the temporal and spatial scales studied mean that biogeology is of vital importance for a better understanding of our changing earth, now and in the future (*Global Change*).

Biogeological knowledge provides an insight among other things into changes at various temporal and spatial scales. Such insights will play a crucial role in the years ahead with respect to social issues such as the effects of declining biodiversity, the disruption of biogeochemical resources due to human actions and the consequences of this for biota, and the consequences of rapid climate change for life on earth.

Given its limited capacity, it is impossible for the Netherlands to develop all areas in the field of biogeology with equal vigour and success. This makes a well-considered choice of themes unavoidable. The Biogeology Foresight Committee makes these choices on the basis of a number of criteria, and arrives at the following core themes for future biogeological research: 'Functional Biodiversity', 'Biogeochemical Cycles', 'Evolutionary Processes' and 'Palaeoenvironment/palaeoclimate and proxies'. In each of these themes, a greater role than at present needs to be given to *modelling* as a key research tool.

aards systeem. De variatie in bestudeerde tijd- en ruimteschalen maken de biogeologie bij uitstek van belang voor een beter begrip van een veranderende aarde nu en in de toekomst (*Global Change*).

Biogeologische kennis levert inzicht in (o.a.) veranderingen op diverse ruimten en tijdschalen. Dit zal de komende jaren een rol van groot belang zijn bij maatschappelijke vraagstukken, zoals de effecten van dalende biodiversiteit, de ont-wrichting van biogeochemische stromen door menselijk handelen en de vervolgeffekten daarvan voor biota, en de effecten van snelle klimaatsverandering voor het leven op aarde.

Gezien de beperkte capaciteit is het uitgesloten dat in Nederland alle terreinen op het gebied van de biogeologie met evenveel kracht en succes tot ontwikkeling gebracht kunnen worden. Daarom zijn weloverwogen keuzen van thema's onvermijdelijk. De vcbg doet dit op grond van een aantal criteria en komt tot de volgende speerpunten voor toekomstig biogeologisch onderzoek:

'Functionele Biodiversiteit', 'Biogeochemische Cycli', 'Evolutionaire processen' en 'Paleomilieu/paleoklimaat en *proxies*'. Bij elk van deze thema's dient modellering een grotere rol dan nu te spelen als belangrijk gereedschap bij het uitvoeren van onderzoek.



# 1. Inleiding

## 1.1. Voorgeschiedenis en opdracht

Verkenningen vormen een zwaartepunt in de adviesfunctie van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (knav). In het Wetenschapsbudget 2000 (juni 1999) heeft de minister van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen het belang van de verkenningen voor het wetenschapsbeleid onderstreept. Aan de knaw werd een centrale functie toegekend bij 'verkenningen vanuit wetenschappelijk perspectief'. Dit heeft geleid tot de opstelling van een agenda, waarin een aantal wetenschapsgebieden, waaronder de biogeologie, ter verkenning worden vermeld.

In gezamenlijk overleg met de Raad voor Aarde en Klimaat (rak) en de Biologische Raad (br) van de knaw is in 2001 door het knaw-bestuur een werkgroep Voorstudie Verkenning Biogeologie ingesteld. Deze voorstudiewerkgroep hanteerde de volgende definitie voor de discipline:

*De biogeologie betreft de interacties van abiotische (fysische en chemische) en biotische processen die de omstandigheden van het systeem Aarde en de daarin aanwezige biodiversiteit reguleren, in het geologische verleden en nu.*

De Verkenningscommissie Biogeologie (vcbg) heeft deze werkdefinitie later aangepast, mede op grond van de resultaten van een enquête onder Nederlandse

onderzoekers (zie bijlage C). De aangepaste definitie wordt gepresenteerd in paragraaf 1.3 op pagina 8. Internationaal wordt de discipline zowel biogeologie als geobiologie genoemd. De werkgroep heeft gekozen voor de term biogeologie.

Naar aanleiding van het rapport van de werkgroep (*Startnotitie Verkenning Biogeologie*, september 2001) is in november 2001 de Verkenningscommissie Biogeologie (samenstelling in bijlage 1) ingesteld. De vcbg is in januari 2002 begonnen met haar werkzaamheden. Haar opdracht was het uitvoeren van een wetenschapsverkenning op het gebied van de biogeologie (zie voor *Terms of Reference* bijlage 2). De vcbg diende de belangrijkste ontwikkelingen binnen het internationale biogeologisch onderzoek te identificeren en het Nederlandse onderzoek binnen deze ontwikkelingen strategisch te positioneren. Het eindrapport van de vcbg diende zo concreet mogelijk te zijn in de aanbevelingen aan overheid, onderzoeksfinanciers, universiteiten en onderzoekinstellingen.

## 1.2. Werkwijze

De vcbg heeft haar werkzaamheden verricht langs de volgende lijnen:

- Zij heeft bij aanvang van de werkzaamheden via een e-mail-enquête bijna 500 Nederlandse onderzoekers benaderd, van wie mocht worden verondersteld dat zij direct of indirect betrokken zijn bij het terrein van de biogeologie. Deze korte email-enquête bevatte vragen betreffende de afbakening van het terrein en een definitie. Een kwart van de aangeschrevenen heeft gereageerd; met deze reacties werd omvang en draagvlak van de biogeologie grofweg in kaart gebracht. (Zie voor de enquêtevragen en -resultaten bijlage 3).
- Zij heeft ronde-tafelgesprekken gevoerd over toekomstige speerpunten van onderzoek met buitenlandse en Nederlandse onderzoekers die actief zijn op het onderhavige terrein, en met vertegenwoordigers van nwo-alw (zie lijst geraadpleegde personen in bijlage 4).
- Zij heeft gebruik gemaakt van beschikbare jaarverslagen, web sites, (interne) rapporten en eindrapportages van (interne) onderzoeksbeoordelingen van instellingen actief op of rond het terrein van biogeologisch onderzoek (zie literatuurlijst).
- Zij heeft geïnventariseerd in hoeverre Nederlandse onderzoekers, die werkzaam zijn op het terrein van de biogeologie, internationaal een rol spelen. Dit is gedaan aan de hand van de uitkomsten van internationale visitaties (voor universiteiten via vsnu), screening van de mate van deelname aan internationale onderzoeksprojecten en de mate van participatie in internationale congressen.



- Zij heeft de (groeierende) rol van de biogeologie geïnventariseerd via een inventarisatie van het aantal toegekende projecten in de open competitie van alw en van de artikelen in een aantal prominente tijdschriften (*Science* en *Nature*).
- Zij heeft door middel van *position papers* de visies van de commissieleden weergegeven op biogeologie binnen hun specifieke onderzoeksterrein.

### 1.3. Het werkkterrein van de biogeologie

De commissie heeft de oorspronkelijk gehanteerde definitie enigszins gewijzigd, mede op grond van de resultaten van een enquête onder Nederlandse onderzoekers (zie bijlage 3), en de volgende algemene definitie van de biogeologie uiteindelijk als uitgangspunt voor haar werkzaamheden gehanteerd:

*De biogeologie betreft de studie van de regulering (in verleden, heden en toekomst) van het systeem Aarde door de voortdurende interactie van organismen en hun abiotische omgeving.*

Daarbij heeft de commissie de volgende werkvelden in de beschouwing betrokken:

- Ontstaan van het leven inclusief de prebiotische evolutie; de evolutiebiologie, vooral daar waar zij zich bezighoudt met gevolgen van genetische veranderingen op organismaal en systeemniveau inclusief de biogeografie; de plant- en dierkunde, vooral daar waar vergelijkende anatomie en systematiek bijdragen aan inventarisatie van biodiversiteit en kennis van evolutie;
- De paleontologie en paleobotanie van pro- en eukaryoten die de geschiedenis van het leven op aarde documenteren; voorts paleo-ecologie van pro- en eukaryoten: de reconstructie van het vroegere abiotische milieu, inclusief de studie van ecologische kenmerken van (uitgestorven) organismen;
- De biogeochemie en de geomicrobiologie, terreinen die zich bezighouden met stofstromen in en tussen biotische en abiotische delen van het systeem Aarde op diverse tijd- en ruimteschalen;
- De ecologie, de ecofysiologie en de microbiële ecologie, vooral daar waar wederzijdse beïnvloeding van stofstromen en organismen, populaties en levensgemeenschappen bestudeerd worden; de moleculaire ecologie, vooral daar waar fylogenie, soortvorming, adaptatie en verspreiding van soorten bestudeerd worden;
- Aspecten van de oceanografie, de limnologie, de pedologie en de klimatologie;
- De stratigrafie, vooral daar waar tijdschalen opgesteld en verfijnd worden.

Specifieke aandacht werd besteed aan de eventuele rol van nieuwe technieken (bijvoorbeeld moleculair biologische) en van modelstudies.

## **Wat de Aardwetenschappen bieden aan de Levenswetenschappen...**

- ▲ inzicht in de positie van de biosfeer als intrinsiek onderdeel van het systeem Aarde;
- ▲ besef van de duur en omvang van biologische processen over lange tijd- en ruimteschalen;
- ▲ een raamwerk voor het vinden van causale (bijvoorbeeld klimatologische) oorzaken van evolutionaire veranderingen, waarbij fossielen kunnen worden benut als gereedschap om radiatie en vervanging van soorten te verklaren;
- ▲ besef van de veranderende biodiversiteit als product van het systeem Aarde;
- ▲ begrip van macro-evolutionaire veranderingen, selectie en extinctie;
- ▲ informatie over de variabiliteit en de beschikbaarheid van bouwstenen voor het leven over lange tijdschalen;
- ▲ validatie van de moleculaire klok.

## **... en wat de Levenswetenschappen bieden aan de Aardwetenschappen:**

- ▲ fundamenteel begrip van evolutionaire processen als selectie en adaptatie;
- ▲ moleculaire en morfologische evidentie voor fylogenetische verbanden;
- ▲ besef van de veranderingen in het systeem Aarde als product van veranderende biodiversiteit;
- ▲ inzicht in de rol van het leven bij het reguleren van grootschalige kringlopen die essentieel zijn voor het systeem Aarde;
- ▲ informatie over de invloed van biota op de beschikbaarheid van essentiële grondstoffen als water;
- ▲ moleculair gereedschap voor de validatie van geologische of chemische data;
- ▲ biomarkers om het verleden te reconstrueren en het inzicht in evolutionaire processen te vergroten.

## 2. Verleden: de biogeologie in Nederland

### 2.1. Een terugblik

De geologie<sup>1</sup> en de biologie kennen in Nederland, evenals in Europa en Noord-Amerika, sinds de Tweede Wereldoorlog een zeer eigen ontwikkeling. Tot het midden van de twintigste eeuw lagen de beide wetenschapsterreinen veel dichterbij elkaar dan tegenwoordig. Prominente wetenschappers als Lamarck, Cuvier, Lyell en Darwin waren even goed thuis op het gebied van de biologie als de geologie. Zij waren naturalisten die de natuur in zijn geheel beschouwden; Darwin's eerste publicaties lagen zelfs op geologisch terrein. Tot woi waren delen van de biologie en de geologie betrekkelijk hecht verbonden via bijvoorbeeld de paleontologie en de evolutietheorie, maar die band is sindsdien geleidelijk zwakker geworden.

#### *Geologie*

Voor de Tweede Wereldoorlog hield de geologie zich vooral beschrijvend bezig met inventarisatie van klein- en grootschalige fenomenen die te maken hebben

<sup>1</sup> Bedoeld worden geologische disciplines zoals geochemie, geofysica, paleontologie, sedimentologie, structurele geologie, etc. Dit ter onderscheiding van het bredere begrip aardwetenschappen, dat tevens disciplines zoals meteorologie, fysische geografie en oceanografie omvat.

met structuur en samenstelling van de aardkorst, met daarbij een snel toenemend begrip van de ouderdom van de aarde via de paleontologie (relatieve datering van gesteenten) en later de isotopengeologie (absolute datering). Evolutie en evolutietheorie speelden nog een betrekkelijk prominente rol, maar de aandacht daarvoor was zelfs in die tijd al ondergeschikt. Na woiï groeide de vraag naar fossiele brandstoffen (en grondstoffen in het algemeen) enorm. Disciplines als algemene geologie, structurele geologie, economische geologie en de paleontologie stonden bijna geheel in dienst van die vraag. Toepassing van microfossielen leidde tot snelle en effectieve datering van gesteenten, vooral onder invloed van de groeiende vraag vanuit de olie-industrie. Daaruit vloeide ook de opkomst (in de jaren zeventig van de vorige eeuw) van de paleo-ecologie voort, waarin de reconstructie van milieuprocessen in het geologisch verleden centraal staat. In het licht van die ontwikkeling kan ook de latere snelle toename in omvang van het sedimentologisch en organisch-geochemisch onderzoek geplaatst worden. Immers, naast fossielen, bieden ook sedimenten en geochemische signaturen tal van mogelijkheden om te komen tot reconstructie van vroegere aardse milieus. Inzicht in de ontwikkeling van vroegere aardse milieus kreeg vanaf de jaren zeventig een enorme impuls via de *ocean-drilling* programma's: hierin werd de geschiedenis van de oceanen in – vaak groot – detail ontsloten.

Binnen de geologie nam de interesse voor – en de kennis van – de fenomenologie van de evolutie, laat staan de evolutietheorie zelf, gestaag af. Terugkijkend kan geconstateerd worden dat de ontwikkelingen in brede zin – zonder dat de onderzoekers dat op die momenten beseften – veelal in dienst stonden van de grote maatschappelijke vraag naar grondstoffen en producten.

De vrijwel geheel beschrijvende signatuur van de geologie werd vanaf midden jaren '60 in hoog tempo doorbroken door de opkomst van een tweetal nieuwe takken: de geochemie en de geofysica. In het eerste vakgebied staat de chemie, in het tweede de fysica van de aarde centraal. De hiermee sterk toegenomen analytische en kwantitatieve inslag van de geologie leidde tot een breuk met het traditioneel beschrijvende karakter, en een sterke toename van de oriëntatie op procesgang. De inzichten in de plaattektoniek die eind jaren '60 en begin jaren '70 van de vorige eeuw doorbraken, hebben de geologie totaal veranderd. Net als eerder de evolutietheorie en het besef van de werkelijke ouderdom van de aarde, vormde de theorie van bewegende platen en een dynamische aarde een enorme impuls voor de ontwikkeling van de Aardwetenschappen. Deze ontwikkeling heeft zich in toenemende mate gericht op een kwantitatief begrip van fysische en chemische processen binnen de aarde en de uitwerking daarvan aan het oppervlak. Klassiek geologische disciplines als de paleontologie en sedimentologie spelen hierbij een andere, en vooral minder beschrijvende, rol dan voorheen. De paleontologie

zocht en zoekt zijn sterkte in datering, tijdschalen en correlatie. Daarnaast kwam echter de eerder genoemde verschuiving naar (kwantitatieve reconstructies van) processen in paleo-milieus. In gelijke zin is de sedimentologie geleidelijk geëvolueerd tot een vak waarin processtudies van accumulatie en transport van sedimenten centraal staan in plaats van beschrijving van sedimentaire structuren.

### *Biologie*

Omstreeks dezelfde tijd kende de biologie een vergelijkbare of zelfs grotere omwenteling door de ontrafeling van de structuur van dna in 1953. Dit leidde tot een ingrijpende verandering in het wetenschapsveld. Tot die tijd kenmerkte de biologie zich door een geleidelijke verschuiving van de aandacht van het organismale naar het cellulaire niveau. Door de toegenomen moleculaire inzichten werden celbiologie en (moleculaire) genetica vakgebieden van groot gewicht. Deze ontwikkeling ging in die fase nog niet ten koste van de klassieke plant- en dierkunde of de biosystematiek. De taxonomie was een gerespecteerde discipline waarin geïnvesteerd werd. In een relatief vroeg stadium ontstond het besef dat de omgeving een grote invloed uitoefent op het individu, en op de wijze waarop de populatie in het systeem functioneert. Dit leidde vanaf eind jaren '60 van de vorige eeuw tot een groei van het aantal onderzoeksgroepen ecologie, waarbij snelle differentiatie optrad. Hierbij ontstonden aparte groepen die zich specialiseerden in processen op individu-, populatie- en systeemniveau. Binnen de nieuwe discipline ecologie ging in toenemende mate kennis van fysiologische en moleculaire processen een rol spelen.

De levenswetenschappen zijn sterk veranderd door de snelle vooruitgang van de moleculaire en veelal reductionistische benaderingen. Ze staan daarbij voor de centrale uitdaging om de resultaten van deze benaderingen weer te vertalen naar en te integreren in totale systemen, van cel tot ecosysteem met het individuele organisme als centrale eenheid. Deze meer holistische aanpak en de reductionistische versterken elkaar en hebben tot gevolg dat het veelal inventariserende en beschrijvende karakter van de biologie is aangevuld met verklarende en evolutionaire benaderingen.

Gedurende de laatste twintig jaar – en vooral tijdens het laatste decennium van de vorige eeuw – is de vooruitgang in de moleculaire biologie spectaculair geweest. De levenswetenschappen veranderden in een hoog tempo, vooral dankzij het beschikbaar komen van apparatuur die op subcellulair niveau routinematig analyses mogelijk maakte. De enorme opkomst van de toepassing van technieken als klonering, *PCR* en *rapid DNA sequencing*, en mede daardoor de bloei van genomestudies, bracht een beslissende wending binnen het vakgebied van de biologie. Deze heroriëntatie ging ten koste van de meer beschrijvende en klassieke

### Validatie van de moleculair genetische klok

Door de combinatie van moleculair genetisch en biogeochemisch onderzoek ontstaan ook nieuwe mogelijkheden om evolutionaire gebeurtenissen te dateren. Zo dook in 112 miljoen jaar oude sedimenten een nieuwe familie van organische verbindingen op. Het waren herkenbare resten van de membraanlipiden van koudwaterarchaea. Deze micro-organismen vormen momenteel 20 tot 50% van het mariene picoplankton en spelen mogelijk een belangrijke rol in de koolstofkringloop. Het betreft hier dus een evolutionaire stap van de eerste orde met grote gevolgen. De genetische verschillen tussen de warm- en koudwaterarchaea zijn blijkbaar 112 miljoen jaar geleden ontstaan. Het is duidelijk, dat deze benadering een nauwkeurige validatie van de moleculair genetische klok mogelijk maakt.

#### Literatuur

Kuypers, M.M.M., Blokker, P., Erbacher, J., Kinkel, H., Pancost, R.D., Schouten, S. en Sinninghe Damsté, J.S., *Massive expansion of marine archaea during a mid-Cretaceous oceanic anoxic event*, in: *Science* 293, pp. 92-95.

biologische disciplines, zoals de taxonomie, de klassieke plant- en dierkunde en in een later stadium de evolutiebiologie, gedragsbiologie en systeemecologie. Deze trend werd en wordt versterkt door de eind vorige eeuw ingezette ontwikkelingen op het grensvlak van biologie/chemie, biologie/fysica en biologie/wiskunde.

Het is niet vreemd dat de bovengeschetste ontwikkeling in Nederland en elders leidde tot het – in toenemende mate – uiteendrijven van de biologie en de geologie. Binnen de geologie werd en wordt sterk geïnvesteerd in een beter begrip van de procesgang, vooral inzicht in de kwantitatieve gang van fysische processen binnen de aarde, dit ten koste van ‘klassieke’ geologische disciplines als de paleontologie en sedimentologie. Binnen de biologie verschoof en verschuift het accent in hoge mate naar de moleculaire en cellulaire eigenschappen van het leven ten koste van aandacht voor het functioneren van het leven op organismaal- of systeemniveau. Het bindend terrein tussen Aard- en Levenswetenschappen, bestaande uit disciplines als de evolutiebiologie, paleontologie, paleo-ecologie en systeemecologie, plant- en dierkunde, is door deze ontwikkelingen in het gedrang gekomen.

## 2.2. Heroriëntatie op het biogeologisch onderzoek

Het besef dat de milieu- en grondstofproblematiek onafwendbaar en grensoverschrijdend is, leidde na de publicatie van het eerste rapport van de Club van Rome tot een voorzichtige heroriëntatie binnen delen van de aardwetenschappen en biologie. Mede onder invloed van Lovelocks (1979) *GAIÀ, a new look at life on*

*earth* is het besef gegroeid dat de fysisch-chemische omstandigheden aan het aardoppervlak, via het effect op de atmosferische samenstelling en daardoor op klimaat en waterrijkdom, door levensprocessen worden gedomineerd. Essentieel is daarbij de vraag betreffende de aard en omvang van de terugkoppelingen tussen leven en de abiotische elementen van de aarde, die kennelijk een rol spelen bij de wereldwijde regulatie van het systeem Aarde. Het wetenschappelijke *International Geosphere-Biosphere Programme* (igbp) is belangrijk geweest voor een verdere ontwikkeling van het inzicht dat het leven op aarde ingebed is binnen het gehele systeem Aarde, en dat de samenhang complex is. Hierbij dient opgemerkt te worden dat aardwetenschappers en biologen niet in gelijke mate bij de *Global Change* discussie betrokken zijn geraakt. Bovendien verengde deze discussie zich in de loop van de jaren '90 van de vorige eeuw sterk tot een vooral politieke discussie over klimaat en milieu. Toch vloeide uit de gehele ontwikkeling een groeiend besef voort dat op het grensvlak van geologie en biologie innovatieve bijdragen geleverd zouden kunnen en moeten worden. Vanaf 1980 heeft dit vorm gekregen in grofweg drie typen van onderzoek:

- Onderzoek naar grootschalige systemen ('systeem Aarde') in de context van mondiale (in de zin van wereldwijde) biogeochemische cycli. Hierbij staat de rol van stofstromen centraal voor zover ze regulerend zijn voor de fysisch-chemische omstandigheden waaronder biota kunnen functioneren. In toenemende mate wordt ook naar de regulerende rol van biota op stofstromen gekeken, waarbij automatisch grensoverschrijdend onderzoek tussen geologische en biologische disciplines op gang begint te komen.
- Onderzoek naar de reconstructie van paleomilieus (milieuprocessen in het geologisch verleden, bijvoorbeeld op tijdschalen ouder dan de instrumentele periode tot miljoenen jaren geleden), meer in het bijzonder het ontwikkelen van middelen (zogenaamde *proxies*) om te komen tot accurate en kwantitatieve milieureconstructies. In toenemende mate wordt daarbij ook de overweging betrokken dat een beter begrip van de werking van het aardse systeem in

### Pedologie

De ontwikkeling van bodems hangt sterk af van de daar aanwezige vegetatie en de activiteit van deze vegetatie. Wortels kunnen van invloed zijn op de beschikbaarheid van voedingsstoffen. Het is bekend dat de afscheidingen van wortels bodemdeeltjes doen oplossen, waardoor deze door de planten kunnen worden opgenomen. Anderzijds beschermen wortels tegen erosie en maken ze sedimentatie mogelijk. Daarmee vervullen ze een sleutelrol in de ontwikkeling van bodems en landschappen.

verleden en heden nuttig kan zijn om toekomstscenario's op langere tijdschalen (decennia tot eeuwen) te ontwikkelen.

- Onderzoek naar ontstaan en ontwikkeling van het leven, in het bijzonder naar stappen in de evolutie die het systeem Aarde ingrijpend hebben beïnvloed. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld de evolutie van kalk- en zuurstofproducerende organismen, en de gevolgen hiervan voor de kringlopen op aarde, en de ontwikkeling van de aarde tot een voor het leven geschikt en stabiel systeem.



## 3. Heden: ontwikkelingen binnen de biogeologie – sterkten en zwakten

### 3.1. Status-quo biogeologie

Zoals aan het eind van hoofdstuk 2 is aangegeven, is de afgelopen jaren een begin gemaakt met interdisciplinair onderzoek waarbij biologen en aardwetenschappers gezamenlijk, of onder gebruikmaking van wederzijdse kennis, actief zijn. Essentieel daarbij is dat bij biologen het besef groeide dat het leven op aarde geen zelfstandige entiteit is maar afhankelijk is van – en volledig ingebed is in – het hele aardse systeem. Vooral onder invloed van de vergaande verschuiving richting biomedische wetenschappen dreigde en dreigt deze elementaire waarheid uit zicht te geraken. Omgekeerd bestond en bestaat bij aardwetenschappers onvoldoende besef dat het leven op aarde een vitale kracht is die in belangrijke mate bijdraagt aan de vorming van het aardse (eco)systeem. De interactie tussen de levende en niet-levende aarde wordt echter pas duidelijk zichtbaar en inzichtelijk bij het beschouwen van de grote tijd- en ruimteschalen. Hiermee zijn aardwetenschappers meestal meer vertrouwd dan biologen.

*De tijd- en ruimteschalen zijn dan ook het sterkst scheidend principe in aanpak tussen beide wetenschapsvelden, waarbij de klassieke biologie en de klassieke geologie elkaar maar moeizaam vinden.*

Het lopend onderzoek dat onder de biogeologie gerangschikt kan worden ondergaat op dit moment internationaal en nationaal een snelle ontwikkeling. Hoewel niet altijd goed mogelijk, is in de onderstaande tekst een onderscheid gemaakt tussen fundamenteel en toepassingsgericht onderzoek. De onderscheiden terreinen zijn niet makkelijk uit elkaar te halen en apart te beschrijven omdat er een dicht netwerk van interacties bestaat dat leidt tot niet duidelijk te trekken grenzen.

In dit hoofdstuk wordt in een aantal korte aanduidingen een schets gegeven van de ontwikkelingen op het gebied van de biogeologie in Nederland. Deze wordt daarna geplaatst tegenover de internationale ontwikkelingen, op grond waarvan in een concluderend gedeelte getracht zal worden aan te geven welk onderdeel van de biogeologie in Nederland als kansrijk en/of internationaal sterk aangemerkt kan worden.

## 3.2. Nederland

### 3.2.1. *Het Nederlandse onderzoek in de biogeologie*

De *Startnotitie Verkenning Biogeologie* vermeldde een overzicht van de in Nederland tot dit terrein toe te rekenen universitaire onderzoeksgroepen. Deze lijst is enigszins uitgebreid en meer gedetailleerd weergegeven in bijlage 5. Opgemerkt dient te worden dat deze opsomming zeker niet uitputtend is. De lijst diende als basis voor het versturen van de enquête ter verkrijging van een eerste inzicht in welke onderzoeksvelden door de Nederlandse onderzoekers als belangrijk worden gekwalificeerd. Tegelijkertijd diende de respons om te komen tot een grove inventarisatie van welke onderzoekers of onderzoeksgroepen belangstelling hadden voor, of actief waren op, het terrein van biogeologisch onderzoek.

De door de commissie in de enquête gekozen speerpunten (ontstaan van leven, evolutionaire processen, functionele biodiversiteit/biogeochemische cycli, diepe biosfeer, paleo-reconstructies, modelleren; voor gehele enquête zie bijlage 3) blijken in sterk verschillende mate voor te komen bij de aan het veld verwante onderzoekscholen (zie Tabel 1). De respons op de enquête is samengevat in Figuur 1. Deze uitkomst geeft aan dat de onderzoeksvelden functionele biodiversiteit en biogeochemische cycli en paleoreconstructies het belangrijkste werden bevonden; in die velden bleek overigens ook het grootste aantal respondenten werkzaam.

Korte beschrijvingen van de programmaonderdelen van relevante onderzoekscholen die de biogeologie betreffen of aan de biogeologie raken, treft u aan in bijlage 6. Behalve binnen universitaire onderzoekprogramma's vindt biogeologieonderzoek in aanzienlijke omvang plaats bij het nioo-knaw en het Koninklijk

Tabel 1. Onderzoeksthema's binnen de Biogeologie en de mate van aandacht daarvoor binnen Nederlandse onderzoeksscholen.

Research school	Biodiversity	FE	ICG	NSG	PERC	EPS	SENSE
Theme							
origin of life	(+)	-	-	-	-	-	-
evolutionary processes (functional)	++	++	+	+	-	-	-
biodiversity	++	++	(+)	(+)	+	+	+
biogeochemical fluxes	-	+	++	++	-	-	++
deep biosphere	-	-	-	+	-	-	-
paleo-environmental reconstruction	-	-	++	++	-	-	-
systems 'approach'	-	+	+	+	+	-	+
molecular 'approach'	+	+	-	(+)	-	++	-

*Toelichting symbolen:*

- aandacht voor thema gering of afwezig; + aandacht voor thema duidelijk aanwezig;  
 (+) enig onderzoek gaande; ++ aandacht voor thema groot.

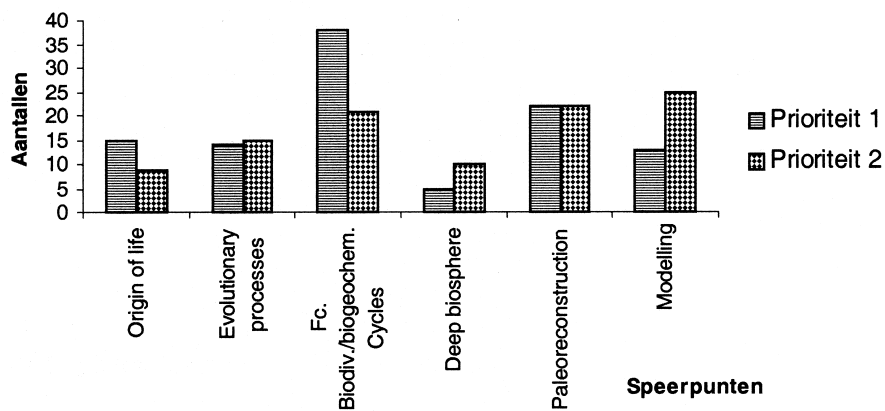
*Toelichting afkortingen:*

fe = Functional Ecology, eps = Experimental Plant Sciences, icg = Inter-universitair Centrum voor Geo-ecologisch onderzoek, nsg = Netherlands Research School of Sedimentary Geology, perc = Production Ecology and Resource Conservation, sense = Socio-Economic and Natural Sciences of the Environment

nioz, en nitg en de uu participeren in het Kenniscentrum voor Biogeologie tno/uu. Daarnaast is de biogeologie ook een component binnen de participatie tussen tno-nitg en de vu, het Kenniscentrum voor Geowetenschappelijk onderzoek tno/vua.

Op biogeologisch terrein vindt samenwerking plaats tussen universitaire groepen onderling en tussen universiteiten en andere instellingen van onderzoek. Zo is er het ccb (*Centre for Climate and Biosphere research*, waarin Wageningen Universiteit en Alterra participeren) en het cko (Centrum voor Klimaat Onderzoek, waarin behalve de uu tevens het knmi en het rivm participeren). tno-nitg en de uu participeren in het Kenniscentrum Biogeologie. Het nioo-knaw, de kun, en sinds kort de uu, participeren in het *Centre for Wetland Ecology*.

Naast bovengenoemde werkverbanden wordt nationaal samengewerkt binnen nwo-programma's als clivar (*Climate Variability and Predictability*), trias, *Biodiversity and Global Change*, *Sustainable Use and Conservation of Marine Living Resources*, Systeemgerichte Ecotoxicologie, en het nieuwe nwo thema 'Systeem Aarde'.



Figuur 1. Aantallen respondenten dat genoemde terreinen, respectievelijk methode(n), van het allergrootste belang achten (en prioriteit 1 gaven), respectievelijk het terrein/de methodiek van bijna even groot maar minder belang achten (en prioriteit 2 toekenden).

Deze programma's kennen ieder in meer of mindere mate biogeologische aspecten. Ook in het vervolg op het Nationaal Onderzoekprogramma Klimaatverandering van vrom en nwo zal aan deze aspecten aandacht worden besteed. Daarnaast heeft nwo-alw in zijn strategienota de gekoppelde Bio-geosfeer geïdentificeerd als prioriteit.

### 3.2.2. Fundamenteel onderzoek

Blijkens de enquête die de commissie in een vroeg stadium heeft doen uitgaan (zie hoofdstuk 3.2.1), en op basis van de signatuur van de onderzoeksgroepen die in Nederland werkzaam zijn, is het kwantitatief meest belangrijke onderzoek ruwweg te verdelen in een viertal thema's: *Evolutie*, *Biodiversiteit*, *Biogeochemische kringlopen*, en *Paleomilieu-reconstructies*. In onderstaande tekst worden toppen in het onderzoekslandschap per thema geïdentificeerd; voor het identificeren van de daarbij behorende toponderzoeksgroepen hanteerde de commissie het criterium dat de betrokken groep voor minstens één categorie het oordeel *excellent* verkreeg en/of niet lager dan *goed* scoorde in de (overige) beoordelingscategorieën van de meest recente internationale (vsnu) visitaties. Noodgedwongen heeft de commissie enkele veelbelovende recent gevormde (of door leerstoelwisseling gekenmerkte) onderzoeksgroepen niet in haar beschouwing betrokken omdat hier een adequaat visitatieoordeel ontbrak.

## *Evolutie*

Onderzoek naar evolutionaire processen vindt vooral plaats op de biologische faculteiten van de universiteiten. Hierbij zijn de genetische achtergrond van evolutie, selectie, fitness en soortvorming belangrijke thema's. Opvallend is dat dit in veel gevallen gezien wordt als strikt biologisch onderzoek, en in bijna alle gevallen ontbreekt samenwerking met aardwetenschappers. Ook het fylogenetisch onderzoek in Nederland, bijvoorbeeld naar de fylogenie van algen, korallen, schelpdieren, vogels of zoogdieren waarbij toch belangrijke aardwetenschappelijke implicaties voorkomen, kent niet of nauwelijks samenwerking met aardwetenschappelijke faculteiten. Opvallend is tevens dat het evolutionair onderzoek in Nederland sterk micro-evolutionair (dat wil zeggen tot het niveau van de soort) van karakter is; macro-evolutionaire processen (dat wil zeggen boven het soortniveau), zoals extinctie en biogeografie, vormen veel minder onderwerp van studie. Een uitzondering vormt het ibed (uva) waar een vergaande integratie heeft plaats gevonden van onderzoek naar biodiversiteit en evolutie, overigens zonder sterke dwarsverbanden naar de aardwetenschappen.

Evolutionaire processen in de context van veranderende ecosystemen, toch een prominent onderwerp in verband met *Global Change* problematiek, worden nauwelijks bestudeerd hoewel dit onderzoek op enkele plaatsen (uva, uu) in opkomst is.

Binnen de aardwetenschappen is evolutionair georiënteerd onderzoek bijna geheel verdwenen; wat nog bestaat houdt zich vooral bezig met macro-evolutie, in het bijzonder massa-extincties (vu, uu), en de fylogenie van zoogdieren (uu, Naturalis) en invertebraten (Naturalis).

Kenmerkend voor het evolutieonderzoek in Nederland is een scherpe scheiding tussen biologisch en aardwetenschappelijk onderzoek; op dit gebied is via samenwerking winst te behalen.

Topgroepen werkzaam op dit terrein zijn blijkens internationale visitaties de slechts ten dele of geheel niet op het terrein van de biogeologie werkzame groepen Systematische Plantkunde, Evolutiebiologie en Evolutionaire Ecologie (Leiden) en het Centrum voor Ecologische en Evolutionaire Studies (Groningen).

## *Biodiversiteit*

De sleutelvraagstukken waarop het Nederlands biodiversiteitonderzoek zich anno 2002 concentreert (*Progress Report Research School Biodiversity*) zijn het systematisch in kaart brengen van de hedendaagse biodiversiteit (zoals fylogenie van geselecteerde groepen, biodiversiteit-informatica) en de wijze van ontstaan van biodiversiteit (waaronder historische biogeografie, processen van populatie-

## Proxies

Henry Hooghiemstra

### Position Paper

De term ‘*proxy*’ of ‘*proxy*-gegevens’ wordt gebruikt voor iedere vorm van bewijsmateriaal dat een indirecte maatstaf van vroegere klimaat- en milieu-omstandigheden geeft.

Veel natuurlijke systemen zijn klimaatafhankelijk. Als er nog sporen van dergelijke oude systemen te vinden zijn kan hieraan eventueel paleoklimatologische informatie worden afgeleid. *Proxy*-gegevens over het klimaat bevatten een klimaatsignaal, maar dat signaal kan relatief zwak zijn en omgeven door ‘achtergrondruis’ als gevolg van andere, niet aan klimaat gerelateerde invloeden. Het *proxy*-materiaal heeft gewerkt als een filter, waarbij de klimaatomstandigheden op een bepaald tijdstip, of over een bepaalde periode, in een min of meer permanente gegevensbank zijn vastgelegd. De vastgelegde gegevens zijn echter complex en bevatten andere signalen die irrelevant kunnen zijn voor het doel waarvoor de *proxy* wordt gebruikt. Om uit de *proxy*-gegevens het paleoklimatologische signaal te kunnen afleiden, moeten gegevens eerst worden gevalideerd. Dit houdt in dat moderne klimaatgegevens en recent vastgelegde *proxy*-gegevens worden geanalyseerd om vast te stellen hoe, en in welke mate *proxy*-gegevens klimaatafhankelijk zijn. Hierbij wordt aangenomen dat zulke verbanden, die voor het heden gelden, ook geldig zijn voor de periode in kwestie. Dit is het principe van uniformiteit. Veel onderzoek op het gebied van de biogeologie moet daarom gebaseerd worden op onderzoek naar de hedendaagse klimaatafhankelijkheid van natuurlijke fenomenen.

*Proxies* kunnen bestaan uit zeer divers materiaal: glaciologisch bewijsmateriaal (zoals geochemie, gasgehalte, sporenelementen, fysische eigenschappen), geologisch bewijsmateriaal (zoals zuurstofisotopen, kenmerken van flora en fauna, alkenonen, eolisch stof, door ijs vervoerd materiaal, kleimineralogie, glaciale afzettingen, periglaciale structuren, kustlijnen, lössafzettingen, zandduinen, lacustriene sedimenten, oude bodems, speleothermen), biologisch bewijsmateriaal (zoals pollenkorrels, macrofossielen van planten, stomata dichtheid, boomringen, koralen, diatomeën, ostracoden, redoxprocessen, verbreiding van moderne populatie), en historisch bewijsmateriaal (zoals geschreven registers en fenologische gegevens).

Er is grote vooruitgang geboekt in het begrijpen van de samenhang tussen hedendaagse klimaat- en milieu-omstandigheden en de hedendaagse waarden van *proxies*. Zo zijn moderne dendroklimatologische modellen gebaseerd op betrouwbare ecologische principes. Onderzoek aan de huidige pollenregen heeft duidelijk gemaakt welke pollentaxa een over- of onderrepresentatie kennen, zodat schattingen van de bedekking van vegetatie in het verleden betrouwbaarder zijn geworden.

Echter, recent onderzoek toont aan dat het paradigma ‘het heden is de sleutel tot het verleden’ niet altijd geldig is. Bijvoorbeeld, de lage concentratie van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer tijdens de laatste ijstijd, gemeten in de luchtbelletjes in ijskernen, had tot gevolg dat de competitie tussen C3- en C4-planten sterk afwijkt van de situatie van nu. In lacustriene sedimenten kan deze balans worden afgeleid uit de <sup>13</sup>C-waarden van de geïsoleerde C<sub>31n</sub>-alkanen. De veranderende isotopenverhoudingen en mole-

cuul-signaturen in de sedimenten van een boorkern kunnen met vrij snelle methoden worden vastgesteld. Daardoor kan de temporele resolutie, en de statistische relevantie van *proxy*-gegevens aanzienlijk wordt verbeterd ten opzichte van meer traditionele methodes waarbij individuele fossielen worden verzameld of geïdentificeerd.

In de nabije toekomst kan belangrijke vooruitgang worden verwacht op terreinen, zoals:

- de ontwikkeling van geautomatiseerde pollenanalyse met behulp van beeldherkenning,
- het gebruik van nieuwe *proxies* die sneller gemeten kunnen worden dan de huidige *proxies*,
- verbeterde calibratie van in gebruik zijnde *proxies* door deze grondig te toetsen aan een uiteenlopend spectrum van milieu-omstandigheden waardoor het klimaatsignaal beter kan worden gescheiden van de achtergrondruis,
- verbetering van onze kennis over de ecologische ranges van fossielen die gebruikt zijn als *proxy* (vaststellen van het klimaat-ruimte diagram voor elke soort),
- analyse van niet-lineaire verbanden tussen *proxy*-gegevens en milieu-omstandigheden (bijv. de verschillende verdeling van C3- en C4-planten, afhankelijk van paleo  $p\text{CO}_2$ ;
- de verschillende verticale temperatuurgradiënten, gebaseerd zijn op de gemiddelde droogte van de lucht, die gebruikt worden in de reconstructie van paleotemperaturen,
- verschillende redoxstadia van de oceaan die het gevolg zijn van de opwarming/afkoeling;
- de verschillen in fluxen gedurende glaciale en interglaciale omstandigheden.

De verdere ontwikkeling van *proxies* wordt sterk gestimuleerd door vraagstukken rond *Global Change*, aangezien er voor de periode van de negentiende eeuw en ouder weinig direct gemeten gegevens zijn over veranderingen in milieu en klimaat. Nauwkeurige multi-site klimaatreconstructies met een sterk verhoogd oplossend vermogen in de tijd zijn nodig om tot veel betere regionale reconstructies te komen van de veranderingen in milieu en klimaat. Alleen met behulp van paleo-gegevens kunnen voorspellingen van klimaatmodellen, en grootschalige processen van erosie en sedimentatie etc. worden geverifieerd (paleodata-modelvergelijking). Door inverse modellering kan de gevoeligheid van *proxies* worden getest. *Proxies* spelen een belangrijke rol in de verbetering van de voorspellingen van toekomstige milieu- en klimaatveranderingen.

#### Literatuur

Bradley, R.S., *Paleoclimatology; Reconstructing Climates of the Quaternary* (second edition), Harcourt Academic Press, San Diego/London 1999.

Ruddiman, W.F., *Earth's Climate; Past and Future*, Freeman, New York 2001.

De biogeochemische kringlopen van elementen worden in essentie bepaald door de fysiologische respons van organismen op biotische en (abiotische) milieucondities en vinden voornamelijk plaats in micro-omgevingen en op moleculair niveau. Tot voor kort werden biogeochemische processen echter gezien als (bio)chemische processen zonder veel aandacht voor de actoren. Onder andere dankzij toepassingen van de moleculaire biologie in de ecologie wordt in hoog tempo nieuwe en vaak onverwachte kennis gegenereerd waarbij geheel nieuwe groepen of consortia van organismen worden ontdekt die een onverwacht grote rol spelen in de kringloop van elementen. Als voorbeelden kunnen genoemd worden de anaerobe oxidatie van methaan door een consortium van sulfaatreducerende bacteriën en *Archaea* en de fixatie van bicarbonaat door de overvloedig aanwezige en alom tegenwoordige *Crenarchaea*. Deze voorbeelden geven aan dat onze kennis van de koolstofkringloop in korte tijd substantieel is toegenomen zodat een meer kwantitatieve benadering mogelijk wordt en betere voorspellingen kunnen worden gedaan over toekomstige klimaatscenario's daar C<sub>1</sub> moleculen zoals CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> belangrijke spelers zijn in zulke scenario's. Ook de rol van mariene virussen en (nieuw ontdekte) bacteriën blijkt veel belangrijker te zijn voor een beter (kwantitatief) begrip van elementkringlopen enerzijds en ecologische processen anderzijds. Deze voorbeelden geven verder aan dat het 'openen van de microbiële *black box*' ons in staat stelt de genetische en functionele diversiteit van de belangrijkste spelers te bepalen.

De belangrijkste vragen die hierbij gesteld kunnen worden zijn:

- Kunnen wij organismale diversiteit hergroeperen op basis van zogenaamde functionele groepen die sleutelposities innemen in de kringloop van elementen?
- Wat is het moleculaire en organismale niveau waarop interacties tussen elementkringlopen plaatsvinden door functionele groepen?

Het moge duidelijk zijn dat met behulp van combinaties van nieuwe moleculair biologische technieken met een functionele *genomic* en *proteomic* benadering en nieuwe analytisch chemische technieken om verbindingsspecifieke isotoopgehalten te bepalen, veel nieuw inzicht verkregen kan worden in het functioneren van ecosystemen op verschillende ruimte- en tijdschalen en derhalve op de kringlopen van elementen. Dit alles zonder de noodzaak de microbiële hoofdrolspelers of hun consortia te isoleren en in cultuur te brengen, als dat al zou kunnen.

#### *Moleculaire palaeontologie*

De veranderingen in functionele biodiversiteit en dus van biogeochemische fluxen zijn in essentie vastgelegd in organische verbindingen en microfossielen die aanwezig zijn in sedimenten. Door validatie van deze organische verbindingen, zo mogelijk inclusief fossiel DNA, en de microfossielen als specifieke markers van functionele groepen c.q. sleutelorganismen wordt inzicht verkregen in de co-evolutie van bio- en geosfeer en wordt dus kennis verworven van milieu- en klimaatveranderingen op allerlei ruimte- en tijdschalen.



differentiatie en soortvorming; zie ook onder *Evolutie*). Een flink deel van het onderzoek speelt zich af op moleculair terrein, terwijl een ander deel vooral betrekking heeft op de inventarisatie van biodiversiteit. Aardwetenschappelijk onderzoek op het gebied van biodiversiteit vindt slechts op bescheiden schaal plaats en concentreert zich voornamelijk op de gevolgen van massa-extincties in het verleden en de invloed van klimaatverandering op de samenstelling van ecosystemen sinds het Mioceen, maar vooral in het Kwartair.

Alleen biodiversiteitsonderzoek in de context van processen binnen het systeem Aarde kan onder de biogeologie worden gerangschikt. Te denken valt hierbij aan de relatie tussen biodiversiteit en geochemische cycli, en functionele biodiversiteit. Het ontwrachten van kringlopen door menselijk handelen, onder andere via manipulatie van biota, en de gevolgen daarvan voor biodiversiteit, vormen daarbij een belangrijk terrein van onderzoek. Ook de gevolgen van urbanisatie en het fragmenteren van habitats zijn een goed voorbeeld van biogeologisch georiënteerd biodiversiteitsonderzoek. Dit type onderzoek wordt momenteel uitgevoerd door diverse groepen verspreid over de onderzoekscholen 'Biodiversiteit', 'Functionele Ecologie' en icg. De groepen zijn werkzaam bij respectievelijk de universiteiten van Groningen, Leiden, Utrecht, Wageningen, Amsterdam, en de

#### **Een klassiek voorbeeld**

Hopanoïde koolwaterstoffen werden in de jaren zestig en zeventig voor het eerst door aardwetenschappers geïsoleerd uit ruwe olie en sedimenten. Na hun isolatie werden deze naar aanleiding van hun chemische structuur beschouwd als pentacyclische stoffen. Aangezien deze stoffen in vrijwel ieder sediment, iedere bodem en in ruwe olie aanwezig waren, werd de hypothese gesteld dat het hierbij ging om stoffen van prokaryotische, dat wil zeggen bacteriële oorsprong. Daarom werd in samenwerking met microbiologen in bacterieculturen gezocht naar componenten met een hopaanskelet. Na enige tijd bleek dat hun functionele tegenpool, de hopaanpolyolen, zeer belangrijke onderdelen zijn van de celmembranen van veel bacteriën die het membraan versterken, zoals steroïden dat in eukaryoten doen. Sinds deze ontdekking hebben aardwetenschappers en microbiologen met wederzijdse wetenschappelijke voordelen samengewerkt om deze componenten en hun werking nader te onderzoeken.

Een vergelijkbaar voorbeeld, dat echter van veel recentere datum is, heeft betrekking op isoprenoïde ethers, de bouwstenen van de membranen van *Archaea*.

Vrije Universiteit. Een groot deel van het onderzoek betreffende fragmenteren van habitats vindt tevens plaats binnen Alterra. Verdere integratie van de genoemde onderzoeksgroepen als actieve deelnemers aan biogeologische onderzoeksprogramma's zou onderzoek naar lange termijnprocessen binnen het thema biodiversiteit kunnen bevorderen.

*Geconstateerd moet worden dat op dit terrein, waar biologen en aardwetenschappers bij uitstek succesvol zouden kunnen samenwerken, nationaal nauwelijks interdisciplinair onderzoek van de grond is gekomen. Het zich thans ontwikkelende NWO-ALW prioriteitsprogramma 'Biodiversity and Global Change' kan een nieuw initiatief vormen op dit grensvlak.*

Topgroepen werkzaam op dit terrein zijn blijkens internationale visitaties de groep Herbarium Leiden (grotendeels werkzaam buiten het veld van de biogeologie zoals hier gedefinieerd), de groep Ecosysteemstudies van het nioo-cemerknaw (Heip) en de groep Natuurbeheer en Plantenecologie van Wageningen Universiteit (Berendse).

#### *Biogeochemische kringlopen*

De geochemie is van oudsher sterk gericht op enerzijds abiotische, diepe aardse processen, en anderzijds mariene processen. De afgelopen jaren is in hoog tempo, vooral aan de uu en de onderzoeksinstituten nioo-knaw en Koninklijk nioz, marien geochemisch onderzoek verschoven in de richting van de bestudering van mondiale stofstromen en cycli, en de vraag naar de biologische controle daarop. Voorts heeft Nederland traditioneel een sterke positie op het gebied van *wetlands* en bodems.

In het aquatisch domein nemen mondiale cycli een essentiële plaats in. De chemische oceanografie en limnologie richten zich in toenemende mate op grensvlakprocessen als redoxprocessen en hun interactie met biota. De kringloop van koolstof bijvoorbeeld, wordt sterk bepaald door mariene processen waarbij de biologische pomp bij het reguleren van CO<sub>2</sub> in de atmosfeer in belangrijke mate mede wordt gedreven door de oceaan.

Op het gebied van *wetland* onderzoek neemt Nederland internationaal een sterke positie in, vooral daar waar de ecologie, microbiologie en biogeochemie samenkomen. Centra zijn kun en in mindere mate de uu voor wat betreft de universitaire instellingen, het nioo-knaw en in mindere mate het Koninklijk nioz voor wat betreft de onderzoeksinstituten. Opvallend is dat veel onderzoek hier oorspronkelijk puur biologisch van aard was, waaraan later onderzoek naar chemische processen op systeemchaal toegevoegd werd. De laatste jaren vonden

niet onaanzienlijke verschuivingen plaats doordat (systeem)ecologen, bodemkundigen, biogeochemici en microbiële ecologen zijn gaan samenwerken.

Op het gebied van bodems is de integratie van ecologie, biogeochemie en microbiële ecologie zeer ver gevorderd. Hier zijn snelle en verrassende ontwikkelingen aan de gang vooral ook door de introductie van moleculaire technieken. Grootste centra zijn te vinden aan nioo-knaw, uva en wur.

Kwaliteit van grondwater hangt nauw samen met de biogeochemische processen die daarin een rol spelen. Hierbij is de interactie tussen de microbiologie, de microbiële ecologie en de geochemie van belang. Essentieel daarbij is de mogelijkheid om via een koppeling van model- en experimentele studies te komen tot een beter inzicht in complexe microbiële-geochemische processen. Probleem daarbij is de opschaling naar grote tijdschalen en grote ruimtelijke schalen. Grootste concentraties van onderzoek zijn aan de uu, Koninklijk nioz, nioo-knaw, kun, vu en wur.

#### **De microbiële productie van methaan in seeps, moddervulkanen en gashydraten**

De biogeochemische waarneming van zowel de methaanproductie als de oxidatie hiervan in CO<sub>2</sub> zijn belangrijk voor de evaluatie van klimaatveranderingen in het verleden en het heden. In het mariene milieu is de anaërobe oxidatie van methaan (AOM) de belangrijkste put, die de methaanproductie vrijwel in balans brengt. Hoewel er vandaag de dag voldoende geochemische methoden bestaan voor het vaststellen van de belangrijkste plekken waar aom plaatsvindt en om ruw te kunnen schatten wat hiervan de bijdrage is aan de mondiale methaancyclus, ontbreekt het aan het nodige inzicht in de hieraan gekoppelde microbiologie, waardoor het nog steeds niet mogelijk is om dit belangrijke proces binnen de mondiale koolstofcyclus vanuit biogeochemisch oogpunt werkelijk te doorgronden.

Onlangs is een combinatieonderzoek met biomarkers uitgevoerd, met behulp van stabiele isotopenanalyse en fluorescentie in situ hybridisatie. Hieruit bleek dat een consortium van *Archaea* en sulfaatreducerende bacteriën verantwoordelijk is voor aom in methaanrijke sedimenten. De huidige hypothese luidt dat de methanogenen (*Archaea*) in omgekeerde volgorde werken om methaan te oxideren, waardoor een intermediaire stof wordt gevormd die door de sulfaatreducerende bacteriën wordt gebruikt en waarbij de omstandigheden blijven bestaan voor AOM. Verder zijn deze consortia waarschijnlijk betrokken bij de vorming van carbonaatstructuren boven gashydraten. Deze vragen staan centraal in het nieuwe onderzoekprogramma, waarbinnen onder andere de geomicrobiologie van geconcentreerde bronnen van methaan, zoals sedimenten met gashydraten en moddervulkanen onderzocht wordt.

*Status quo*

Het archief van de aarde, waarin haar geschiedenis soms tot in detail beschreven en bewaard is, is het meest compleet voor wat de oceanen betreft. Overblijfselen van leven zijn goed bewaarbaar in een waterig milieu op voorwaarde dat er snelle begraving plaatsvindt, en de oceaan voldoet aan dat criterium. In de afgelopen decennia is de kennis van de diversiteit van mariene organismen en hun evolutionaire geschiedenis enorm toegenomen. Hierbij zijn grote internationale programma's van belang geweest. Vooral het *Ocean Drilling Program* heeft een centrale rol gespeeld in de ontwikkeling van de mariene paleo-ecologie: door gebruik van in toenemende mate microscopisch kleine fossielen, en de chemische eigenschappen van die fossielen, is de geschiedenis van de oceaan in betrekkelijk groot detail ontsloten. Daarnaast was en is de olie-industrie, vooral daar waar interesse bestaat om ontstaan en accumulatie van olie te begrijpen, een tweede belangrijke factor geweest in die ontwikkeling. Foraminiferen, (kalkachtige) dinoflagellaten, stuifmeel vanaf land, diatomeeën en andere microfossielen worden gezien hun wijdverbreide voorkomen, en gezien de geweldige hoeveelheid informatie die er in hun skelet is opgeslagen, in nog steeds toenemende mate gebruikt om het verleden te reconstrueren.

De aard van het gebruik van microfossielen verschuift op dit moment echter sterk: werden vroeger vooral analogieën gebruikt (*the present is the key to the past*; ofwel: deze soort indiceert tropische omstandigheden, de voorouder zal dit ook wel doen), nu wordt er vooral gestreefd naar kwantitatieve reconstructies gebaseerd op de chemische en biologische kwaliteit van het fossiel.

Een goed voorbeeld van het bovenstaande is de nauwkeurigheid waarmee bentische foraminiferen (op de bodem levende eencelligen) met hun kalkachtige schaal-tje een beeld geven van vroegere omstandigheden. Microhabitatstudies van foraminiferen, die op een paar plaatsen ter wereld ook experimenteel worden uitgevoerd, geven een nauwkeurig beeld van de chemische gesteldheid aan het sedimentwateroppervlak in de oceaan. Toegepast levert die kennis bijvoorbeeld inzicht op in de mate van beluchting van de oceaan; dit inzicht wordt verkregen door nauwkeurig schommeling in soortsamenstelling en chemische compositie (bijvoorbeeld redox-elementen in hun skelet) van foraminiferen te gebruiken. Inzicht in de staat van beluchting van de oceaan op zijn beurt is weer indicatief voor de snelheid van de oceaan-circulatie en de aard van het daarmee samenhangende klimaat. De toepassing van fossielen of fossielresten als *proxies* speelt steeds vaker een rol in de context van zeer hoge resoluties, dat wil zeggen in dichtbemonsterde en nauwkeurig gedateerde tijdreeksen.

*Toekomst*

Er zijn binnen de mariene paleo-ecologie sterke tendensen waarneembaar in drie richtingen. De eerste is naar het verder exploreren van de bruikbaarheid van fossielen als *proxies*. In toenemende mate betreft dit experimentele studies, waarbij de organis-

men in vitro en in vivo gehouden worden om onder gecontroleerde omstandigheden de relaties tussen *proxy* en milieuparameter te onderzoeken. Tegelijkertijd zijn er ook, zij het nog in geringe mate, micro- en mesokosmosexperimenten die geologische scenario's naspelen en de effecten van vermeende gebeurtenissen in het verleden op (delen) van het mariene systeem trachten te begrijpen. Voorbeelden daarvan zijn experimenteel onderzoek naar extinctions van eencelligen en de gevolgen daarvan voor het ecosysteem, effecten van plotseling intredende anaërobie, effecten van scherp wisselende temperatuur, en gevolgen van pollutie.

De tweede tendens betreft het toepassen van *proxies* in *high-resolution* reeksen, dat wil zeggen, nauwkeurig gedateerde tijdreeksen die moeten leiden tot een gedetailleerd beeld van verandering versus tijd. In toenemende mate is het hierbij de bedoeling om in het verleden beter te begrijpen zodat daar kennis uit geput kan worden om te anticiperen op veranderingen in de toekomst van de aarde onder antropogene druk. In dit verband spelen de oceanen een sleutelrol in onze veranderend aardse systeem.

De derde tendens betreft toepassing van moleculaire kennis: dit betreft vooral de kennis van organische moleculen als resten waarvan de samenstelling indicatief is voor het paleomilieu. Daarnaast is echter de mariene *record* ook bij uitstek geschikt om de evolutionaire geschiedenis te reconstrueren en te verbinden met moleculair fylogenetische kennis hetgeen zal leiden tot een fundamentele begrip van de evolutie.

In de biogeologie ligt de nadruk vooral op mariene systemen. Dit komt ongetwijfeld doordat mariene sedimenten de langste en meest volledige archieven opleveren aan fossielen en *proxies*. Dat geeft echter voor perioden na het Devoon makkelijk een scheef beeld van de op aarde heersende biomassa, biodiversiteit en de daaraan gekoppelde biogeochemische fluxen. Nadat planten het land hadden veroverd, namen de terrestrische ecosystemen het merendeel van de biomassa op aarde voor hun rekening. Deels als gevolg van de aanzienlijk grotere klimatologische variatie en lithologische verscheidenheid op het land, ontstond daar ook een grotere biodiversiteit dan in zee. Vandaag de dag is de terrestrische 30% van het aardoppervlak verantwoordelijk voor 55% van de mondiale fotosynthese-respiratie-flux. Het grootste deel de emissies van de broeikasgassen  $N_2O$  en  $CH_4$  is afkomstig van het land, waar eveneens meer dan 80% van de biologische  $N_2$ -fixatie ter wereld plaatsvindt. Het land voorziet via de atmosfeer en afstromend water in bijna een derde van de behoefte van de mariene biota aan N en het grootste deel van hun behoefte aan Si en Fe. Het grootste deel, of mogelijk zelfs al het post-Devone mariene calciumcarbonaat is afkomstig van calcium dat is vrijgekomen als gevolg van verwerking van Ca-silicaten op het land onder invloed van de afscheiding van  $CO_2$  door de wortels van planten en door microben die plantenresten composteerden.

Deze elementen zijn grotendeels gemobiliseerd uit de zeer dunne laag (< 1 m) aan het oppervlak van het terrestrische gedeelte van de aardkorst, die bodem wordt genoemd. Bodems verschillen sterk van de niet-geconsolideerde klastische sedimentaire afzettingen (die misschien oppervlakkig op bodems lijken). Bodems zijn biotische constructies<sup>1</sup> die gekenmerkt worden door (1) de aanwezigheid van veel hogere concentraties aan beschikbare plantenvoedingsstoffen dan diepere aardlagen, (2) een bodemstructuur die voorziet in een heterogeen systeem van poriën, waardoor planten zowel lucht (en daarmee zuurstof) als water aanwezig zijn, die beide nodig zijn voor de wortels van terrestrische planten, en (3) de aanwezigheid van organisch materiaal (humus) dat bijdraagt aan de opbouw en het onderhoud van de bodemstructuur, water absorbeert en dat plantenvoedingsstoffen kan opnemen en afstaan.

Bodems zijn te beschouwen als de producten van ecosysteemingenieurs<sup>2</sup> die de 'fitness' van de 'ingenieurs' in kwestie bevorderen door beïnvloeding van bepaalde bodemeigenschappen<sup>3</sup>. Deze terugkoppeling kan belangrijke evolutionaire gevolgen hebben. Voorbeelden van zulke ecosysteemingenieurs met aanzienlijk effecten op bodemeigenschappen, biochemische cycli en landschappen zijn zwavel-oxiderende bacteriën, bevers, regenwormen, termieten, bladsnijdermieren, veenvormende planten (*Sphagnum*)<sup>4</sup>, en boomsoorten die, afhankelijk van hun strategie, verschillende en soms tegengestelde effecten op bodemsamenstelling en overige vegetatie hebben<sup>5,6</sup>.

Van oudsher is bodemonderzoek sterk gericht op bodemsoorten en toepassing in de landbouw. Grootschaliger onderzoek naar de biogeochemische rol van bodems was schaars tot de komst van het onderzoek naar *Global Change* dat ongeveer tien jaar geleden begon. Als gevolg daarvan is de rol van bodems in de biogeologie nog steeds een onderontwikkeld gebied.

Interessante biogeologische kwesties op het gebied van bodems zijn bijvoorbeeld de aard van de bescherming van humus tegen microbiële afbraak, de rol van biota ten aanzien van de verwerking van carbonaat en silicaat en het vrijgekomen van SO<sub>2</sub> door oxiderend pyriet uit sedimenten van lage mariene terrassen en continentale plateaus tijdens de zeespiegeldaling aan het begin van een ijstijd.

*Noten*

- 1 Breemen, N. van, *Geoderma* 57, 2003, pp. 183-211.
- 2 Jones, C.G. et al, *Ecosystem engineers: Organisms that directly or indirectly modulate the availability of resources by changing the environment*, in: *Oikos* 69, 1994, pp. 373-386.
- 3 Odling Smee, F.J. et al, *Niche Construction: the Neglected Process in Evolution*, Princeton University Press (in the press)
- 4 Breemen, N. van, *Trends in Ecological Evolution* 10, 1995, pp. 270-275.
- 5 Frehlich, L.E. et al, *Ecology* 79, 1993, pp. 119-137.
- 6 Dijkstra, F., *Effects of tree species on soil properties in a forest of the northeastern us*, Thesis, Wageningen University 2001.

Kenmerkend voor het nationale onderzoek op het terrein van de biogeochemische kringlopen is een sterke mondiale positie op het gebied van ruimtelijke biogeochemische processen, vooral van *wetlands*, graslanden en oceanen, waarbij samenwerking tussen ecologen en aardwetenschappers (geochemici, geohydrologen) groeiende maar nog niet sterk ontwikkeld is. Langlopende gevolgen van veranderingen in de interactie tussen biota en geochemische cycli, vooral door processen op grensvlakken, nemen nog een relatief ondergeschikte plaats in.

Blijkens internationale visitaties zijn topgroepen en zeer goede groepen op dit terrein de groep Ecosysteem Studies van het nioo-ceme-knaw (Heip, Middelburg), de groep Microbiële Ecologie van het nioo-cl-knaw (Laanbroek), de groep Aquatische ecologie van de kun (Van Groenendael, Roelofs), de groep Biogeochemie aan de uu (Van Cappellen), de groepen Mariene geochemie (Van Raaphorst) en Mariene biogeochemie (Sinninghe-Damsté) van het Koninklijk nioz en de groep Bodemvorming aan de wur (Van Breemen).

#### *Paleomilieu-reconstructies en proxies*

Het paleontologisch, paleobotanisch en paleoecologisch onderzoek is van oudsher sterk ontwikkeld in Nederland. Grote concentraties bestaan aan de universiteiten (uu, vu) en in mindere mate het Koninklijk nioz, terwijl ook aan de uva, nitg en in museaal Nederland (Naturalis) redelijk omvangrijke expertise aanwezig is. De bezuinigingen van de afgelopen jaren hebben geleid tot een verarming van de vakgebieden die actief zijn op dit terrein, waardoor bijvoorbeeld kennis op het gebied van de paleontologie van vertebraten en invertebraten sterk gereduceerd is. Een deel van de paleontologie, paleobotanie en paleo-ecologie heeft zich gericht op paleomilieu-reconstructies en het ontwikkelen van methoden om tot accurate reconstructies te komen. Deze zogenaamde *proxies* kennen inmiddels een enorme verscheidenheid en bieden reconstructies van de paleo-temperatuur, de paleo-precipitatie, de paleo-O<sub>2</sub> en paleo-CO<sub>2</sub> gehalten, de paleo-windrichting, en de paleo-saliniteit van de vroegere aarde.

Naast biologische *proxies* (bijvoorbeeld indexsoorten of biologisch geregeerde eigenschappen van materiaal) is er een toenemend scala aan (geo)chemische *proxies*. Reconstructies van bijvoorbeeld paleo-productie, paleo-saliniteit, paleo-O<sub>2</sub>, en de mate van continentaal sedimenttransport, worden mede gemaakt op basis van natuurlijke verbreiding van chemische elementen. In het verlengde hiervan, maar met een geheel andere expertisebasis, ligt de snel in opmars zijnde kennis op het gebied van moleculaire *proxies*. Moleculen als resterend document van organismen blijken bruikbaar om karakteristieken van het milieu (zoals paleo-temperatuur) alsook de aanwezigheid van bepaalde typen organismen te



reconstrueren. Deze moleculaire paleontologie is zowel inzetbaar voor het terrestrische als het aquatisch domein en wordt vrijwel uitsluitend beoefend aan het Koninklijk nioz, de uu en de uva.

Toepassingsgebieden van dit onderzoek liggen vooral op het terrein van (Kwartair)reconstructies van paleoklimaat en paleoceanografie, waarbij de mate van (kwantitatief) detail sterk is toegenomen. Hierbij is van belang dat de stormachtige ontwikkeling op het gebied van *proxies* hand in hand is gegaan met een toename van de resolutie op het gebied van daten. De mogelijkheid om milieuprocessen en veranderingen in de staat van de aarde te kunnen kwantificeren tegen de achtergrond van een bekende en nauwkeurig bepaalde hoeveelheid tijd (vooral de periode van de laatste 40.000 jaar), biedt een ongekend perspectief om tot kwantitatieve reconstructies te komen. Die reconstructies op hun beurt kunnen weer dienen om lange termijn computermodellen te valideren. Daarvan gebruik makend, kunnen toekomstige ontwikkelingen van het systeem Aarde met meer vertrouwen gesimuleerd worden.

*Kenmerkend voor het Nederlandse paleomilieu – en proxy-onderzoek – is een sterke mondiale positie op het gebied van proxies, en een snelle ontwikkeling om te komen tot nieuwe methoden, onder andere door gebruikmaking van moleculaire kennis. Kenmerkend is tevens dat het vooral een aardwetenschappelijk gedreven veld is waarbij kennis van biologische, microbiologische en biochemische processen die ten grondslag liggen aan proxies, alsook moleculaire kennis om proxies verder bruikbaar te maken, niet gemist wordt om stappen voorwaarts te zetten.*

Topgroepen werkzaam op dit terrein zijn blijkens internationale visitaties de groep Mariene Biogeochemie van het Koninklijk nioz (Sinninghe-Damsté, Schouten), de groepen Stratigrafie/Paleontologie/Biogeologie (Meulenkamp, Van der Zwaan, Hilgen) en Biogeochemie/Chemische Oceanografie (Van Cappellen, De Lange, De Leeuw) aan de uu, de groep Paleobotanie aan de uva (Hooghiemstra), de groep Botanische Paleo-ecologie aan de uu (Lotter), en de groep Paleo-ecologie aan de vu (Kroon).

### 3.2.3. Toegepast onderzoek

Grote delen van de moderne maatschappij en het maatschappelijke verkeer zijn afhankelijk van, of worden beïnvloed door, biogeologische processen. Reeds in eerdere verkenningen (*Ruimte voor Aardwetenschappen*, 1996 en *Bio-exact*, 1999) wordt gewezen op het essentiële belang van kennis van biogeologische processen in de context van de toekomstige ontwikkelingen van de aarde onder invloed van menselijk handelen.

Toegepast biogeologisch onderzoek wordt vooral uitgevoerd door tno-nitg, Delft Cluster en Alterra. tno-nitg en de uu hebben in 2001 een Kenniscentrum biogeologie opgericht dat specifiek tot doel heeft om fundamenteel onderzoek en toegepast onderzoek bij elkaar te brengen en om de in Utrecht aanwezige expertise zo breed mogelijk te gebruiken.

Toegepast onderzoek op het gebied van biodiversiteit en *ecosystem services* gericht op belangrijke diensten die ecosystemen leveren aan de mens, bijvoorbeeld het produceren van voedsel (vis, graan), het beheer van de waterkringloop, het reguleren van het (micro)klimaat en het zuiveren van bodem en water van contaminanten. Dit type onderzoek wordt vooral uitgevoerd door Alterra en – in mindere mate – door nioo-knaw en Koninklijk nioz; ook universiteiten (met name kun, rug, uva en wur) zijn hierbij actief betrokken. Het prioriteitsprogramma *Sustainable Marine Ecosystems* (nwo) kent naast biologische ook juridische en economische aspecten.

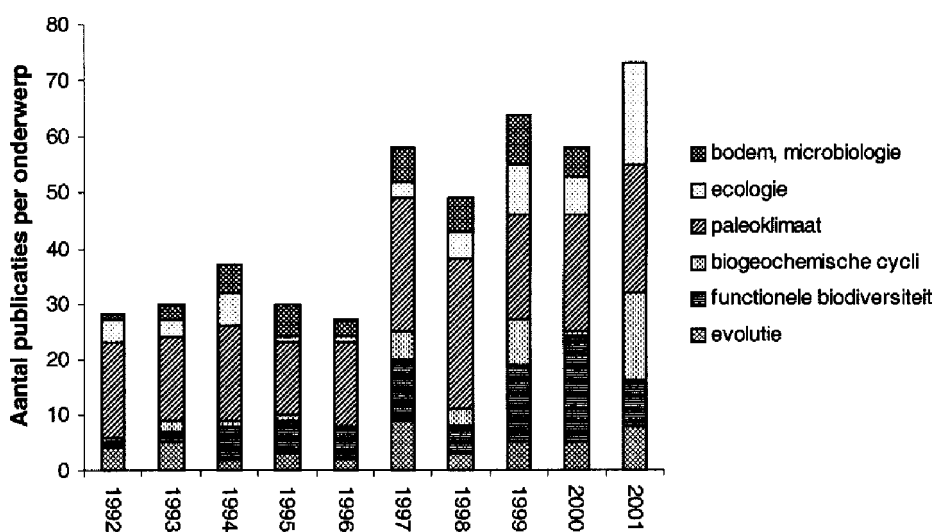
#### **Kustontwikkeling, een recent voorbeeld van de interactie tussen biologische en geologische processen**

Voor een hedendaags voorbeeld van de interactie tussen biologische en geologische processen hoeven we niet ver van huis te gaan. In de Waddenzee en de Delta wordt de sedimenthuishouding van wad, slik, kwelders en schorren gestuurd door een nauwe interactie tussen geologische en biologische processen. Door geologische processen vindt transport van zand en slik door de zeegaten naar binnen toe plaats, terwijl tegelijkertijd rivieren en spuisluisen slib uit het achterland aanvoeren. Als dit sediment op de platen bezinkt, groeien tussen de zand- en slikdeeltjes bodembewonende microalgen die door uitscheiding van organische verbindingen (exopolysacchariden) de sedimentdeeltjes aan elkaar kitten. Ook de dierenwereld speelt daar een rol in, enerzijds door ook dergelijke verbindingen uit te scheiden, maar ook door de microalgen te begrazen en zo de productie van exopolysacchariden te verminderen. Gezamenlijk bevorderen planten en dieren aldus de ophoging van de slikken en wadplaten.

Als de platen zo hoog zijn opgeslibd dat de planten, zoals zeekraal en kweldergras, zich kunnen vestigen, wordt dit proces nog meer versterkt. In de luwte van de planten neemt de sedimentatie toe en aldus kan een kwelder snel opslibben tot het niveau van de hoogste hoogwaters. Tegelijkertijd beïnvloedt de vegetatie de topografie van de kwelder. De begroeiing dwingt de eb- en vloedstroom in een fijnmazig patroon van kreken en prielen. Ook biedt de begroeiing weerstand tegen erosie.

Biogeochemische cycli hangen nauw samen met biodiversiteit, en omgekeerd, en vormen zeker in het kader van internationale verdragen een prominent punt van beleid en onderzoek. Te denken valt hierbij aan bijvoorbeeld N-depositie via de landbouw, methaanproductie, eutrofiëring van de kust en de daaruit voortvloeiende effecten. In dit type onderzoek speelt de microbiologie een grote rol, evenals in toenemende mate de (landschaps)ecologie en de biogeochemie. Alterra en het rivm zijn de grootste spelers op dit terrein in niet-universitair verband; kun, wur en uu in universitair verband.

Zoet water is van essentieel belang en in toenemende mate breekt inzicht door dat gebrek aan water (en soms overvloed daarvan) behoort tot de grootste problemen die de aarde in de toekomst zal kennen. Naast de hoeveelheid water speelt de kwaliteit van water een rol; biota en kwaliteit van water zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden, en microbiologisch, ecologisch en geochemisch onderzoek van rivieren, *wetlands* en *shelf* zijn hierbij essentieel. Het Koninklijk nioz, nioo-knaw, Alterra, riza en kun doen hierbij het meeste onderzoek, vooral op het terrein van herstel van waterkwaliteit. Kust en kustbeheer, zeker in het licht van stijgend zeespiegelniveau, is voor een natie als Nederland van groot belang. Bij kusten speelt sedimentfauna- en sedimentflora-interactie een grote rol als het gaat om sedimentstabiliteit. rikz, nioo-ceme-knaw en Koninklijk nioz verrichten hier onderzoek naar.



Figuur 2. Aantallen biogeologisch georiënteerde publicaties in 'Nature' verdeeld naar deelthema's vergelijkbaar met de VCBG-enquête (zie daarvoor hoofdstuk 3.2.1).

Beheer van bodem, en water en lucht, en vervuiling daarvan, is typisch het domein van de milieuwetenschappen. Daar waar echter sprake is van grootschaligheid en lange termijnen, komt een andere dimensie om de hoek kijken die tot nu in Nederland in onderzoek en beleid nauwelijks aandacht krijgt. Hier kunnen vragen worden gesteld zoals: wat is de natuurlijke, pre-antropogene variabiliteit van bepaalde processen, hoe functioneerden systemen zonder de antropogene belasting, hoe functioneerde en hoe gaat het systeem functioneren onder hoge zeespiegels en lokaal zeer vochtige (broeikas)omstandigheden. Ook hierbij is een verdere integratie van disciplines zeer gewenst, een ontwikkeling die evenzeer zichtbaar is bij internationale wetenschappelijke programma's, eerst binnen respectievelijk het igbp, wcrp en diversitas, nu in toenemende mate tussen deze drie programma's onderling. Deze toenemende interdisciplinariteit zal onvermijdelijk leiden tot een verdere druk op integratie op het grensvlak van Aard- en Levenswetenschappen.

Er is een gering besef van de toepasbaarheid van biogeologisch onderzoek in Nederland, zowel bij de onderzoekers als bij overheden en financiers. Vooral op de terreinen kustverdediging, ondiepe mariene biogeochemie en biodiversiteit, en zoetwatersystemen kent Nederland een grote expertise. Toch vergt dit een flinke mate van nadere detaillering die de commissie in dit stadium niet kan bieden. Immers, het terrein van de biogeologie is nauwelijks goed gemarkeerd en de interdisciplinaire ontwikkeling komt pas op gang. Het is duidelijk dat nieuwe toepassingen vooral liggen in het domein van lange tijdschalen en grote ruimtelijke schalen, maar ook daar is nadere precisering gewenst. Hoewel nu prematuur, kan de commissie zich wel voorstellen dat op niet al te lange tijd een nadere studie speciaal naar dit aspect ingesteld kan worden. Daarnaast merkt de commissie op dat bundeling van toponderzoek in de vorm van een nationaal centrum zoals elders in dit rapport wordt voorgesteld, ongetwijfeld zal leiden tot een nadere concretisering op dit gebied.

### **3.3. Internationale ontwikkelingen**

Hoewel er zeer snelle ontwikkelingen op het gebied van de biogeologie plaatsvinden, die hun weerslag vinden in belangrijke tijdschriften als *Nature* (zie figuur 2), is internationaal het gevoel te bespeuren dat de definitie van het gebied vaag is. Uitgaande van de operationele definitie gegeven in hoofdstuk 1.3, dat biogeologie de studie is die analyseert hoe organismen het aardse milieu beïnvloeden, en omgekeerd hoe organismen beïnvloed worden door de ontwikkeling van de aarde, is er sprake van een breed spectrum aan disciplines dat zich met dit onderwerp bezighoudt. Hiertoe worden internationaal onder meer de volgende gebieden gerekend: studies naar respectievelijk het ontstaan en de evolutie van het

leven, de vroege aarde en de verdere ontwikkeling daarvan, de moleculaire evolutie, buitenaards leven, de biogeochemie van de aarde, mondiale klimaatverandering en biogene oorzaken daarvan, en zelfs studies naar gebruik van grondstoffen, water en bodem en effecten daarvan op het aardse systeem.

*Algemeen is dat het traditioneel sterk verschillende taalgebruik van de betrokken wetenschapsgebieden leidt tot moeizame communicatie die een soepele samenwerking in de weg staat.*

Grote ontwikkelingen waar de Commissie tevens grote doorbraken voorziet concentreren zich internationaal op de volgende terreinen:

- Het ontstaan van leven: op het gebied van het detecteren van vroeg leven en de ontwikkeling daarvan, is enorme vooruitgang geboekt (fysieke evidentie, genoomstudies, moleculaire evolutie);
- De rol van het leven (biota): reconstructies van de vroege aarde, vroege geodynamiek en ontstaan van de atmosfeer;
- Ontwikkeling en instandhouding van aardse ecosystemen: vroege en late evolutie, de rol van microbiologische processen, complexiteit en diversiteit; *ecosystem engineering* (verandering en complexer worden van ecosystemen onder invloed van evolutie van individuele populaties);
- Opbouw van biodiversiteit door de tijd heen, inclusief de moderne bedreiging van biodiversiteit door de druk van de humane populatie;
- Biogeochemische cycli, vooral in het kader van veranderend klimaat, en de rol die biota (inclusief de mens) daarin spelen;
- Leven in de diepe ondergrond en extreme milieus.

Internationaal zijn de meest betrokken vakgebieden evolutiebiologie, paleontologie, moleculaire biologie (vooral moleculaire evolutie en genoomstudies), microbiologie, (organische) geochemie en biogeochemie, en ecologie van individu- tot systeemniveau.

De toppen in het internationale biogeologische landschap concentreren zich vrijwel zonder uitzondering op onderwerpen die te maken hebben met bedreigingen van het aardse systeem. Hierbij viel en valt een concentratie aan fondsen en onderzoek waar te nemen op het terrein van Biodiversiteit (diversitas), en Klimaat en biogeochemische stromen (igbp, bijvoorbeeld het recent ontwikkelde solas). In veel mindere mate is er aandacht voor processen in het verleden, al hebben programma's zoals pages gediend om te komen tot een beter begrip van het lange termijn functioneren van het aardse systeem. De eu-kaderprogramma's en de esf-programma's reflecteren de algemene trend: stimulans om te komen tot steeds grotere concentraties van onderzoek om in multidisciplinair verband de

bedreigingen van onze aarde aan te pakken. Prominent hierbij zijn diversiteits- en klimaatonderzoek en daaraan gekoppeld oceaano- en kustonderzoek.

Opvallende afwijking van bovenbeschreven trend is het onderzoek naar het ontstaan van (buitenaards) leven; vooral in de vs is veel geld beschikbaar voor dit type onderzoek dat daar onmiskenbaar een top in het wetenschappelijke landschap vormt. Een ander wezenlijk verschil met de ontwikkelingen in de vs is de veel geringere nadruk in Nederland op de ontwikkeling van de vroege aarde en de rol van het leven daarin. Vermeldenswaard voor Nederland is de kleine maar succesvolle astrobiologische/astrochemische onderzoeksgroep in Leiden; toch kan hier niet worden gesproken van werkelijk aardwetenschappelijk of biologisch verweven biogeologisch onderzoek.

Onderzoek naar de evolutie van het leven, vooral op het vlak van de grotere invertebraten en vertebraten, is in Nederland praktisch afwezig, terwijl in bijvoorbeeld de vs en Engeland dit type onderzoek zichtbaar en mede profielbepalend is. In Nederland is fylogenetisch of biosystematisch/evolutionair onderzoek niet makkelijk gefinancierd te krijgen. In mindere mate geldt dit ook voor onderzoek naar evolutionaire processen. Hoewel Nederland op de bovengenoemde terreinen zich internationaal niet kan meten, acht de commissie dit ook niet de onderdelen van het biogeologisch spectrum waar de grootste doorbraken in de toekomst te verwachten zijn. Die doorbraken verwacht de commissie toch vooral op de terreinen waar Nederland de internationale ontwikkelingen wel volgt en soms zelfs leidend is.

Internationaal zijn er sterke tendensen waarneembaar om te komen tot integratie van biologische en aardwetenschappelijke problematiek. Vooral op het gebied van marien onderzoek is die integratie ver gevorderd, institutioneel prominent vertegenwoordigd door grote instituten in de vs (van oudsher bijvoorbeeld *Scripps Institution of Oceanography*, *Woods Hole Oceanographic Institution*), de uk (Southampton) en Duitsland (Bremen/Kiel). Deze integratie krijgt een verdere stoot door het oprichten van secties 'Biogeosciences' binnen bijvoorbeeld de *American Geophysical Union* (agu) en de Europese tegenhanger daarvan, de egu. Dat biogeologie (of geobiologie) in het centrum van de internationale belangstelling staat moge blijken uit een tweetal recente initiatieven in de uitgeverwereld van internationale wetenschappelijke tijdschriften. Zo onderneemt Elsevier op dit moment een initiatief tot een virtueel elektronisch biogeologisch tijdschrift maar ondervindt hierbij het probleem dat het veld niet overal ter wereld op dezelfde wijze is gedefinieerd en afgebakend. Blackwell heeft het plan per 2003 te starten met *Geobiology* dat alle in dit rapport vermelde terreinen alsmede de astrobiologie omvat.

Indien de beschreven situatie in Nederland afgezet wordt tegen de internationale ontwikkelingen, blijkt dat de Nederlandse ontwikkeling de internationale in redelijke mate volgt en op een enkel terrein zelfs leidend is. De Commissie baseert haar mening ten aanzien van dat laatste op de frequentie waarin Nederlandse onderzoekers publiceren in vooraanstaande tijdschriften zoals *Nature* en *Science*, en de mate waarin Nederlandse onderzoekers deelnemen aan internationale samenwerkingsprojecten en in de organisatie van internationale congressen. Daarnaast telde de mening van buitenlandse onderzoekers zwaar (zie voor lijst geraadpleegde personen bijlage 4) alsmede de uitkomst van internationale visitaties die onlangs hebben plaatsgevonden binnen de biologie, aardwetenschappen, alsook de visitaties die hebben plaats gevonden bij het Koninklijk nioz en niooknaw.

Geconstateerd kan worden (zie hoofdstuk 3.2) dat in Nederland veel onderzoek plaatsvindt op het gebied van biogeochemische stromen en biodiversiteit. In slechts enkele gevallen, vooral op het gebied van de biogeochemie, is Nederland in staat om internationaal leidend te opereren en de *mainstream* van het onderzoek te beïnvloeden. Tevens kan geconstateerd worden dat in Nederland onderzoek op het gebied van het systeem Aarde op grote tijd- en ruimteschalen, zoals in de 'Paleo'- wetenschappen, relatief krachtig ontwikkeld is en in een aantal gevallen de internationale *mainstream* leidt. Op het gebied van evolutionaire processen en ontstaan van het leven speelt Nederland, een enkele uitzondering daargelaten, internationaal een betrekkelijk geringe rol.

Opvallend is dat Nederland een grote sterkte kent op het gebied van geodynamisch onderzoek, vooral op het gebied van de fysica van de vaste aarde. De connecties naar de biogeologie, bijvoorbeeld de rol van de vaste aarde bij de ontwikkeling van vroeg leven en een vroege atmosfeer, zijn echter zwak ontwikkeld.

Meer in detail ziet het Nederlandse onderzoekslandschap op het gebied van de biogeologie er, internationaal vergeleken, als volgt uit:

- Nederland kent een goede tot soms internationaal leidende positie op het gebied van de biogeochemische cycli, vooral van kustgebieden en *wetlands*. In dit verband kent Nederland een goede positie op het gebied van de microbiologie. Nederland is internationaal leidend op het gebied van de bodemkunde, met bijvoorbeeld veel tropische expertise;
- Nederland kent een gemiddelde positie op het gebied van de functionele biodiversiteit;
- Nederland bezet een gemiddelde tot goede positie op het gebied van reconstructies van het aards verleden in de context van de paleo-oceanografie, en oceaangebonden onderzoek. Wel is de omvang van dit type onderzoek slechts een fractie van hetgeen de grote landen als de vs, Duitsland, uk en Frankrijk

genereren. In volume is het Nederlandse onderzoek niet competitief, maar daar staat tegenover dat originaliteit en kwaliteit hoog zijn;

- Nederland heeft een zeer goede en soms internationaal leidende positie op het gebied van de reconstructie van terrestrische en mariene milieus. Op beide terreinen kent Nederland onderzoekgroepen waar biologen en aardwetenschappers samenwerken, en zelfs experimenten doen, ter ontwikkeling van *proxies*. Ook op het gebied van de (organische) geochemie, zeker voor wat de ontwikkeling van *proxies* betreft, neemt Nederland een leidende positie in;
- Nederland kent een gemiddelde positie op het gebied van de evolutiebiologie;
- Hoewel Nederland een aantal bovengemiddelde en kwalitatief uitstekende groepen kent, is de samenwerking en interactie vaak matig. Dit is strijdig met een potentieel grote sterkte van Nederland: de (in tegenstelling tot landen als de vs, uk, Duitsland en Frankrijk) geringe geografische afstanden.

### 3.4. Onderwijs

Universitair onderwijs in de biogeologie *pur sang* bestaat in curriculumvorm slechts aan de uu; hier is in 2000 een nieuw interfacultair curriculum gestart dat toegankelijk is vanuit de propedeuse Biologie en de propedeuse Aardwetenschappen. Dit curriculum wordt jaarlijks door twintig tot dertig studenten gevolgd. Aan Wageningen Universiteit is een MSc opleiding *Earth System Science* gestart, die met name is gericht op de interactie tussen menselijk handelen (bijvoorbeeld via landgebruiksveranderingen) en biogeochemische kringlopen. In Nijmegen kunnen studenten na de propedeuse Biologie een keuze maken uit ecologische differentiatieblokken, die in de nabije toekomst aangevuld kunnen worden met een schakelblok Aardwetenschappen. De combinatie geeft toegang tot de Masterstudie Biogeologie aan de uu. Ook aan andere universiteiten kunnen in het kader van de Bachelor-Master structuur ongetwijfeld soortgelijke interdisciplinaire combinaties gevormd worden.

De ervaring van de afgelopen jaren geeft aan dat er onder studenten een levendige en groeiende belangstelling is voor biogeologie. Aan de andere kant moet ook geconstateerd worden dat hier vermoedelijk geen sprake is van heel grote stromen studenten, maar dat nationaal het aantal van 50 tot 100 studenten per jaar een realistische schatting is. Overigens, uit het oogpunt van arbeidsmarkt perspectief lijkt dat, zonder dat de Commissie over nadere onderbouwing beschikt, in evenwicht met de vraag.

Naast werkelijk interdisciplinaire curricula, zouden ook de reguliere opleidingen Aardwetenschappen en Biologie een grote bijdrage kunnen leveren aan het interdisciplinaire denken. Naar de mening van de Commissie dient dit in een vroeg stadium van de studie te starten. Ook in andere landen, bijvoorbeeld de vs,



is gewezen op de noodzaak om in een vroeg stadium van de studie een relatief hoog integratieniveau aan te bieden voor studenten die daarvoor belangstelling hebben. Hierbij is van belang dat studenten naast voldoende harde kennis en vaardigheden, gaan beschikken over inzicht in de zeer specifieke problemen die samenhangen met de verschillen in schaal die de biogeologie eigen is, namelijk van klein naar zeer groot. Vooral dat laatste is lastig omdat wereldwijde processen op lange tijdschalen een geheel eigen denkkader vergen dat sterk verschilt van wat in de biologie gangbaar is.

De Commissie heeft zich beperkt tot een inventarisatie in het propedeutisch jaar van de opleidingen Biologie en Aardwetenschappen; hierbij is gekeken naar de hoeveelheid onderwijs in de biologie voor studenten aardwetenschappen en algemene aardwetenschappen voor biologiestudenten. De resultaten (Tabel 2) geven aan dat de toestand verre van ideaal is. Op de faculteiten Aardwetenschappen wordt geen onderwijs in de algemene biologie (specifiek voor studenten aardwetenschappen) gegeven; omgekeerd wordt ook geen specifiek aardwetenschappelijk onderwijs gegeven aan biologiestudenten.

De verwachting bestond dat de situatie op het gebied van Evolutietheorie of Evolutiebiologie beter zou zijn; dat blijkt niet het geval. De faculteit Biologie uu steekt met 3 studiepunten Evolutiebiologie (inclusief onderwijs in Systeem Aarde totaal 4 studiepunten) relatief gunstig af, evenals de faculteit Aard- en Levenswetenschappen vu, die studenten Biologie Evolutiebiologie (zelfs 7 studiepunten) aanbiedt. Vaak echter is dit de eerste en laatste kennismaking met dit onderwerp, waarbij overigens bij de biologieopleidingen zelfs in het ruimste curriculum absoluut geen tijd bestaat om substantieel in te gaan op bijvoorbeeld de geschiedenis van het leven op aarde. Bij de faculteiten Aardwetenschappen lijkt de situatie nog somberder: aan de uu kunnen studenten kiezen uit 2 studiepunten Evolutiebiologie, iets waar ongeveer 50% van de studenten voor kiest. Daarnaast krijgen alle studenten verplicht Geschiedenis van de Aarde (2 studiepunten). Bij de vu wordt studenten Aardwetenschappen Evolutietheorie onderwezen binnen het onderdeel Paleontologie (2 studiepunten).

### **3.5. Biogeologie: beleid en ontwikkelingen in de omgeving**

De term biogeologie wordt zelden of nooit aangetroffen in beleidsnotities van niet-onderzoekinstellingen zoals nationale regeringen, lagere overheden of andere organisaties. Dat betekent echter niet dat biogeologische aspecten ontbreken in het beleid van nationale of internationale instellingen. Hier worden echter veelal termen aangetroffen als interactie tussen biosfeer en geosfeer, *Global Change*, klimaatveranderingen, biodiversiteit, functionele ecologie, duurzaamheid, mi-

Tabel 2. Overzicht biologische aspecten in basisopleidingen aardwetenschappen en aardwetenschappelijke aspecten in basisopleidingen biologie

	(omvang gehele 'cursus')
<b>Universiteit van Amsterdam (uva)</b>	
<i>Propedeuse Aardwetenschappen</i>	
Biologie in 'De Natuurwetenschappelijke Basis'	(4 studiepunten)
Biologie in 'Inleiding Ecologie'	(4 studiepunten)
Biologie in 'Landschapsanalyse'	(4 studiepunten)
<i>Propedeuse Biologie</i>	
Aardwetenschappen in 'Ecologie'	(7 studiepunten)
Aardwetenschappen in 'Experimentele Plantenwetenschappen'	(7 studiepunten)
<b>Vrije Universiteit Amsterdam (vu)</b>	
<i>Propedeuse Aardwetenschappen</i>	
Biologie in 'Encyclopedie en Algemene Vaardigheden'	(4 studiepunten)
Evolutietheorie in 'Paleontologie'	(2 studiepunten)
Biologie in 'Systeem Aarde'	(4 studiepunten)
<i>Propedeuse Biologie</i>	
Evolutietheorie in 'Evolutiebiologie'	(7 studiepunten)
Evolutietheorie in 'Ecologie'	(6 studiepunten)
Aardwetenschappen in 'Ecologie'	(6 studiepunten)
Aardwetenschappen in 'Biodiversiteit en ecologisch veldwerk'	(6 studiepunten)
<b>Rijksuniversiteit Groningen (rug)</b>	
<i>Propedeuse Biologie</i>	
Fossielen en evolutie in 'Diversiteit van Micro-organismen'	(2 studiepunten)
idem in 'Diversiteit van Dieren'	(3 studiepunten)
idem in 'Diversiteit van Planten'	(3 studiepunten)
Aardwetenschappen in 'Ecologie, evolutie en gedrag'	(6 studiepunten)
<b>Universiteit Leiden (ul)</b>	
<i>Propedeuse Biologie</i>	
Evolutietheorie in 'Evolutiebiologie'	(3 studiepunten)
Aardwetenschappen in 'Ecologie, Milieukunde'	(4 studiepunten)
<b>Katholieke Universiteit Nijmegen (kun)</b>	
<i>Propedeuse Biologie</i>	
Aardwetenschappen en Evolutietheorie in 'Geologie en Evolutie'	(2 studiepunten)
Aardwetenschappen in 'Oecologie'	(4 studiepunten)
Aardwetenschappen in 'Biosystematiek'	(2 studiepunten)
Evolutietheorie in 'Populatiegenetica'	(1 studiepunt)
<b>Universiteit Utrecht (uu)</b>	
<i>Propedeuse Aardwetenschappen</i>	
Biologie in 'Geschiedenis van de Aarde'	(2 studiepunten)
Biologie in 'Bodemkunde en Vegetatiegeografie' (keuzevak)	(2 studiepunten)
Biologie in 'Biogeochemische Cycli' (keuzevak)	(2 studiepunten)
Evolutietheorie en Biologie in 'Evolutiebiologie' (keuzevak)	(2 studiepunten)
<i>Propedeuse Biologie</i>	
Evolutietheorie in 'Biologie als Natuurwetenschap'	(1 studiepunt)
Evolutietheorie in 'Geschiedenis en Wijsbegeerte van de Biologie'	(1 studiepunt)
Evolutietheorie in 'Evolutiebiologie'	(4 studiepunten)
Aardwetenschappen in 'Ecologie'	(4 studiepunten)
<b>Wageningen Universiteit</b>	
<i>Propedeuse 'Bodem-Water-Atmosfeer'</i>	
Biologie in 'Ecologie'	(4 studiepunten)

lieukwaliteit en vergelijkbare begrippen die in belangrijke mate biogeologische aspecten omvatten. Op grond hiervan is de bewering gerechtvaardigd dat de biogeologie zich in toenemende mate mag verheugen in de belangstelling van beleidsmakers. Bij belangrijke maatschappelijke thema's zoals klimaatverandering, afnemende biodiversiteit, bodemdegradatie, die vaak als mondiale problemen worden ervaren, kan de biogeologische wetenschapper het inzicht in de problematiek verhogen en, in een aantal gevallen, oplossingen aandragen.

Geleidelijk is het inzicht doorgebroken dat samenwerking op de grensgebieden van aardwetenschappen en biologie mogelijkheden biedt om een aantal mondiale problemen aan te pakken. Deze aandacht is bijvoorbeeld te vinden bij het vakdepartement vrom getuige de voorgenomen plannen voor het Nederlands Voortgezet Programma Klimaat Onderzoek (nvko). Bij de nationale onderzoeksfinancier nwo bestaat bij het gebied Aard- en Levenswetenschappen een uitgesproken belangstelling voor het terrein en de kansen die het biedt ('De gekoppelde biosfeer').

#### Ijskernen uit Groenland

Ijskernen uit Groenland bevatten gegevens over paleo- $\text{CO}_2$ . Deze geven inzicht in de atmosferische veranderingen gedurende een glaciale en interglaciale cyclus en de invloed die deze veranderingen hebben gehad op de competitie tussen  $\text{C}_3$ - en  $\text{C}_4$ -planten. De veranderingen in de vegetatie kunnen worden afgeleid uit de  $^{13}\text{C}$ -waarden van  $\text{C}_{31-n}$ -alkanen in meersedimenten. Vanuit de geochemische gegevens kan de hoogtedistributie van  $\text{C}_3$ - en  $\text{C}_4$ -planten worden afgeleid, waarbij als sjabloon gebruik wordt gemaakt van hedendaagse grasdistributiepatronen die op floristische gegevens gebaseerd zijn. Deze informatie, gecombineerd met op pollen gebaseerde paleotemperaturen, maken het mogelijk om de atmosferische  $\text{CO}_2$ -concentraties te reconstrueren. Deze nieuwe methode voor het reconstrueren van paleo-atmosferisch  $p_{\text{CO}_2}$  is minder nauwkeurig dan metingen van ijskernen, maar kan mogelijk worden gebruikt voor sedimenten die aanzienlijk ouder zijn dan ijskernen.

Biologen zijn zich er nu van bewust dat de vegetatiegemeenschappen van vandaag de dag mogelijk niet-analoge voorgangers in het verleden hebben. Biologen hebben hun inzichten in de hedendaagse geobserveerde vegetatiegemeenschappen verbeterd. De veranderende competitie tussen  $\text{C}_3$ - en  $\text{C}_4$ -planten vertegenwoordigt ook een belangrijke bron van dynamiek binnen een geografisch stabiel ecosysteem. Het draagt bij aan de inzichten ten aanzien van de evolutionaire mechanismen in planten.

Internationale organisaties zoals icsu en unesco hebben wetenschappelijke programma's gelanceerd vanuit de wens om actueel functionerende processen te begrijpen, zoals igbp, diversitas en wcrp die zowel biologische, als geologische en systeemanalytische aspecten omvatten. Ook in het 6<sup>e</sup> eu kaderprogramma is grote aandacht voor deze aspecten. Recente grote internationale gouvernementele conferenties betreffen ook (ten dele) biogeologische thema's, zoals de biodiversiteits-top in 2001 in Den Haag en de *Earth Summit on 'Sustainability'* in augustus 2002 in Johannesburg.

In bijgaande tabel 3 treft u een indicatie aan van de belangstelling voor het biogeologieterrein, gerelateerd aan de omvang van groepen actief in het biogeologieveld en programma's waarin biogeologische thema's een (klein) onderdeel van uitmaken. Nadrukkelijk betreft het hier een indicatie: de vermelde instellingen en programma's omvatten naast biogeologisch onderzoek aanzienlijk meer biologisch en/of aardwetenschappelijk onderzoek dat niet op biogeologieterrein ligt.

Tabel 3. Indicatie van de aandacht voor biogeologisch onderzoek in Nederland

Instellingen/actoren	Aan biogeologie gerelateerd beleidsthema of programma	Indicatie aandeel biogeologie*)
ocenw	Grenslandsamenwerking met België en Duitsland	++
nwo-algemeen	Systeem Aarde	++
nwo-alw	Gekoppelde bio/geosfeer	+++
	Klimaatvariabiliteit	++
	Continent - Oceaanovergangen	+
	<i>Eurocores</i>	+
	Biodiversiteit	+
knaw-advies	<i>Global Change</i> (advisering)	+/-
vrom	Nederlands Vervolgprogramma Klimaat Onderzoek (nvok)	+
Inv	Biodiversiteit, bodemmilieu	+
v&w	Water, rivieren, kustdynamiek	++
ez	Energie, landgebruik	+
icsu	<i>Global Change</i>	+++
	igbp, ihdp, wcrp, Diversitas	
unesco, fao	Diversitas	+
wmo	wcrp	+
Ingenieursbureaus, consultants	bodem/water-sanering etc.	++

*Toelichting:*\*) indicatie omvang; deze is gerelateerd aan het geschatte aantal betrokken onderzoekers en relatief:

+/- = geringe invloed/omvang                      ++ = van belang  
 + = van enig gewicht                                      +++ = van groot belang, relatief grote omvang

## 4. De toekomst: speerpunten van onderzoek in de biogeologie

### 4.1. Keuze van speerpunten

In het voorgaande is al aangegeven dat het Nederlandse onderzoek in de biogeologie in veel opzichten de internationale ontwikkeling volgt. Daarbij valt tevens te constateren dat in een aantal segmenten prominent en zelfs leidend onderzoek wordt verricht, en dat Nederland in alle andere gevallen internationaal een goede positie kent. Uit het oogpunt van kwaliteit is er dus reden om over een breed front biogeologisch onderzoek te stimuleren dan wel te behouden. De *core-business* van biogeologisch onderzoek is de studie van het systeem Aarde op sterk variabele tijd- en ruimteschalen.

*De belangrijkste fundamenteel wetenschappelijke en maatschappelijke uitdaging aan de biogeologie wordt dan ook gesteld door het vraagstuk van de veranderende aarde. Essentieel is daarbij het verbinden van biologische kennis op kleine tijd- en ruimteschalen, en aardwetenschappelijke kennis die zich beweegt op grote tijd- en ruimteschalen.*

Daartoe is kennis van en inzicht in het aardse verleden onontbeerlijk, omdat slechts daaruit begrip valt te ontleen ten aanzien van de procesgang over lange tijden. Tegelijkertijd zijn evolutie en biogeochemische cycli essentieel om veranderende biodiversiteit over korte en lange tijdschalen te begrijpen. Functionele

biodiversiteit, op zijn beurt, vormt het brandpunt van de maatschappelijke vraag naar de effecten van veranderend klimaat en verontreiniging op lange tijdschalen. Met het bovenstaande acht de Commissie de selectie van de vier eerder gehanteerde thema's (Evolutie, Biodiversiteit, Biogeochemische cycli, en Paleomilieu en *proxies*) uit het bredere biogeologische spectrum inhoudelijk overtuigend onderbouwd. Uit het bovenstaande blijkt ook dat de Commissie het essentieel acht dat verleden, heden en toekomst van de aarde te verbinden zijn; daartoe is het instrument van modelleren onontbeerlijk. De Commissie heeft *Modellen* toegevoegd als *dwarsverband* tussen de genoemde vier thema's.

De Commissie heeft één of meer van de volgende andere criteria gehanteerd om uit deze ruime thema's nader gedefinieerde speerpunten voor nationaal biogeologisch onderzoek te selecteren:

- *Nederland neemt op het (deel)terrein een prominente of leidende positie in.* De positie van Nederland is hier weliswaar leidend maar geconcentreerde inspanning is nodig voor behoud van die leidende positie. Dit geldt voor (delen van) de thema's Paleomilieu en *proxies*, en voor Biogeochemische cycli (met name van *wetlands* en oceanen).
- *Binnen het (deel)terrein zijn belangwekkende doorbraken te verwachten.* Dit geldt onder voorwaarde van interdisciplinaire samenwerking voor alle geselecteerde deelterreinen.
- *Het geselecteerde (deel)terrein is essentieel voor begrip van de samenhang binnen de ontwikkeling van het systeem Aarde.* Dit geldt bijvoorbeeld in sterke mate voor het thema Evolutie; Biodiversiteit dient naar de mening van de commissie te worden benaderd vanuit een evolutionair perspectief.
- *De mate waarin de geselecteerde (deel)thema's door andere organisaties, bijvoorbeeld NWO-ALW, geprioriteerd zijn.* Dit geldt voor Paleomilieu's en *proxies* in mindere mate voor Biogeochemische cycli (in 'Gekoppelde bio-geosfeer') en voor Biodiversiteit (in *Biodiversity and Global Change*).
- *Het geselecteerde (deel)terrein kent een grote maatschappelijke betekenis.* Dit geldt het meest voor de thema's Biodiversiteit en Biogeochemische cycli.

#### 4.2. Evolutie

Evolutie is het dragende proces waardoor het leven op aarde reageert op veranderingen in het abiotische deel van het systeem. Omgekeerd hebben veranderingen in het leven op aarde grote consequenties voor de fysieke en chemische staat van de aarde. In het verband van de biogeologie is bijvoorbeeld *ecosystem engineering*, de verandering van systemen onder invloed van evoluerende soorten, en dus de onderlinge verhouding en selectie van soorten in veranderende ecosystemen, van

groot belang. In de moderne Evolutiebiologie wordt veel aandacht besteed aan micro-evolutie en wordt selectie vooral beschouwd in de context van statische omgevingen. Er zijn in het licht van de centrale thematiek die geschetst is in hoofdstuk 4.1. echter twee specifieke uitdagingen die bijdragen aan de vraag hoe het leven op aarde reageert in de context van *Global Change*.

- *'Diepe' fylogenie en evolutionaire ecologie*. Hierbij levert de moleculaire biologie krachtige antwoorden op de vraag op welke wijze het leven op aarde zich heeft vertakt, zelfs teruggaand naar de wortels van het leven. Echter, alleen vanuit het begrip systeem Aarde is adequaat de vraag te beantwoorden *waarom* het leven zich juist op bepaalde moment vertakt dan wel verbreidt. Deze vragen zijn en blijven essentieel uit fundamenteel oogpunt, maar ook om antwoord te kunnen geven op de centrale vraag hoe leven op aarde reageert op lange tijdschalen in de context van een veranderend systeem.
- *Veranderende ecosystemen, selectie en extinctie*. Evolutiebiologie houdt zich sterk bezig met populaties. Toch lijkt het zeker zo waardevol om het gedrag van systemen onder druk en verandering te bestuderen, en de rol van selectie in die context te plaatsen. In die zin is de verandering van functionele biodiversiteit door selectie, en de gevolgen daarvan, van groot belang.

### 4.3. Biodiversiteit

Biodiversiteit is het resultaat van samenspel tussen evolutie en de fysisch/chemische staat van het systeem Aarde. Daarbij is biodiversiteit het resultaat van een historische opeenstapeling van gebeurtenissen over lange tijden. Deze gebeurtenissen worden bepaald door startcondities, kansen en selectie. In die zin is de compositie van de biosfeer altijd uniek en nooit reproduceerbaar. Het stemt tot nadenken dat zelfs op de zeer korte tijdschaal dat de mens aanwezig is, al ernstige storing is aangebracht in de soortsaanpak van onze planeet. Veel biodiversiteitsonderzoek is ingegeven door de huidige zorg voor het uitsterven van veel soorten met daardoor weinig aandacht voor de ontwikkeling over lange tijdschalen. Dit is vanuit de centrale problematiek zoals beschreven in hoofdstuk 4.1 te betreuren. De specifieke biogeologische uitdaging onder het thema biodiversiteit kan worden samengevat in twee deelthema's:

- *Functionele diversiteit en biogeochemische cycli*. Grote doorbraken zijn te verwachten van een beter begrip van de regulering van stofstromen inclusief de kringloop van water, en de effecten daarvan voor het mondiale milieu. Belangrijk daarbij is de rol van sleutelsoorten in het stabiel houden van systemen. Hierbij is de vraag meer dan alleen de soortenrijkdom. De vraag wordt hier scherp toegesneden op de relaties tussen het functioneren van het ecosysteem en variatie in stofstromen. Daarbij is het van groot belang te bedenken

DNA-sequenties bieden de meest fundamentele beschrijving van een organisme, van structuur tot functie en interactie.

De ontwikkeling van de recombinant DNA-technologie (PCR, DNA-sequencing, DNA-fingerprinting etc.) gedurende de afgelopen twintig jaar heeft in vrijwel alle disciplines van de biologie voor revolutionaire veranderingen gezorgd. Deze technologie heeft een reeks moleculaire biologische instrumenten opgeleverd, die toegepast kunnen worden op zowel eenvoudige als zeer complexe vragen op ieder hiërarchisch niveau, van gen tot ecosysteem, en van het verre geologische verleden tot de ecologie van heden<sup>1,2</sup>. Wat misschien nog wel belangrijker is, is dat moleculaire methoden de verschillende disciplines binnen de biologie, die ver uit elkaar leken te liggen, bij elkaar heeft gebracht. De toevoeging 'bio' aan de geologie is simpelweg het laatste voorbeeld.

*Genomics*, het grootschalig onderzoeken van volledige genomen, is een zich snel ontwikkelende nieuwe discipline die antwoord zal kunnen geven op de klassieke vragen ten aanzien van de evolutie van genen, gensystemen en organismen, en op vragen over de ongrijpbaarheid van de interactie tussen genotypen en fenotypen op het niveau van populaties, gemeenschappen en ecosystemen<sup>3,4,5</sup>. Terwijl de beginwerkzaamheden zich voornamelijk richtten op modelorganismen, wordt er inmiddels gepoogd om in natuurlijke systemen te werken. *Genomics* zal daarom een cruciale plaats gaan innemen op vrijwel alle terreinen van de biologie.

De vier belangrijkste gebieden waar conventionele DNA-technologie en de nieuwe *genomics* wetenschap een bijdrage zullen leveren aan de biogeologie omvatten:

1. *Het doorgronden van de evolutie van gensystemen, organismen en hogere taxa in relatie tot paleoklimatologisch-geologische processen.* Hierbij kan van ieder hiërarchisch niveau worden uitgegaan en kan iedere periode onderzocht worden, waarin gebruik is gemaakt van gegevens uit het fossielenbestand, inclusief *proxy*gegevens voor fysieke parameters, en inclusief overgebleven moleculair-genetische informatie verkregen uit DNA-sequenties en/of volledige genomen. Hieraan is een verbinding naar omschrijvend en analytisch biodiversiteitsonderzoek gekoppeld, waarin de nadruk wordt gelegd op bepaalde groepen organismen die in functioneel opzicht een sleutelrol vervullen in bijvoorbeeld bodems, de open oceaan, kustsedimenten of bijvoorbeeld bij de biomineralisatie, dat wil zeggen coccolithophoriden en organismen die silicaten produceren. Gedacht moet worden aan onderzoek gericht op prokaryotische microbiologie, ééncellige protisten en metazoa.

2. *Doorgronden van de mechanismen achter radiatie, soortvorming en adaptatie van landschaps- tot hemisfeerniveau.* Hier wordt een directe verbinding gelegd met verschillende gebieden in de evolutionaire biologie, de paleo-ecologie en de fylogeografie, maar dan wel met een geologisch tintje. Voorbeelden van zeer succesvolle gecombineerde bio-geobenaderingen zijn: het doorgronden van de radiatie en adaptatie van soorten binnen eilandengroepen, zoals de Hawaii-eilanden of de Canarische Eilanden;



de reconstructie en modellering van de dynamiek van de herkoloniatiegolf in Noord-Europa na het laatste glaciële maximum<sup>6,7,8</sup>; en een nieuw, door de US-NSF opgericht, internationaal netwerk voor het onderzoeken van de biotische herkolonisatieprocessen aan beide kanten van de Atlantische Oceaan<sup>9</sup>. Deze samenwerkingsverbanden omvatten paleoklimatologen, vulkanologen, genetici (voorzover zij zich richten op moleculaire populaties), ecologen, systematici en modellers.

3. *Onttrafelen van complexe patronen en oorzaken van genexpressie in het milieu.*

a. *Environmental genomics*. Het ambitieuze doel van de functionele ‘omgevingsgenomics’ is erop gericht om ‘functies’ zowel te doorgronden als te voorspellen onder invloed van verschillende milieufactoren; en om inzicht te krijgen in de evolutionaire mechanismen die voor deze genomische variatie zorgen en deze onderhouden. Het is nu mogelijk om de respons van organismen door middel van complexe genexpressiepatronen te koppelen aan omgevingsstimuli (bijvoorbeeld door middel van *microarrays*). Hoewel functionele genomics nog steeds sterk in verband wordt gebracht met diagnostiek en menselijke ziekten, breiden de toepassingen zich snel uit naar andere organismen waarvan op zijn minst een rest aan geninformatie beschikbaar is (het genoom zelf, de EST-banken). Om inzicht te krijgen in het functionele belang van genomische variatie in natuurlijke biologische gemeenschappen, is het nodig ecologie, genetica, evolutionaire biologie en biogeochemie en fysiologie te integreren.

b. *Metagenomics* is een andere variant waarbij het ecosysteem of de gemeenschap als een eenheid beschouwd wordt, om de ‘genexpressie van de gemeenschap’ te kunnen onderzoeken. Deze aanpak is vooral van belang voor microbiële ecologen. Hierdoor is het mogelijk om zeer diverse processen als voedselketens en milieuselectie tegen bijvoorbeeld een zout milieu, belasting met schadelijke stoffen etc. te onderzoeken.

c. *Comparative genomics* zal een belangrijke rol gaan spelen bij het onderzoeken van historische evolutie en de evolutie van gensystemen. Een belangrijk doel van het onderzoek op het gebied van *comparative genomics* is de vaststelling van de verschillen tussen genomen van soorten en het scheppen van een basis voor een beslissing of de ‘overeenkomstigheid’ van DNA-sequenties gelijk kan worden gesteld met ‘homologie’, wat een cruciaal gegeven is voor het toekennen van een functie. Een van de verrassingen die het maken van genoomsequenties tot nu toe heeft opgeleverd, is het hoge gehalte aan genen in elke nieuwe soort die niet kunnen worden herkend op basis van de kennis over andere genomen. Dit element van ontdekking mag niet worden onderschat. Een aantal organismen dat niet tot de modelgroep behoort, komt in aanmerking voor genoomsequentie, aangezien ze een sleutelrol vervullen in het functioneren van ecosystemen, bijvoorbeeld eukaryotisch plankton in de oceanen, biomineralisatoren, zoals coccolithophoriden, bodembacteriën, of organismen die om redenen van ontwikkeling of evolutie een beslissende plaats innemen in de levensboom, bijvoorbeeld ééncelligen en lagere ongewervelden. *Comparative genomics* zullen direct aansluiten bij de paleontologie en evolutie en indirect aan de biogeochemie en de genexpressie.

4. *Ontwikkeling van identificatie- en detectiesondes gebaseerd op nucleïnezuur* voor specifieke groepen organismen en/of *proxies*, die kunnen worden gebruikt om geochemische processen, algenbloei en ruimte- en tijdschaalproblemen bij het onderzoek aan bodem-/sedimentbacteriën op te sporen. Dit is een zeer actief gebied binnen de microbiële ecologie en de biologische oceanografie. Tot op heden wordt meestal gebruik gemaakt van ribosomale DNA-*probes*. Ribosomaal DNA wordt nu nog het meest gebruikte materiaal voor *probes*. Dit zal veranderen wanneer meer geschikte genoomdelen worden ontdekt. *Probes* kunnen worden ingezet bij het onderzoek naar de achtergronden van algenbloei, naar de functie van ecosystemen in relatie tot soortsaanstelling, naar onderlinge competitie en naar structuur van gemeenschappen in het algemeen.

#### Noten

- 1 Baker, A.J., *Molecular Methods in Ecology*, Blackwell, 2000.
- 2 Graur, D. en Li, W.H., *Fundamentals of Molecular Evolution*, Sinauer Association, Sunderland, MA, 1999.
- 3 *Genomics. What is Evolutionary and Ecological Functional Genomics*: <http://pondside.uchicago.edu/feder/EEFG>
- 4 Gibson, G., *Microarrays in ecology and evolution: a preview*, in: *Molecular Ecology* 11, 2002, pp. 17-25.
- 5 Hamadeh, J. en Afshari, C.A., *Gene chips and functional genomics*, in: *American Scientist* 88, 2000, pp. 508-515.
- 6 Hewitt, G.M., *Some genetic consequences of ice ages, and their role in divergence and speciation*, in: *Biological Journal of J. Linn. Society* 58, 1996, pp. 247-276.
- 7 Hewitt, G.M., *The genetic legacy of the Quaternary ice ages*, in: *Nature* 405, 2000, pp. 907-913.
- 8 Ibrahim, K.M., Nichols, R.A. en Hewitt, G.M., *Spatial patterns of genetic variation generated by different forms of dispersal during range expansion*, in: *Heredity* 77, 1996, pp. 282-291.
- 9 Cunningham, C. (Coordinator, Duke University, USA), *The North Atlantic Project: Historical Ecology of the trans-Atlantic Marine Biota* (US-NSF Research Coordination Network 2002-2007).

dat in deze relatie complexe positieve en negatieve terugkoppelingen zijn; in die zin is winst te behalen indien biogeochemici en (micro)biologen samenwerken.

- *Biodiversiteit op tijdschalen van langer dan 10 jaar.* Meer dan tot nu toe zou onderzoek geconcentreerd dienen te worden op functionaliteit van de paleosystemen, met andere woorden, de vraag of er momenten zijn aan te wijzen waarbij het uitvallen van indexsoorten leidt tot een scherpe verandering of zelfs een *crash* van het systeem. Binnen de aardwetenschappen wordt slechts in geringe mate gewerkt aan vraagstellingen rond biodiversiteit. Toch is ook hier grote winst te behalen. Met behulp van de steeds gedetailleerdere reconstructies van het milieu (via analyse van hoge-resolutie tijdseries), is nauwkeurig inzicht te verwerven in de dynamiek van systemen over langere (> decaden) tijdschalen. De simpele maar fundamentele vraag 'leidt vermindering van diversiteit tot instabiliteit van het systeem', zou indringend door paleontologen en paleoecologen aangepakt moeten worden.

#### 4.4. Biogeochemische cycli

Centraal in de context van een veranderende aarde is de chemische staat van het systeem, en de vraag of veranderingen in stofstromen uiteindelijk schadelijke gevolgen zullen hebben voor de biosfeer. In die zin is een belangrijk deel van de rationale van dit thema, en de te verwachten doorbraken, al gegeven in het vorige deelhoofdstuk. Specifiek echter is de vraag die in het verlengde hiervan ligt: zijn we in staat tijd- en ruimteschalen zodanig te begrijpen dat veranderingen in het hele systeem over lange tijden en grote ruimten inzichtelijk worden? De grootste doorbraak hierbij is te verwachten uit samenwerking van microbiologen, ecologen, (eco)fysiologen, hydrologen en geochemici. Deze samenwerking is al ver gaand op gang, maar voor het verkrijgen van werkelijke doorbraken is intensievere samenwerking gewenst op de volgende terreinen:

- *Bestudering van die kringlopen die belangrijk zijn voor het klimaat, in het bijzonder die delen van de stofstromen die gereguleerd worden door biota.* Bestudering van, bijvoorbeeld, de kringlopen van koolstof (onder andere methaan en CO<sub>2</sub>), stikstof (stikstofoxiden) en zwavel (zwaveloxiden), alsmede de hydrologische kringlopen, staat hierbij centraal.
- Functionele biodiversiteit. (Zie hoofdstuk 4.3.)

#### 4.5. Paleomilieu reconstructies en *proxies*

Een grondige kennis van de veranderingen die het systeem Aarde in het verleden heeft ondergaan kan bijdragen aan een beter begrip van wat *Global Ecology* ge-

noemd kan worden. Hierbij speelt de centrale vraag hoe het leven reageert onder veranderende omstandigheden. Gedetailleerde reconstructies zijn daarbij essentieel, in het bijzonder van situaties die ook voor de komende eeuwen voorzien worden en waarmee de maatschappij te maken krijgt. Kernpunten van de reconstructies zijn hoge resolutie, dat wil zeggen een nauwkeurig beeld van het procesverloop versus de tijd, en adequate middelen om te komen tot kwantitatieve reconstructies. Hierbij zijn de volgende deelthema's van belang:

- *Biologische validatie van proxies*. Ontwikkeling van *proxies* is essentieel voor het bewerkstelligen van doorbraken die kunnen leiden tot een goed begrip van het mondiale systeem over lange tijdschalen. Veel middelen om te komen tot reconstructies liggen opgeslagen in het geologisch archief, verborgen in de resten van de organismen. Dit betreft bijvoorbeeld isotopen, sporenelementen, moleculen en de functionele morfologie van het fossiel. Vaak betreft het het fossiele materiaal carbonaat, maar ook organisch materiaal is een bron van informatie. In talrijke gevallen zijn dergelijke *proxies* matig bekend en afhankelijk van biologische processen die slecht begrepen worden.
- *Reconstructie van essentiële perioden*. *Rapid (climate) Change* en de gevolgen daarvan voor biota, biomassa, soortensamenstelling en ecosysteemstructuur, zijn vragen die alleen in samenhang aangepakt kunnen worden maar dan ook kunnen leiden tot fundamentele doorbraken. In Nederland is veel expertise aanwezig op het gebied de paleo-ecologie, waarmee in samenhang met kennis uit de systeemecologie kan worden bijdragen aan het vraagstuk hoe biota reageren onder snelle veranderingen.

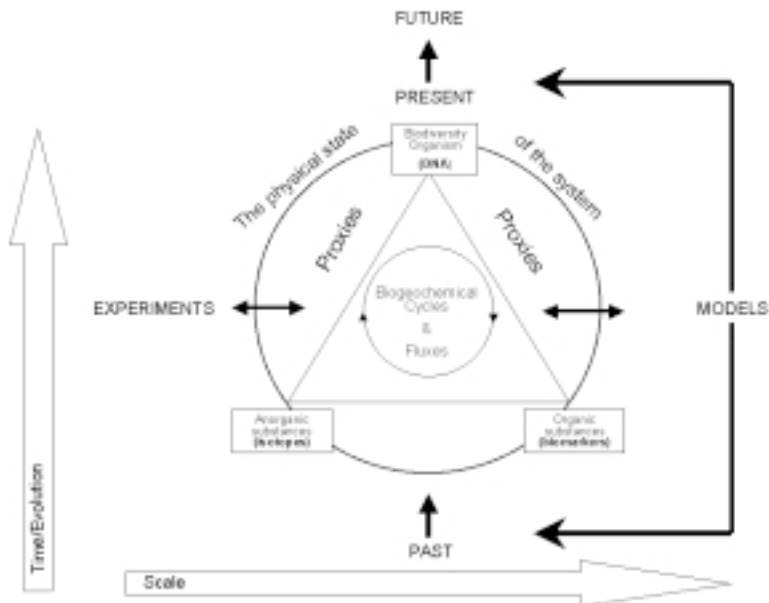
#### 4.6. Modellen, opschaling en complexiteit

Naast de vier genoemde thema's hecht de vcbg grote waarde aan de ontwikkeling van modellen, die te beschouwen zijn als belangrijk gereedschap bij het onderzoek en die terugkomen bij alle vier genoemde thema's als 'dwarsverband' (zie Figuur 3). Immers, één van de belangrijkste vragen op het gebied van de biogeologie ligt op het terrein van het verbinden van ruimte- en tijdschalen. Essentieel voor het verkrijgen van krachtige antwoorden op de vragen die vanuit de maatschappij gesteld worden, bijvoorbeeld naar het aanzien van de aarde over 1000 jaar, of naar de effecten van de dalende diversiteit van eukaryoten over 100 jaar, is het kunnen opschalen van kleine naar grote ruimtelijke schalen, maar meer nog van korte naar lange tijdschalen. Daarbij ontstaan tal van problemen: processen die op de korte tijdschalen van belang zijn, vallen weg op lange tijdschalen. Non-lineair gedrag van systemen wordt vooral zichtbaar op langere tijdschalen. Modellen spelen hierbij een sleutelrol omdat ze behulpzaam zijn bij het inzichtelijk maken hoe een ingewikkeld systeem functioneert. Het laten variëren van geselec-

teerde *proxies* geeft inzicht hoe gevoelig het systeem reageert en kan leiden tot verbetering van het model en het formuleren van betere vragen.

De Commissie constateert dat het biogeologisch onderzoek hier een achterstand heeft vergeleken met disciplines als de klimatologie of oceanografie. Toch is voor vooral de biogeochemie en in mindere mate de paleo-ecologie het modelleren van ecosysteem-respons van toenemende betekenis. Vegetatiemodellen kunnen bijvoorbeeld worden gebruikt als instrument om te exploreren in welke combinaties afzonderlijke milieuv variabelen tot bepaalde vegetatietypen leiden. Daartoe worden schattingen van *proxies* voor perioden uit het verleden als *input* gebruikt in een vegetatiemodel, dat vervolgens in omgekeerde richting wordt gebruikt om de gereconstrueerde vegetatie als *output* te verkrijgen (*inverse modelling*).

De Commissie acht modelleren een essentieel onderdeel, dat weliswaar in eerste instantie theoretisch is, maar op de lange termijn kan leiden tot doorbraken. Als eerste lijken biogeochemische modellen vruchtbaar te kunnen bijdragen aan de thema's die eerder zijn genoemd. Gezien de kracht van Nederland op het gebied van de theoretische biologie, zou samenwerking tussen paleo-ecologen, systeemecologen, en theoretisch biologen gestimuleerd moeten worden.



*Figuur 3. Het spectrum van de biogeologie: organismen, en dus biodiversiteit, worden in stand gehouden door de voortdurende stroom van organische en anorganische componenten. Op 'moleculair' niveau worden die drie eenheden gekenmerkt door DNA, biomarkers en isotopen. Proxies zijn een maat voor aard en omvang van die stromen; ze worden gebruikt om de procesgang in het verleden te reconstrueren. Op die wijze kan de invloed van verandering (veroorzaakt door evolutie) op een systeem door de tijd heen gereconstrueerd worden. Hierbij is kenmerkend voor de biogeologie dat zeer grote schaalverschillen (van kleinschalige experimenten tot het systeem Aarde) aan de orde zijn.*

*Relatie tot de biologie en de geologie*

Microbiële ecologie heeft zich als subdiscipline van de algemene microbiologie altijd bewogen op het snijvlak van de biologie en de chemie. Doordat soorten micro-organismen moeilijk herkend konden worden op grond van hun morfologie, werd het onderzoeken van hun gedrag in hun natuurlijke omgeving ernstig belemmerd. Als gevolg daarvan bleef microbiële ecologie beperkt tot het bestuderen van geïsoleerde culturen in laboratoriummodelsystemen. De micro-organismen konden weliswaar niet in hun natuurlijke omgeving worden bestudeerd, maar de gevolgen van hun gedrag, omzetting van anorganische en organische componenten, konden worden onderzocht door middel van chemische analyses, met of zonder de aanwezigheid van specifieke inhibitoren.

Uit deze laboratorium- en veldstudies is gebleken dat micro-organismen een sleutelrol vervullen in alle biogeochemische elementencycli en dat ze verantwoordelijk zijn voor een groot aantal geologische fenomenen, zoals blijkt uit de vorming van stromatolieten door cyanobacteriën en het ontstaan van zwavelafzettingen door zwavelbacteriën.

*Invloed*

Het werkterrein van de microbiële ecologie is zeer recent gewijzigd dankzij de introductie van de moleculaire biologie. Voor het eerst kon de rijkdom van de microbiële diversiteit worden vastgesteld door analyse van natuurlijk voorkomend DNA. Men kreeg toegang tot nieuwe groepen organismen die behoren tot het rijk van de bacteriën en de *archaea*. Door DNA-sequenties van materiaal uit de natuurlijke omgeving te vergelijken met reeksen van zuivere culturen die gebruikt worden in laboratoriumexperimenten, kon worden vastgesteld dat er grote verschillen bestonden, die kennelijk terug te voeren waren op vertekeningen als gevolg van de-isolatieprocedures. Ondanks deze vertekening is echter uit laboratoriumonderzoek gebleken dat er sprake is van een groot aantal gedragspatronen van micro-organismen in relatie tot hun omgeving. Micro-organismen blijken een sleutelfactor tussen de biologie en de geologie te zijn.

*Voorbeelden*

Door de toepassing van moleculaire technieken, onder andere gentechnologie (*genomics*) en *proteomics*, kan de rol van micro-organismen in een natuurlijke omgeving verder worden ontrafeld, ook vanuit het perspectief van biogeochemische cycli. Op dit moment is reeds van verschillende belangrijke soorten micro-organismen het complete genoom ontrafeld waaronder dat van de ammonium-oxiderende *Nitrosomonas europaea*, de methanogene *Methanospirillum magnetotacticum* en de cyanobacterie *Synechococcus*. Uit een clusteranalyse van DNA-sequenties die gebaseerd zijn op het 16S rRNA-gen is gebleken dat er grote aantallen micro-organismen uit mariene en zoetwateromgevingen bestaan die weliswaar slechts een geringe verwantschap

met elkaar hebben, maar die vermoedelijk dezelfde rol spelen in de omzetting van bepaalde elementen. Naast moleculaire methoden blijkt ook het gebruik van stabiele isotopen een nuttige methode om biogeochemische processen te analyseren, zoals de anaërobe oxidatie van methaan en het lot van koolstof in voedselketens.

#### *Toekomstige ontwikkelingen*

De toepassing van moleculaire instrumenten is binnen de microbiële ecologie nog maar net van start gegaan. Er zullen in de toekomst andere belangrijke groepen van micro-organismen aan het licht worden gebracht. Microbiële ecologie dient echter verder te gaan dan alleen de vaststelling van de structuren van gemeenschappen. Ook de activiteiten van micro-organismen in relatie tot hun biotische en abiotische omgeving, of veranderingen daarin, dienen te worden bepaald. Dit kan bijvoorbeeld door de toepassing van RNA-methodieken of de analyse van stabiele isotopen. Desondanks zal fysiologisch onderzoek in modelsystemen nodig blijven, om de fysieke en chemische grenzen van het functioneren van de belangrijke soorten te kunnen vaststellen. Moleculaire technieken moeten worden toegepast om met zekerheid te kunnen vaststellen dat de recent geïsoleerde belangrijke soorten daadwerkelijk de organismen zijn die de grootste betekenis hebben binnen de natuurlijke omgeving. Wanneer de microbiële ecologie verder wil gaan dan het heden en wil kunnen voorspellen hoe micro-organismen zich in de toekomst zullen gedragen wanneer zij deel uitmaken van bepaalde cycli van elementen, is het nodig om de structuur van microbiële gemeenschappen op basis van geologische tijdschalen te onderzoeken. De bijdrage van de organische geochemie, met zijn expertise op het gebied van oude microbiële celonderdelen, zal onmisbaar zijn bij het verkrijgen van een beter inzicht in de structuur en het functioneren van vroegere microbiële gemeenschappen.

Micro-organismen zijn grotendeels verantwoordelijk voor het ontstaan van de aarde zoals hij nu is. Het begon met de activiteiten van de zuurstofproducerende cyanobacteriën, die de ontwikkeling van allerlei aërobe organismen op aarde mogelijk maakten. Door hun grote diversiteit ten aanzien van biogeochemische conversies, soms nog slechts beperkt tot onzichtbare plaatsen, zoals de 'black smokers' op de bodem van de oceaan, en door hun grote mutatiefrequentie, zullen micro-organismen de grote toekomstige veranderingen in het aardse milieu overleven en zullen zij zorgen voor een andere leefomgeving. Om die reden is het van belang om meer kennis op te doen over de ecologie van micro-organismen in het verleden en in het heden.

#### *Obstakels*

Microbiële ecologie wordt sterk gestimuleerd door de ontwikkeling van nieuwe moleculaire instrumenten. De ontwikkeling van de discipline wordt echter sterk beperkt door de financiële middelen die er voor het toepassen van deze dure apparatuur beschikbaar zijn. Bovendien bestaat er een lacune in de opleiding van microbiële ecologen, zodat niet volop op de uitdagingen van het vakgebied kan worden ingegaan. Op dit moment is het bijzonder moeilijk bestaande vacatures in te vullen.

In de biogeologie is het doorgronden van het organisme niet het eerste doel. Hier ligt de kernvraag op een hoger organisatorisch plan. Biogeologen proberen de processen/interacties te begrijpen die tussen organismen en hun abiotische omgeving hebben plaatsgevonden of nog plaatsvinden. Een duidelijk voorbeeld hiervan is het onderzoek naar biogeochemische cycli en nutriëntencycli.

Waarom is planten(eco)fysiologie als discipline van belang voor de biogeologie?

- Door middel van plantenfysiologie kunnen *proxy*waarden worden vastgesteld. Een goed voorbeeld daarvan is de stomatadichtheid als indicator van klimatologische omstandigheden. Het uitvoeren van fundamenteel fysiologisch onderzoek is nodig om de regulering van deze *proxies* te kunnen begrijpen. Om fysiologische vragen te kunnen beantwoorden, moeten we de instrumenten van de biochemie, moleculaire biologie en de genetica gebruiken. Het onderzoek wordt grotendeels uitgevoerd met behulp van modelorganismen zoals *Arabidopsis* en rijst. Deze planten hebben als voordeel dat hun genoom bekend is en dat er transformatieprotocollen en mutanten beschikbaar zijn. Het is echter ook belangrijk om deze modelsystemen te vergelijken met andere plantensoorten.
- De ontwikkeling van bodems hangt sterk af van de daar aanwezige vegetatie en de activiteit van deze vegetatie. Wortels kunnen van invloed zijn op de beschikbaarheid van voedingsstoffen. Het is bekend dat de afscheidingen van wortels bodemdeeltjes doen oplossen, waardoor deze door de planten kunnen worden opgenomen. Anderzijds beschermen wortels tegen erosie en maken ze sedimentatie mogelijk. Daarmee vervullen ze een sleutelrol in de ontwikkeling van bodems en landschappen.
- Fysiologie is een essentieel intermediair, wanneer men in het kader van een biogeologische onderzoeksvraag van moleculaire processen op genniveau wil overschakelen naar het niveau van ecosystemen.
- Geologische methoden kunnen onze inzichten op het gebied van plantenfysiologische processen verbeteren. De koolstofisotopensamenstelling van fossielen verbeterde onze kennis over de evolutie van fotosynthetische processen.



## 5. Kennisinstructuur

### 5.1. Onderzoek

Zoals uit de eerdere opsomming blijkt, is de kennis binnen Nederland versnipperd en aanwezig bij een groot aantal instellingen van onderwijs en onderzoek. Op zichzelf is deze diversiteit goed omdat het een brede ontwikkeling van de biogeologie waarborgt, inclusief het regelmatig vernieuwen via kleine onderzoekskernen. In die zin is er ook geen enkele aanleiding om nadere maatregelen aan te bevelen om te komen tot concentratie. Zeker in het licht van de recente hausse in onderzoeksinstituten, onderzoekscholen, centra, *centers of excellence*, en onlangs de initiatieven vanuit de eu om te komen tot Europese netwerken, is nadere regulatie via bureaucratische structuren hoogst ongewenst. Dit brengt een papierwinkel met zich mee zonder dat noodzakelijk sprake is van meerwaarde voor het onderzoek.

Meerwaarde is wel te verkrijgen door samenwerking die leidt tot verdiepend inzicht en grensverleggend onderzoek. Met andere woorden, ter bevordering van samenwerking is er behoefte aan een (kennis)instructuur zonder rompslomp, die niet *gratis* is, maar die tegelijkertijd meer is dan de som der delen.

Naast de meerwaarde van samenwerking is de zichtbaarheid van een kennisinstructuur een belangrijk voordeel. In het verkeer van geldstromen van geldgevers naar onderzoekers, blijkt bundeling te fungeren als het uithangbord dat

sturend optreedt. Bij nadere analyse blijkt dit in veel gevallen ook de rationale van samenwerkingsverbanden. De biogeologie kan zich daarom alleen maar sterk ontwikkelen als er sprake is van zichtbare bundeling. In het onderstaande volgt een visie die stimulerend is voor interdisciplinaire samenwerking, maar toch tegemoet komt aan de noodzaak van zichtbaarheid, die tevens recht tracht te doen aan de wens tot vermijden van onnodige en holle bureaucratische structuren. Op basis van die overwegingen stelt de vcbg in het navolgende voor te komen tot een **Darwin Centrum voor Biogeologie**.

Naar de mening van de Commissie moet bundeling van biogeologisch onderzoek voldoen aan een aantal voorwaarden:

- De bij de bundeling betrokken groepen dienen werkzaam te zijn op het gebied van de door de Commissie geselecteerde thema's waarbij het streven moet zijn om de vier thema's in samenhang te bestuderen;
- De bundeling moet grote Europese slagkracht bezitten en bij voorkeur complementair zijn aan bestaande (Europese) centra;
- In het licht van het voorgaande kan de bundeling alleen succesvol zijn indien het excellente groepen betreft;
- Het behoeft niet noodzakelijk een fysieke bundeling te betreffen, maar kan een virtueel netwerk betreffen in lijn met de poly-centra *Eurocore* netwerken;
- Zo mogelijk dient er gebruik gemaakt te worden van bestaande structuren.

Europees gezien valt op dat een werkelijk interdisciplinair samengestelde biogeologische concentratie niet bestaat. Dit is anders in de vs, waar een aantal grote instellingen (*University of California, Scripps Institute of Oceanography, Wood's Hole Oceanographic Institution, Yale en Harvard*) streven naar groepering van onderzoekers werkzaam op de terreinen die ook door deze Commissie als centraal zijn aangemerkt. Toch zijn er in Europa enige initiatieven die van belang zijn. Op het terrein van de mariene wetenschappen is er sprake van een grote concentratie in Noordwest-Duitsland (Bremen). Een samenwerkingsverband met deze concentratie van de Koninklijk nioz en de nsg (vu/uu) is gericht op *proxies*, hiervoor hebben nwo, in zeer bescheiden mate, en de dfg, in forse mate, bedragen beschikbaar respectievelijk in het vooruitzicht gesteld voor de periode 2001-2004. De thematiek van deze bundeling is echter aardwetenschappelijk van kleur. Eveneens op aardwetenschappelijk terrein is sprake van een aantal initiatieven in het kader van *Eurocore*, waarvan *Euromotion* het meest omvangrijke lijkt. Hier wordt getracht aardwetenschappelijke expertise op het gebied van relatieve zeespiegel- en korstbewegingen over langere tijdschalen te verbinden met kennis van mariene en terrestrische biota. Ongetwijfeld zijn of komen er ook van biologische kant initiatieven die bundeling beogen. Maar alles overziende is er nationaal en Europees een leemte op het gebied van werkelijk geïntegreerd en thematisch

afgewogen biogeologisch onderzoek. De Commissie is van mening dat Nederland zich in dit opzicht strategisch kan positioneren en Europees leidend kan worden op dit terrein mits er voldaan wordt aan het criterium van slagkracht. Dat betekent, het zij herhaald, dat een bundeling onvermijdelijk is en dat die moet bestaan uit topgroepen die bereid zijn om te streven naar een geleidelijke integratie van hun onderzoeksprogramma's langs de lijnen van de door de Commissie aanbevolen thema's. Aan het slot van dit hoofdstuk zal dit nader worden uitgewerkt.

Nationaal bestaat er op het gebied van biogeochemische cycli enige clustering; er zijn sterke banden tussen nioo-knaw en de kun (met name Aquatische Ecologie), die hebben geleid tot het vormen van het *Centre of Wetland Ecology* (cwe). Ook tussen de uu en het nioo-ceme-knaw, en de uu en het Koninklijk nioz, zijn op dit terrein nauwe banden, terwijl er ook groeiende banden zijn tussen de uu en het nioo-cl-knaw. De groepen die hier samenwerken zijn grotendeels als excellent beoordeeld; in het geval van de groep Aquatische Ecologie van de kun is sprake van een zeer goede beoordeling (alle categorieën goed) in het kader van een breder samengestelde groep Ecologie. De erkenning van de kwaliteit moge blijken uit het feit dat nwo binnen dit onderzoek twee pionier subsidies beschikbaar heeft gesteld.

In Utrecht bestaat een grote groep onderzoekers binnen de faculteiten Aardwetenschappen en Biologie die samenwerken in de context van biogeologie. Dit is ook de groep die het curriculum biogeologie aan de uu draagt. Onlangs is tussen de uu/biogeologie en nitg een samenwerkingsverband gestart waarin alle fundamentele en toepassinggerichte activiteiten op het gebied van de biogeologie zijn ondergebracht. Er zijn plannen om de samenwerking met het Koninklijk nioz en de vu verder te intensiveren. Ook binnen deze cluster van voornamelijk Paleomilieureconstructies – en *prox*onderzoek heeft nwo twee pionier programma's en voorts twee vidi of Vernieuwingsimpuls programma's gesubsidieerd.

Daarnaast zijn er nationaal in de vsnu visitatiecategorieën zeer goed tot excellent, een beperkt aantal groepen die zich bezig houden met aan biogeologie gerelateerde problematiek (Amsterdam: Paleo-ecologie/Palynologie; Wageningen: Bodemkunde, Landschapsecologie).

Plaatsen we de (beginnende) clustering tegen het onderzoekslandschap dan blijkt dat van de bovengenoemde groepen veel behoren tot de categorie excellent en een (beperkter) aantal tot de categorie goed (zie voor details ook hoofdstuk 3). In de ogen van de Commissie vallen hiermee organisatorische kaders grotendeels samen met het criterium excellent en kan bundeling van deze groepen gemakkelijk en gefaseerd leiden tot een topinstituut voor biogeologie. De Commissie stelt voor deze (virtuele en nadrukkelijk niet fysiek bedoelde) bundeling te benoemen

als het **Darwin Centrum voor Biogeologie**. Een alternatieve naam is Baas Beeking Centrum voor Biogeologie, genoemd naar de vooraanstaande Nederlandse bioloog die ook in het buitenland midden vorige eeuw faam verwierf door zijn voor die tijd opzienbarende geïntegreerde wijze van denken. Vooralsnog geeft de Commissie echter de voorkeur aan de naam van Darwin Centrum. Met laatstgenoemde wordt Darwin geëerd, als bij uitstek breed ontwikkeld naturalist met kennis van en inzicht in processen op het grensvlak van Aard- en Levenswetenschappen. Indien de omvang van de aangegeven zeer goede en excellente groepen wordt opgeteld, is hier sprake van een totale bundeling van ongeveer 50 fte vaste staf en naar schatting 120 promovendi en postdocs. De grootste aantallen fte zijn betrokken bij Biogeochemische cycli (ongeveer 23 fte) en bij Paleomilieu reconstructies en *proxies* (ongeveer 16 fte). Om een serieuze start van dit initiatief mogelijk te maken is een startbudget essentieel, omdat zonder eigen budget een centrum als het onderhavige ten dode gedoemd is. De Commissie acht als indicatie een betrekkelijk substantieel budget wenselijk (in omvang vergelijkbaar met 20 PhD posities). Deze middelen kunnen zowel van nwo/alw als – via *matching* – van de betrokken onderzoeksinstellingen en faculteiten afkomstig zijn. De Commissie voorziet de volgende fasen:

*Fase 1 (2002-2003)*: In deze eerste fase wordt gedurende één jaar aan het netwerk gebouwd via het organiseren van workshops of plenaire bijeenkomsten, waarbij de absolute voorwaarde voor het ontvangen van financiële steun is dat deze bijeenkomsten interdisciplinair van karakter zijn. Per bijeenkomst zou geld beschikbaar moeten komen via nwo-alw en de knaw. In deze fase dient het kennisnetwerk ook in hoge mate om de geldstromen te organiseren, bijvoorbeeld als gesprekspartner van alw bij het verder inrichten van het thema's als 'de Gekoppelde bio-geosfeer', 'Biodiversiteit en *Global Change*', en 'Water'.

*Fase 2 (2003-2007)*: In de tweede fase dient het netwerk verder gestalte te krijgen door het aangaan van onderling bindende afspraken gelijkend op het alw-instrument van *partnerships*. Hierbij verbinden de partners zich tot samenwerking langs de lijnen van het te maken onderzoeksplan. Op basis hiervan kan ook getracht worden grotere subsidies te verwerven zoals de nwo-subsidiecentrum.

Het Darwin Centrum voor Biogeologie beoogt een bundeling van toponderzoek te worden in structuur en positie vergelijkbaar met ises (de aardwetenschappelijke toponderzoekschool), namelijk interdisciplinair werkzaam tussen de onderzoekscholen en nadrukkelijk niet als vervanging daarvoor. De Commissie ziet dit als een middel om te ontkomen aan het feit dat de grenzen van de onderzoekscholen in de praktijk toch enigszins verstarrend werken en interdisciplinaire samenwerking op het onderzoekerterrein tussen scholen niet vergemakkelijken.

Evenals ises heeft het Darwin Centrum voor Biogeologie samenwerking van de deelnemende groepen op het terrein van fundamenteel onderzoek als doel, als ook verkrijging/coördinatie van de benodigde (vaak zeer kostbare) infrastructuur. Tevens kan vanuit dit samenwerkingsverband stimulans en coördinatie uitgaan voor het initiëren van multidisciplinaire aanvragen bij geldgevers zoals dat bij neesdi (NEtherlands EarthSystem Dynamics Initiative) is gebeurd. Hierbij zou financiering niet beperkt hoeven te komen uit een alw-thema, maar kunnen meerdere thema's aangeboord worden om dit brede programma te realiseren. alw heeft in een eerder stadium besloten om in de uitvoering van het thema 'de Gekoppelde bio-geosfeer' het subthema 'Paleomileu-reconstructies en *proxies*' voorrang te geven. Daarnaast is ook het thema 'Biodiversiteit' al van start gegaan.

*Fase 3 (2005-2010):* Op basis van de opgedane ervaringen dient een herijking plaats te vinden van de thema's van onderzoek zoals in dit rapport beschreven. Het is niet onwaarschijnlijk dat op basis van de ervaringen, en in vergelijking tot de internationale ontwikkeling, bijstelling noodzakelijk is.

Gezien de bestaande verhoudingen ligt het voor de hand om een zo open mogelijke structuur te hanteren, waarbij iedere instelling vertegenwoordigd is met één vertegenwoordiger, en waarbij één instelling als penvoerder optreedt. Naast middelen voor bijeenkomsten, zouden ook daar (beperkte) financiële middelen voor beschikbaar moeten komen. Gezien de reeds bestaande netwerken ligt het voor de hand dat het penvoerderschap ligt bij de uu.

## 5.2. Onderwijs

Onderwijs bestaat bij gratie van voldoende studentenaanbod; in het kader van biogeologie is dit, in vergelijking met de grote studentenstromen, gering. In Utrecht is de enige opleiding biogeologie, waarvoor zich jaarlijks twintig tot dertig studenten aanmelden. In Wageningen bestaat een verwante MSc-opleiding. Zoals eerder opgemerkt: op de andere universiteiten is er via een combinatie van vakken, zeker in het kader van de vrije keuze die de Bachelor-Master structuur biedt, een biogeologisch gekleurd Bachelor-pakket ongetwijfeld samen te stellen.

Toch is het van groot belang dat studentenstromen niet versplinterd worden, maar dat universiteiten zo goed mogelijk studentenstromen naar elkaar toe leiden en zich daarbij concentreren op een beperkter aantal, maar dan wel qua studentenaantallen vitale opleidingen.

Gegeven de bestaande situatie is het zeer aan te bevelen om de opleiding biogeologie niet op iedere universiteit te installeren, maar genoeg te nemen met de bestaande opleidingen. In dit kader kan hetzelfde gezegd worden van bijvoor-

*We are trained to think in terms of linear causality, but we need new 'tools of thought': one of the greatest benefits of models is precisely to help us discover these tools and learn how to use them<sup>1</sup>.*

Biologische activiteit heeft in grote mate de chemische evolutie van het aardoppervlak bepaald. De aanwezigheid van een zuurstof-houdende atmosfeer-hydrosfeer die de overigens zeer sterk reducerende planeet Aarde omgeeft, is het meest opvallende gevolg van het ontstaan van leven op aarde<sup>2</sup>. De biologische evolutie en het functioneren van ecosystemen zijn op hun beurt onderhevig aan geofysische en geologische krachten. Het doorgronden van de interacties tussen organismen en hun abiotische omgeving en de hieruit voortkomende gekoppelde evolutie van de biosfeer en de geosfeer staan in de biogeologie centraal. Biogeochemici dragen hieraan bij door het transport en de omzetting van chemische substraten en producten van biologische activiteit in het milieu te onderzoeken.

Het kader waarbinnen biogeochemici gegevens verzamelen en interpreteren is dat van de biogeochemische cycli<sup>3</sup>. De cyclus van een element of een bepaalde stof geeft de mate van chemische omzetting binnen aangrenzende milieureservoirs en de transportfluxen tussen de reservoirs weer. Afhankelijk van de tijd- en ruimteschalen die men wenst te bestuderen, verschillen de toonaangevende reservoirs en processen in een cyclus. Opvallend is dat de behoefte aan een gedetailleerde weergave van biologische processen en de structuur van ecosystemen afneemt naar mate de onderzochte tijd- en ruimteschalen toenemen. Wanneer sprake is van mondiale biogeochemische cycli op tijdschalen van miljoenen jaren of meer, kunnen complexe interacties tussen biologische populaties en ecosystemen worden samengevoegd in eenvoudige fenomenologische modellen.

Er is veel vooruitgang geboekt bij de ontwikkeling van mondiale modellen die de biogeochemische dynamiek van het systeem atmosfeer-oceaan-land op tijdschalen van  $10^4$  jaar beschrijven. Hoewel deze modellen gebaseerd zijn op zeer eenvoudige weergaven van de biosfeer en de hydrosfeer, zijn ze in staat de grootschalige veranderingen in de samenstelling, redox-condities en biologische productiviteit van het aardoppervlak gedurende het geologisch verleden na te bootsen<sup>4</sup>.

Voorspellingen van de regionale en mondiale gevolgen van menselijke ingrepen in het milieu vragen aanzienlijk hogere ruimtelijke en temporele resoluties, en daardoor ook meer gedetailleerde beschrijvingen van biogeochemische systemen. Zo zijn bijvoorbeeld de opslag en omzetting van nutriënten in bodems, stroom- en kustgebieden van weinig belang voor de wereldwijde koolstofcyclus, wanneer gekeken wordt naar tijdschalen van geologische omvang, maar nemen ze een sleutelpositie in op tijdschalen van 1000 jaar. Een belangrijke taak voor biogeochemici is om vast te stellen welke processen en systeemvariabelen op verschillende ruimte- en tijdschalen van belang zijn.

De cycli van koolstof, nutriënten en andere bioactieve elementen zijn sterk met elkaar verweven. De complexiteit die deze verweving met zich mee brengt, kan wor-

den doorgrond door middel van veldmetingen, procesgeoriënteerde experimenten, modellen of, nog beter, door een combinatie van deze drie benaderingen. Reactieve transportmodellen (RTM) vormen een kwantitatief kader waarin de snel groeiende kennis die voortkomt uit experimenten, veldobservaties en theorie op een efficiënte manier kan worden geïntegreerd. RTM stellen ons in staat om de interacties tussen chemische, biologische en transport processen in complexe biogeochemische systemen op systematische wijze te analyseren<sup>5</sup>. De snelle vooruitgang op het gebied van de moleculaire ecologie zal heel waarschijnlijk leiden tot de ontwikkeling van een nieuwe generatie RTM, waarin een direct verband gelegd wordt tussen de snelheden van biogeochemische processen en de structuur en diversiteit van de biologische populaties die ten grondslag liggen aan deze biogeochemische processen.

Er bestaat daarnaast behoefte aan de ontwikkeling van opschalingsmethoden waarin RTM van aan elkaar grenzende milieus stap voor stap worden samengevoegd tot grotere systeemeenheden. Zo is bijvoorbeeld de dynamiek van koolstof en nutriënten op de overgang tussen continent en oceaan een belangrijke bron van onzekerheid bij het voorspellen van toekomstige klimaatsveranderingen<sup>6</sup>. Door het koppelen van rtm van transportsystemen langs het land-oceaan continuüm (inclusief rivieren, estuaria, grondwater en kustzeeën) kan deze dynamiek beter begrepen worden. Het wordt dan mogelijk om chemische uitwisselingen aan de grens tussen land en zee systematisch te beschrijven en te calibreren, waardoor deze weer kunnen worden ingebed in klimaatmodellen.

Opschalingsmethoden zorgen ervoor dat nieuwe kennis die is vergaard in het laboratorium of door veldonderzoek, kan worden geëxtrapoleerd naar diverse ruimten en tijdschalen. Opschaling vormt dus een cruciaal element bij het ontwikkelen van modellen die gebruikt kunnen worden om enerzijds het sedimentaire archief te ontleden in termen van milieu-ecologische aanpassingen in het verleden, en anderzijds de toekomstige veranderingen van klimaat en milieu te voorspellen.

#### Noten

- 1 Prigogine, I. en Stengers, I., *Order out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*, Bantam Books, New York 1984.
- 2 Van Cappellen, P., *Oxygen Cycle*, in: *Encyclopedia of Global Change: Environmental Change and Human Society* (Ed. A. S. Goudie), Oxford University Press, Oxford 2002, pp. 197-200.
- 3 Schlesinger, W.H., *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (2nd Edition), Academic Press, San Diego 1997.
- 4 Berner, R.A., *Modeling atmospheric O<sub>2</sub> over Phanerozoic time*, in: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, volume 65, 2001, pp. 685-694.
- 5 Steefel, C. I. en Van Cappellen, P., (Editors) *Reactive Transport Modeling of Natural Systems*, in: *Journal of Hydrology*, volume 209, 1998.
- 6 Wollast, R. en Mackenzie, F.T., *Global biogeochemical cycles and climate*, in: *Climate and Geo-Sciences* (Ed. A. Berger, S. Schneider en J.C. Duplessy), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1989, pp. 453-473.

beeld Geo-archeologie, aan de Universiteit Leiden en de vu, waarvan ook de kracht zo goed mogelijk bewaard moet worden om de studie vitaal te houden.

Is consolidatie van het bestaande een eerste doel, het ideaal is meer landelijke inrichting van het onderwijs in de Masterfase, waarbij voldoende studentenaantallen gegenereerd kunnen worden om de cursussen betaalbaar te maken. Hierbij zou een simpel stelsel van verrekening mogelijk goed kunnen werken, zodat alle betrokken instellingen de voordelen ondervinden en er tegelijkertijd een breed en zeer hoogwaardig programma aangeboden kan worden. Ook bij de coördinatie hiervan kan een kennisnetwerk een belangrijke rol spelen. Specifiek kan hierbij gedacht worden aan een *Dutch Graduate School for Biogeology*, waarvoor Bachelors van alle instellingen toegang kunnen verwerven en waaraan alle onderzoeksgroepen als cursusaanbieder deelnemen. In deze school zonder muren vormen de geselecteerde speerpunten belangrijke thema's van onderwijs, en kunnen studenten kiezen uit het totale onderzoeksaanbod van de deelnemende groepen voor stages.

### 5.3. Faciliteiten

De snelle ontwikkelingen in de richting van moleculaire wetenschappen, het steeds groeiende belang van op isotopen gebaseerde technieken, de steeds verschuivende mogelijkheden om te komen tot accurate dateringen, leggen in toenemende mate een beslag op de onderzoeksmiddelen. In Nederland is de situatie relatief goed: alle instellingen van onderzoek werkzaam op het terrein van de biogeologie beschikken, blijkens visitaties, over een modern onderzoeksinstrumentarium. Toch leggen de steeds toenemende mogelijkheden en de daarmee gepaard gaande kosten een (te) groot beslag op de middelen. Gezien de complexiteit van dit probleem heeft de Commissie hier geen apart onderzoek naar verricht via bijvoorbeeld gedetailleerde enquêtes. Toch lijkt het onvermijdelijk dat grote investeringen nationaal afgestemd worden; ook vanuit dit perspectief is bundeling in de vorm van een Nationaal Instituut essentieel. Dit kan hier coördinerend optreden in gebruik en aanschaf van grote apparatuur, en om te komen tot een optimaal gebruik van beschikbare faciliteiten.





# Conclusions and recommendations

## General

- Biogeology is a rapidly growing field of science in which global, regional and local ecosystems are viewed in the context of a changing System Earth. The variation in the temporal and spatial scales studied mean that Biogeology is of vital importance for a better understanding of our changing earth, now and in the future (*Global Change*).

*If fundamental and applied research in biogeology is to be successful, more intensive cooperation between biologists and geoscientists will be vital, and it will be essential to bridge differences in the use of temporal and spatial scales.*

- In view of the major scientific and social questions to which biogeology can (help to) provide an answer, this field of science operating at the interface of biology and geoscience is set to develop rapidly at international level. The Netherlands occupies a strong position in this field and can therefore fulfil a strategic and leading role in the future in the development of new concepts and applications.

# Conclusies en aanbevelingen

## Algemeen

- Biogeologie is een snel groeiend veld van wetenschap waarin mondiale, regionale en lokale ecosystemen gezien worden in de context van een veranderend aards systeem. De variatie in bestudeerde tijd- en ruimteschalen maken de Biogeologie bij uitstek van belang voor een beter begrip van een veranderende aarde nu en in de toekomst (*Global Change*).

*Essentieel voor het welslagen van fundamenteel en toegepast onderzoek in de biogeologie is intensievere samenwerking tussen Biologen en Aardwetenschappers, waarbij het overbruggen van verschillen in gebruik van tijd- en ruimteschalen essentieel is.*

- In het licht van de grote wetenschappelijke en maatschappelijke vragen waarop de biogeologie (mede) een antwoord kan geven, zal dit wetenschapsgebied op de grens van de biologie en aardwetenschappen internationaal een grote vlucht nemen. De Nederlandse sterkte op dit gebied is aanzienlijk en daardoor kan Nederland in de toekomst een strategische en leidende rol gaan vervullen bij de ontwikkeling van nieuwe concepten en toepassingen.

*A condition for enabling the Netherlands to play a leading international role in Biogeology is a coherent policy of encouragement from the government, KNAW, NWO and university boards within a limited range of the research spectrum, i.e. in those areas where the Netherlands currently or potentially occupies a leading position, as well as more intensive cooperation between scientists in the field. With this in mind, a clearly visible pooling of top research resources needs to be created in the form of a Darwin Biogeology Centre (Darwin Centrum voor Biogeologie).*

### **Training**

- Good training, which integrates concepts from the fields of biology and geoscience, is essential for good research. It is important that this integration is achieved at an early stage in the course of study.

*It is recommended that curricula with an interdisciplinary structure be vigorously encouraged, in both the first and second stages of research training programmes. In order to prevent fragmentation of the already modest influx of students into Biogeology, collaboration will be necessary between universities and institutes within a single Masters programme, to be coordinated by the Darwin Biogeology Centre (Darwin Centrum voor Biogeologie).*

- The amount of biological training in geoscience curricula, and of geoscience training in biology curricula, is insufficient.

*It is recommended that the proportion of evolutionary biology and (palaeo) ecology included in geoscience curricula be increased, possibly in the form of optional modules. It is also recommended that the knowledge in the fields of the history of evolution and of System Earth in biology curricula be strengthened, again possibly through the inclusion of optional modules.*

### **Fundamental research**

- There is little interaction between fundamental research in biology and geoscience. Where such interaction does exist, the complementarity of the two disciplines immediately generates added value in the study of the role of life in the context of System Earth. Existing collaborative structures between top research groups could be used relatively easily for the creation of a visible pooling of research resources at European level.

*Voorwaarde voor een leidende internationale positie van de biogeologie is coherente stimulering van de zijde van de overheid, KNAW, NWO en universitaire besturen op een beperkt deel van het onderzoeksspectrum, namelijk daar waar Nederland een toppositie inneemt of kan innemen, en intensievere samenwerking in het wetenschapsveld. Daartoe dient een duidelijke zichtbare bundeling van toponderzoek te ontstaan in de vorm van een **Darwin Centrum voor Biogeologie**.*

### Onderwijs

- Goed onderwijs, waarin op geïntegreerde wijze biologische en aardwetenschappelijke concepten worden samengebracht, is essentieel voor goed onderzoek. Belangrijk is dat de integratie reeds in een vroeg stadium van de studie plaatsvindt.

*Het verdient aanbeveling om interdisciplinair opgezette curricula met kracht te stimuleren, zowel in de eerste fase als in de tweede fase van de opleiding tot onderzoeker. Om verbrokkeling van de niet grote studentenstromen biogeologie te voorkomen, is samenwerking tussen universiteiten en instituten noodzakelijk binnen één Masterprogramma, gecoördineerd door het Darwin Centrum voor Biogeologie.*

- De omvang van biologisch onderwijs binnen aardwetenschappelijke curricula, en van aardwetenschappelijk onderwijs binnen biologische curricula, is onvoldoende.

*Het verdient aanbeveling om het aandeel evolutiebiologie en (paleo-)ecologie in aardwetenschappelijke curricula te verhogen, al dan niet in keuzepakketvorm. Het verdient tevens aanbeveling om met name de kennis op het gebied van de historische gang van de evolutie en op het gebied van het systeem Aarde in biologische curricula te versterken, al dan niet in de vorm van keuzepakketten.*

### Fundamenteel onderzoek

- Fundamenteel onderzoek in de biologie en aardwetenschappen kent weinig interactie. Daar waar interactie bestaat, blijkt onmiddellijk een belangrijke meerwaarde voortvloeiend uit de complementariteit van de vakgebieden biologie en aardwetenschappen, voor het beschouwen van de rol van het leven in de context van het systeem Aarde. Bestaande samenwerkingsverbanden van topgroepen kunnen relatief gemakkelijk benut worden om te komen tot een Europees zichtbare bundeling.

*In order to generate ground-breaking research and explore innovative new fields, interdisciplinary collaboration needs to be further strengthened both within and between faculties, and within and between research schools and para-university research institutes, partly through the use of targeted NWO grants.*

*It is recommended that pooling of research resources be encouraged in a bottom-up approach, making use of existing small but vital links which are already generating productive research. This can be achieved more effectively if granting bodies and university administrators actively promote the breaking down of barriers at national and local level by making available additional funding for this. Joint research projects, and above all joint training programmes, are good instruments in this respect.*

- Biogeological knowledge provides an insight among other things into changes at various temporal and spatial scales. Such insights will play a crucial role in the years ahead with respect to social issues such as the effects of declining biodiversity, the disruption of biogeochemical resources due to human actions and the consequences of this for biota, and the consequences of rapid climate change for life on earth.

*The universities and major research institutes active in this field need to refocus their activities so that their research is increasingly geared towards longer time scales and larger spatial scales.*

## **Themes for fundamental research**

### **General**

- Given its limited capacity, it is impossible for the Netherlands to develop all areas in the field of biogeology with equal vigour and success. This makes a well-considered choice of themes unavoidable. These choices will have to be made on the basis of a number of criteria, which as a minimum will include the present position of strength and quality, future vitality, international developments and – to lesser extent – social relevance.

*This Dutch position of strength, confirmed by a number of international reviews in recent years of groups involved in the field of biogeology, all of which have come to the conclusion that the work being carried out was good, and often excellent, needs to be sustained and developed through the permanent deployment of top-class scientists. International developments show that the Netherlands can make a successful contribution if the following themes are addressed in an integrated manner: Evolution, Biodiversity, Biogeochemical cycles and Palaeoenvironment and proxies.*

*Om vernieuwend onderzoek te genereren en innovatief nieuwe terreinen te verkennen, dient interdisciplinaire samenwerking binnen en tussen faculteiten, binnen en tussen onderzoekscholen en para-universitaire onderzoekinstellingen, mede via gerichte NWO-subsidies, verder versterkt te worden.*

*Het verdient aanbeveling om bundeling te stimuleren van onderaf, gebruik makend van bestaande kleine, maar vitale, verbanden, die nu al leiden tot productief onderzoek. Dit kan worden bevorderd wanneer subsidiegevers en bestuurders van universiteiten op nationale en lokale schaal het doorbreken van muren actief bevorderen door hier premies op te zetten. Gezamenlijke onderzoeksprojecten en vooral gezamenlijk onderwijs, zijn goede instrumenten.*

- Biogeologische kennis levert inzicht in onder andere veranderingen op diverse ruimte- en tijdschalen. Dit zal de komende jaren van groot belang zijn bij maatschappelijke vraagstukken, zoals de effecten van dalende biodiversiteit, de ontwrichting van biogeochemische stofstromen door menselijk handelen en de vervolgeffecten daarvan voor biota, en de effecten van snelle klimaatverandering voor het leven op aarde.

*Zowel bij universiteiten als bij de grote onderzoeksinstituten werkzaam op dit terrein, dient een heroriëntatie op gang te komen waarbij onderzoek in toenemende mate mede gericht wordt langere tijdschalen en grotere ruimtelijke schalen een sterker accent verdienen.*

## **Thema's van fundamenteel onderzoek**

### **Algemeen**

- Gezien de beperkte capaciteit is het uitgesloten dat in Nederland alle terreinen op het gebied van de biogeologie met evenveel kracht en succes tot ontwikkeling gebracht kunnen worden. Daarom zijn weloverwogen keuzes van thema's onvermijdelijk. De keuzes dienen gemaakt te worden op basis van een aantal criteria; daartoe behoren in elk geval de huidige sterkte, de toekomstige vitaliteit, de internationale ontwikkelingen en – in mindere mate – het maatschappelijk belang.

*Die positie, bevestigd door internationale visitaties van de afgelopen jaren van groeperingen werkzaam op biogeologisch terrein die zonder uitzondering het oordeel goed en vaak het oordeel excellent opleverden, dient bewaard en uitgebouwd te worden via de blijvende inzet van uitstekende onderzoekers. De internationale ontwikkelingen laten zien dat Nederland succesvol kan bijdragen indien de volgende thema's geïntegreerd worden aangepakt: Evolutie, Biodiversiteit, Biogeochemische cycli en Paleomilieu en proxies.*

- Its small geographical size, combined with a relatively large number of good to very good biogeological research institutes, means there are excellent opportunities for the Netherlands. In addition, the relative proximity of concentrations of biogeological research in northwest Germany is of key importance.

*Given the short distances, non-physical pooling of research resources has a great chance of success, provided the partners enter into formal agreements and join forces in a national research programme and a joint strategy for raising and deploying funds. Here again, the proposed Darwin Biogeology Centre (Darwin Centrum voor Biogeologie) plays a part.*

- Financing is a crucial element in stimulating science. Multidisciplinary research, as intended in this report, requires additional incentives. One of these incentives takes the form of subsidies from indirect government funding.

*We recommend that the Research Council for Earth and Life Sciences of the Netherlands Organisation for Scientific Research (NWO-ALW) strictly enforce the standard of interdisciplinary cooperation as one of the criteria for accepting biogeological project proposals. In other words, biology researchers must explicitly demonstrate earth science aspects and earth science researchers must explicitly demonstrate biology aspects in joint research projects.*

#### **Evolution**

- Evolutionary biological, palaeontological and palaeoecological researchers frequently operate independently of each other. This reduces the potential strength they could have if they operated jointly.

*Collaboration in training and research needs to increase. There is a great deal to be gained from this, particularly in the field of speciation and in explaining the historical progress of evolution.*

- The theme ‘Evolution’ is of vital importance for understanding biological processes over long time scales. This theme is taken to include both research into evolutionary processes in a strict sense and, to an even greater extent, integration of biological and geoscientific research in this field.

*In the Committee’s view, the themes ‘Deep phylogeny and evolutionary ecology’ and ‘Changing ecosystems, selection and extinction’ are of crucial importance in this respect.*



- Nederland kent bijzondere kansen door de geringe onderlinge afstanden tussen een relatief groot aantal (zeer) goede instellingen die biogeologisch onderzoek verrichten. Daarnaast is het voorkomen in de betrekkelijke nabijheid van concentraties van biogeologisch onderzoek in Noordwest-Duitsland van zeer groot belang.

*Gegeven die geringe afstanden heeft ook niet-fysieke bundeling van onderzoek een grote kans van slagen, mits de partners formele overeenkomsten sluiten en zich binden aan een gezamenlijk en nationaal onderzoeksprogramma, en aan een gezamenlijke strategie om fondsen te werven en te benutten. Ook hier speelt het voorgestelde Darwin Centrum voor Biogeologie een rol.*

- Financiering speelt een grote rol bij het stimuleren van wetenschap. Multidisciplinair onderzoek, zoals in dit rapport wordt beoogd, vergt extra prikkels. Een van deze prikkels wordt gevormd door de subsidies uit de tweede geldstroom.

*Aan NWO-ALW wordt aangeraden de norm van interdisciplinaire samenwerking als een van de criteria bij de aanvaarding van biogeologische projectvoorstellen strikt te hanteren, dat wil zeggen biologische onderzoekers dienen de aardwetenschappelijke aspecten, aardwetenschappelijk onderzoekers de biologische aspecten in gezamenlijke onderzoeksprojecten expliciet aan te tonen.*

#### **Thema Evolutie**

- Evolutionair biologische, paleontologische en paleo-ecologische onderzoekers opereren vaak afzonderlijk van elkaar. Dat gaat ten koste van de potentiële gezamenlijke slagkracht.

*Samenwerking in onderwijs en onderzoek dient toe te nemen. Vooral op het gebied van speciatie en de verklaring van de historische gang van de evolutie is veel winst te behalen.*

- Het thema evolutie is van essentieel belang voor het begrijpen van biologische processen op lange tijdschalen. Hieronder wordt begrepen zowel onderzoek naar evolutionaire processen *sensu stricto*, maar meer nog integratie van biologisch en aardwetenschappelijk onderzoek op dit terrein.

*De thema's 'Diepe fylogenie en evolutionaire ecologie' en 'Veranderende ecosystemen, selectie en extinctie' zijn naar de mening van de Commissie in dit opzicht essentieel.*

#### **Biodiversity and Biogeochemical cycles**

- The theme ‘biodiversity’ is of fundamental scientific and social relevance. The emphasis in biodiversity research in the Netherlands lies firmly on the biological side, concentrating particularly on surveys and (molecular) biosystems, and is reasonably coherent. Future changes in diversity and the consequences thereof can however only be understood when seen against the background of lengthy processes.

*Biodiversity research needs to be more explicitly positioned against the background of changes in the entire System Earth, and also needs to be related to geoscientific research.*

- An understanding of biogeochemical cycles is important because they form the basis for the regulation of System Earth. The interaction between organisms and System Earth plays a prominent role here. Regulation via biogeochemical cycles, including the water cycle, plays an essential role in the context of biodiversity.

*Research on the interface between cycles and biodiversity should be encouraged. It is recommended that the integration of biological and biogeochemical research be strengthened. There are great opportunities for this collaboration, especially in the fields of microbiology and ecosystem studies, and including in applied research.*

- From the broad spectrum of research, the Netherlands should focus explicitly on those areas where it has leading international expertise, as well as on the themes which are of social relevance.

*The Committee considers the themes ‘Biodiversity in time scales of >10 years’, ‘Functional diversity and biogeochemical cycles’, and ‘Biogeochemical cycles and climate’ to be of great and strategic importance in this respect.*

#### **Palaeoenvironment and proxies**

- The Netherlands occupies a strong international position in the field of palaeoenvironmental reconstructions and the development of proxies. Knowledge of proxies leads to improved reconstruction of the geological past, and thus to a better understanding of System Earth. Molecular proxies will become increasingly important alongside chemical and biological proxies.

*Existing informative proxies need to be better validated so that they can serve as accurate markers to facilitate robust reconstructions; multidisciplinary cooperation between biologists and geoscientists deserves strong encouragement in this respect.*

#### Thema's Biodiversiteit en Biogeochemische cycli

- Het thema biodiversiteit is van fundamenteel wetenschappelijk en maatschappelijk belang. Het accent van biodiversiteitonderzoek in Nederland ligt sterk op de biologische kant, vooral op inventarisatie en (moleculaire) biosystematiek en kent een redelijke mate van coherentie. Toekomstige veranderingen in diversiteit en de gevolgen daarvan, kunnen echter slechts begrepen worden tegen de achtergrond van langlopende processen.

*Onderzoek in de biodiversiteit moet sterker worden gepositioneerd tegen de achtergrond van veranderingen in het hele systeem Aarde, en worden verbonden met aardwetenschappelijk onderzoek.*

- Begrip van biogeochemische cycli is van belang omdat deze de grondslag vormen van de regulatie van het aards systeem. De interactie tussen organismen en het systeem Aarde speelt hier een prominente rol. Regulatie via biogeochemische kringlopen inclusief die van water speelt een essentiële rol in het kader van biodiversiteit.

*Onderzoek op het grensvlak van kringlopen en biodiversiteit dient gestimuleerd te worden. Het verdient aanbeveling om te komen tot een sterkere integratie van biologisch en biogeochemisch onderzoek. Vooral op het terrein van de microbiologie en ecosysteemstudies liggen voor die samenwerking grote kansen, ook op toegepast gebied.*

- Uit het brede spectrum van onderzoek dient Nederland zich nadrukkelijk te richten op delen waar internationale topexpertise aanwezig is en op thema's van maatschappelijk belang.

*De thema's 'Biodiversiteit op tijdschalen van langer dan 10 jaar', 'Functionele diversiteit en biogeochemische kringlopen', en 'Biogeochemische kringlopen en klimaat' worden door de Commissie in dit opzicht van strategisch en groot belang geacht.*

#### Thema Paleomilieu en proxies

- Op het gebied van paleomilieu-reconstructies en de ontwikkeling van *proxies* heeft Nederland een internationaal sterke positie. Kennis van *proxies* leidt tot een verbeterde reconstructie van het geologische verleden, en daarmee tot een beter begrip van het systeem Aarde. Moleculaire *proxies* zullen een toenemende rol gaan spelen naast chemische en biologische *proxies*.

*Thans benutte informatieve proxies dienen beter gevalideerd te worden zodat het daardoor accurate markers worden om robuuste reconstructies mogelijk te maken; multidisciplinair samenwerken van biologen en aardwetenschappers dient in dit opzicht sterk gestimuleerd te worden.*

- An accurate reconstruction of the past is of the greatest importance for a better understanding of System Earth. Multidisciplinary research on aquatic and terrestrial sediments, with high time resolution and maximum chronological control, is essential. New proxies (molecular and geochemical), new data processing methods such as inverse modelling and biomimicry, and the maintaining of public domain databases, must be encouraged.

*The Committee believes that the Netherlands is in a sufficiently strong position to enable it to occupy a leading international position in the years ahead in the following strategic themes: ‘Biological validation of proxies’ (leading to improved palaeoenvironmental reconstructions) and ‘Reconstruction of the palaeoenvironment and palaeoclimate of essential periods’ (concentrating on the effects of rapid climate changes on biota).*

#### **Overarching theme ‘Models’**

- Theoretical aspects of biogeology, in particular those relating to different temporal and spatial scales, are of great importance. The Netherlands has accumulated a good deal of theoretical biological knowledge with which to tackle this issue in an innovative way.

*Research into the development of biogeological models, in particular modelling aspects relating to overcoming timescale problems, needs to be encouraged. With this in mind, close collaboration is sought between palaeoecologists, system ecologists and theoretical biologists on the one hand, and geologists, (eco)hydrologists and geographers on the other. Biogeology provides the ideal infrastructure for this.*

#### **Applied research and social relevance**

- There is little awareness of the practical applicability of Biogeological research, either on the part of researchers themselves or among government authorities and funding agencies. There is a great deal of expertise in the Netherlands, particularly in the fields of coastal defence, shallow marine biogeochemistry, biodiversity and freshwater systems.

*Ministries and other public authorities could take greater account in their decision-making of the social relevance of Biogeology (for example in the context of long-term development of coasts, biodiversity and natural resources, large-scale pollution, the carbon cycle and the greenhouse effect). Here again, pooling of research resources and visibility in the form of a Darwin Biogeology Centre (Darwin Centrum voor Biogeologie) is important, including from the perspective of efficient dissemination of knowledge. The proposed Darwin Biogeology Centre could act as a consultant to government authorities.*

- Een nauwkeurige reconstructie van het verleden is van het grootste belang om te komen tot een beter begrip van het systeem Aarde. Multidisciplinair onderzoek met hoge tijdsresolutie en maximale chronologische controle, van aquatische en terrestrische sedimenten is essentieel. Nieuwe *proxies* (moleculaire en geochemische), nieuwe verwerkingsmethoden van gegevens zoals ‘*inverse modelling*’ en biomisering, en het onderhouden van *public-domain data bases* moeten gestimuleerd worden.

*De Commissie acht in Nederland de sterkte aanwezig om de komende jaren op de volgende strategische thema's internationaal leidend te zijn: 'Biologische validatie van proxies' (leidend tot verbeterde paleomilieu-reconstructies) en 'Reconstructie van paleomilieu en paleoklimaat van essentiële perioden' (concentreerend op de effecten van snelle klimaatsveranderingen op biota).*

#### **Dwarsverbandthema modellen**

- Theoretische aspecten van de biogeologie, vooral betrekking hebbend op verschillende tijd- en ruimteschalen, zijn van groot belang. Nederland heeft veel theoretisch biologische kennis in huis om deze problematiek vernieuwend aan te pakken.

*Onderzoek ten behoeve van het ontwikkelen van biogeologische modellen, in het bijzonder van aspecten die betrekking hebben op het overwinnen van tijdschaalproblemen, dient gestimuleerd te worden. Hiertoe wordt nauwe samenwerking tot stand gebracht tussen enerzijds paleo-ecologen, systeemecologen en theoretische biologen en anderzijds geologen, hydrologen, ECO-hydrologen en geografen. De Biogeologie vormt hiervoor de ideale infrastructuur.*

#### **Toegepast onderzoek en maatschappelijk belang**

- Er is een gering besef van de toepasbaarheid van biogeologisch onderzoek, zowel bij de onderzoekers zelf als bij overheden en financiers. Vooral op de terreinen kustverdediging, ondiepe mariene biogeochemie, biodiversiteit, en zoet-watersystemen kent Nederland een grote expertise.

*Ministeries en andere overheden zouden beter het maatschappelijk belang van de Biogeologie (bijvoorbeeld in het kader van lange-termijn ontwikkeling van kusten, biodiversiteit en natuurlijke hulpbronnen, pollutie op grote schalen, de koolstofcyclus en het broeikas-effect) kunnen benutten bij hun besluitvorming. Ook in dit opzicht is bundeling en zichtbaarheid in de vorm van een Darwin Centrum voor Biogeologie belangrijk, evenals uit het oogpunt van een efficiënte disseminatie van kennis. Het op te richten Darwin Centrum voor Biogeologie kan optreden als consultant voor overheden.*

## Literatuur (chronologisch)

- Ruimte voor Aardwetenschappen*. Toekomstverkenning aardwetenschappelijk onderzoek. Eindrapport Verkenningcommissie Aardwetenschappen, december 1996.
- Biologie: het leven centraal*. Eindrapport van de Verkenningcommissie Biologie, november 1997.
- Biology*. Assessment of Research Quality, vsnu, oktober 1999.
- Bio-exact*. Mondiale trends en nationale positie in biochemie en biofysica. knaw, 1999.
- Verkenningen-Agenda KNAW*, knaw, oktober 2000.
- Progress Report. Research School Biodiversity 1999-2000*, 2001.
- Biologie: een vitaal belang. Strategische visie op de universitaire biologie in Nederland*, knaw, april 2001.
- Startnotitie Verkenning Biogeologie*. Rapport Werkgroep Voorstudie Verkenning Biogeologie, september 2001.
- Geobiology: exploring the interface between the biosphere and the geosphere*, Kenneth Nealson and William A. Ghiorse. A report from the American Academy of Microbiology, 2001
- The Kingdoms of GAIA*, Fred Pearce, *New Scientist*, 16 June 2001.
- Niche construction: the neglected process in evolution*, F.J. Odling-Smee, K.N. Laland & M.W. Feldman. Princeton University Press, in press.
- Earth Sciences*. Assessment of Research Quality, vsnu, in press.

# Bijlagen

## **Bijlage 1. Samenstelling Verkenningcommissie Biogeologie**

Als leden van de Verkenningcommissie Biogeologie werden op persoonlijke titel benoemd:

- Prof. dr. G.J. van der Zwaan, voorzitter, Faculteit Aardwetenschappen uu,  
Subfaculteit Biologie kun (biogeologie)
- Prof. dr. ir. N. van Breemen, Laboratorium voor Bodemkunde en Geologie,  
Wageningen Universiteit (pedologie)
- Prof. dr. Ph. Van Cappellen, Faculteit Aardwetenschappen uu (geochemie)
- Prof. dr. H. Hooghiemstra, science Faculteit uva (paleobotanie)
- Prof. dr. H.J. Laanbroek, nioo-knaw, Subfaculteit Biologie kun (microbiologie)
- Prof. dr. J.W. de Leeuw, Koninklijk nioz, Faculteit Aardwetenschappen uu  
(organische geochemie)
- Mw. prof. dr. J.L. Olsen, Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen rug  
(mariene ecologie)
- Prof. dr. L.A.C.J. Voeselek, Faculteit Biologie uu (ecofysiologie)
- Mw. ir. A.M. de Gier, secretaris, knaw



## Bijlage 2. Opdracht aan Verkenningcommissie Biogeologie

De opdracht aan de Verkenningcommissie is het uitvoeren van een wetenschapsverkenning op het gebied van de Biogeologie, die resulteert in concrete aanbevelingen aan overheid, andere sponsors, universiteiten en onderzoekinstellingen.

### *Gebied*

Het biogeologisch onderzoek is gericht op het beschrijven, kwantificeren en begrijpen van interacties van abiotische (fysische en chemische) en biotische processen, die de ontwikkeling en dynamiek van het systeem Aarde en de daarin aanwezige biodiversiteit reguleren, in het geologische verleden, nu en in de toekomst.

### *Doel*

Het identificeren van de belangrijkste ontwikkelingen binnen het internationale biogeologisch onderzoek en het strategisch positioneren van het Nederlandse onderzoek binnen deze ontwikkelingen.

### *Vragen*

De Verkenningcommissie dient in het door haar uit te brengen rapport in ieder geval antwoord te geven op de volgende vragen:

- Wat zijn mondiale trends en ontwikkelingen op het terrein van de biogeologie, ten gevolge van de dynamiek van de wetenschap? Waar kunnen doorbraken worden verwacht?
- Zijn er specifieke verwantschappen en relaties tussen biologie en geologie en komen die voldoende tot uiting door samenwerking tussen biologen en geologen? Welke mogelijkheden tot intensivering van de samenwerking zijn er?
- Welke mogelijkheden bieden *nieuwe* combinaties van kennis afkomstig uit biologie en aardwetenschappen (inclusief de hydrologie) aangevuld met kennis uit (bio) chemie, (bio) fysica, en andere relevant geachte disciplines voor het beantwoorden van de biogeologische vraagstukken?
- Welke zijn sterke en zwakke kanten – in kwantitatieve en in kwalitatieve zin – van het Nederlandse onderzoekbestel voor biogeologie in combinatie met de in de voorgaande vraag genoemde disciplines? Op welke wijze kan versterking worden bewerkstelligd?

- Zijn structurele veranderingen wenselijk in de organisatie en de financiering van de biogeologie, en zo ja, welke zijn dat?
- Op welk onderzoek zou het Nederlandse publiek gefinancierd onderzoek zich moeten concentreren? Welke *niches* zijn er, gezien vanuit een internationaal perspectief? Welke (internationale) samenwerking zou moeten worden gestimuleerd?
- Zijn er maatschappelijke trends die een bijzondere invloed hebben op de toekomstige ontwikkeling van de biogeologie?
- Zijn er op lange termijn in het oog springende toepassingsmogelijkheden van de biogeologische kennis?
- Op welke wijze kan de vormgeving van het onderwijs in de biogeologie en de aanpalende vakgebieden er toe bijdragen dat op middellange en lange termijn voldoende onderzoekers geïnteresseerd raken in het te verkennen onderzoeksterrein?

De Verkenningcommissie kiest haar eigen werkwijze en bepaalt op basis hiervan haar werkplan met in achtname van de gestelde rapportage termijn. De Verkenningcommissie verzekert zich in ieder geval van voldoende draagvlak voor haar conclusies en aanbevelingen.

De Verkenningcommissie rapporteert met regelmaat over haar vorderingen aan zowel de Raad voor Aarde en Klimaat als aan de Biologische Raad.

De Verkenningcommissie brengt in een periode van negen maanden (gerekend vanaf de instelling van de Commissie) haar eindrapport uit aan het Dagelijks Bestuur.

### Bijlage 3. Enquêtevragen en -resultaten

#### Biogeology questionnaire

**A. Definition:** Below a definition of biogeology is given. In your view, is this an adequate definition? If not, indicate where you would phrase it differently.

Biogeology is the field that studies the origin and development of life, including the regulation of the System Earth through the coupled evolution of organisms and their abiotic (physical and chemical) environment.

**B. Biogeology is an interdisciplinary field of research; it comprises many themes and research topics. Could you rank the importance of the topics listed below by giving each a ranking number (1 is most important topic in your view).**

**One field is left blank; you may use that one to insert a theme or topic that is missing from the list. Yet, you consider that topic essential. Please, give this topic a ranking number as well.**

	<i>Origin of life</i> How did the chemical evolution take place? How did the early life evolve and how did the first living cells develop?
	<i>Evolutionary processes</i> Reconstruction of the evolution and phylogeny, with a combination of paleontological, molecular, genetical and biogeochemical approaches. Validation of the molecular biological clock.
	<i>Functional biodiversity/biogeochemical fluxes</i> Which archaea, bacteria, protists, fungi, algae, higher plants and animals play a key role in the biogeochemical cycles? Or, how is functional biodiversity linked to the biogeochemical fluxes and vice versa?

	<p><i>Deep biosphere</i> How is the deep biosphere (the microbial ecosystem in the upper kilometres of sediments and in oil- and gas reservoirs) maintained and what is the influence of the micro-organisms on the physical and chemical processes in these sediments and reservoirs?</p>
	<p><i>Paleo-environmental reconstruction</i> How did the System Earth evolve? In what way are life, climate and the earth connected? <i>Proxies</i> are means to reconstruct these relationships in detail, sometimes using transfer functions. They provide insight into ecosystem parameters during deposition (temperature, salinity, productivity, taxonomic composition, etc.)</p>
	<p><i>Integration of biotic relations in ecosystem- and climate models</i> With the use of nested modelling theories Global Change can better be predicted.</p>
	<p>(Please fill in your biogeological topic here and rank it)</p>

#### **Further remarks**

Please feel free to send us any comment you want about the future of biogeology!

---

#### **Resultaten enquête**

Op de 500 elektronisch verzonden enquêtes zijn in totaal 130 e-mailreacties ontvangen, waarvan 95 geheel of gedeeltelijk ingevulde enquêtes.

#### *Definitie (vraag 1)*

De door de vcbg voorgestelde definitie wordt door een twintigtal respondenten onderschreven. De ontvangen aanvullingen en/of wijzigingen gaan zowel in biologische als in geologische richting. Mede op grond van deze opmerkingen is de oorspronkelijke definitie van de voorstudiewerkgroep aangepast. Zie paragraaf 1.3 op pagina 8.

### *Speerpunten (vraag II)*

In tabel 4 staan de resultaten van de door ruim 100 onderzoekers aangegeven biogeologische prioriteiten weergegeven. Zie ook figuur 1 in Hoofdstuk 3.2.1.

*Tabel 4. Ranking van zes verschillende biogeologische thema's door ruim 100 onderzoekers werkzaam in Nederland.*

Ranking	I	II	III	IV	V	VI	Niet genummerd
Item							
Origin of life	15	9	9	12	25	26	19
Evolution processes	14	15	17	27	11	8	19
Fc biodiv, bg fluxes	38	21	20	9	9	9	19
Deep biosphere	5	10	11	13	16	47	19
Paleo reconstruction	22	22	22	14	11	3	19
Modelling	13	25	9	17	14	17	19

#### Bijlage 4. Lijst geraadpleegde personen

##### Buitenland:

Prof. dr. P.G. (Paul) Falkowski, Rutgers University  
Prof. dr. A.H. (Andrew) Knoll, Harvard University  
Prof. dr. L. (Lynn) Margulis, University of Massachusetts  
Prof. dr. K.H. (Kenneth) Nealson, University of Southern California  
Dr. J. (Jelle) Bijma, Alfred Wegener Instituut, Bremen

##### Binnenland:

Dr. T. (Thilo) Behrends, uu  
Prof. dr. F. (Frank) Berendse, wur  
Dr. K.P. (Karin) Boessenkool, vu  
Prof. dr. J.M. (Jan) van Groenendael, kun  
Dr. R. (Rob) Hengeveld, Koninklijk nioz  
Prof. dr. S.A.L.M. (Bas) Kooijman, vu  
Dr. R.A. (Rob) Marchant, uva  
Dr. J. (Jaap) van der Meer, Koninklijk nioz  
Dr. J.J. (Jack) Middelburg, nioo-ceme-knaw  
Dr. P.A.G. (Pierre) Regnier, uu  
Dr. W.A. (Willem) Schutte, ul  
Prof. dr. M. (Marten) Scheffer, wur  
Dr. ir. J.S. (Jaap) Sinninghe Damsté, Koninklijk nioz  
Prof. dr. A.J.M. (Fons) Stams, wur  
Prof. dr. J.T.A. (Jos) Verhoeven, uu  
Dr. H.W. (Henk) van Verseveld, vu  
Dr. F. (Frederieke) Wagner, uu  
Prof. dr. P. (Peter) Westbroek, ul  
Dr. C.J. (Cees) van der Zwan, Shell Rijswijk

Dr. J. (John) Marks, nwo-alw  
Dr. H. (Hans) de Boois, nwo-alw  
Dr. C.H. (Karin) Kooi-de Bruijne, nwo-alw

## **Bijlage 5. Universitaire onderzoeks-(leerstoel)-groepen op het terrein van de 'biogeologie'**

Hieronder worden de groepen vermeld, aangeduid met de achternaam van de leider ervan die de vcbg rekent tot het domein van – of zeer sterk gerelateerd aan – de biogeologie. De leerstoelen worden per universiteit weergegeven; achter de naam van de huidige functionaris staat de leeropdracht vermeld, alsmede wat voor soort hoogleraarschap het betreft. Voor enkele functionarissen geldt dat zij weliswaar een groep trekken, doch geen hoogleraar zijn, maar universitair hoofd-docent; achter hun naam staat de aanduiding '(uhd)'.

### **Universiteit van Amsterdam**

- Bak - Tropische mariene biologie (bijzonder)
- Boon - Moleculaire paleobotanie (bijzonder)
- Hooghiemstra - Palynologie en kwartair-ecologie (fulltime)
- Imeson - Bodemerrosie, in het bijzonder in relatie tot de verwoes-tijningsproblematiek (deeltijd: 0,2)
- Laane - Mariene biogeochemie
- Menken - Evolutiebiologie
- Mur - Aquatische milieubiologie (deeltijd: 0,2)
- Schram - Systematiek en biogeografie van dieren (fulltime)
- Sevink - Fysische geografie, in het bijzonder landschaps-analyse (fulltime)
- van Tienderen - Experimentele plantensystematiek (fulltime)
- Verstraten - Fysische geografie, in het bijzonder bodem en landschap (fulltime)

### **Vrije Universiteit Amsterdam**

- Aerts - Systeemecologie (fulltime)
- Andriessen - Isotopengeologie, in het bijzonder splijtingssporenanalyse (fulltime)
- Bartels - Ecofysiologie van planten (fulltime)
- Kooijman - Theoretische biologie (fulltime)
- Kroon - Paleontologie (fulltime)
- Schlager - Mariene geologie en sedimentologie (fulltime)
- van Straalen - Dierecologie (fulltime)
- Vandenberghe - Fysische geografie en kwartairgeologie (fulltime)
- van Verseveld - Microbiële ecofysiologie (uhd)

### **Rijksuniversiteit Groningen**

- van Andel - Plantenecologie (fulltime)
- de Baar - Algemene oceanologie (deeltijd: 0,3)
- Bakker - Natuurbeheer (bijzonder)
- Heip - Estuariene ecologie (buiten bezwaar)
- Herndl - Biologische oceanografie (buiten bezwaar)
- Meijer - Isotopenfysica (fulltime)
- Wolff - Mariene biologie (fulltime)
- Olsen - Mariene ecologie (fulltime)
- vacant - Microbiële ecologie (fulltime)
- Weissing - Theoretische biologie

### **Technische Universiteit Delft**

- Kueneen - Algemene en toegepaste microbiologie (fulltime)
- de Mulder - Bodembeheer (deeltijd 0,3)

### **Universiteit Leiden**

- Baas - Systematische plantkunde (fulltime)
- Gittenberger - Systematische dierkunde (deeltijd: 0,3)
- Metz - Mathematische biologie (fulltime)
- van Veen - Microbiële ecologie (bijzonder)
- van Dishoek - Moleculaire astrofysica, astrochemie

### **Katholieke Universiteit Nijmegen**

- van Donk - Limnologie (bijzonder)
- van Groenendaal - Aquatische ecologie en milieubiologie (fulltime)
- Jetten - Ecologische microbiologie (fulltime)
- de Kroon - Experimentele plantenecologie (fulltime)
- Laanbroek - Bodembioogie (bijzonder)
- van der Zwaan - Biogeologie (deeltijd: 0,3; zie ook uu)

### **Universiteit Utrecht**

- de Boer - Sedimentologie (fulltime)
- van der Borg - Isotopengeologie (uhd)
- Burrough - Fysische geografie, in het bijzonder geografische landschapskunde en geografische informatiesystemen (fulltime)
- Van Cappellen - Geochemie (fulltime)
- Koster - Fysische geografie, in het bijzonder geomorfologie (fulltime)



- de Leeuw - Organische geochemie (deeltijd: 0,2)
- Lotter - Paleobotanie en palynologie (fulltime)
- Meulenkamp - Stratigrafie en paleontologie (fulltime)
- Verhoeven - Landschapsecologie (persoonlijk)
- Visscher - Paleobotanie en palynologie (fulltime)
- Werger - Planten- en vegetatie-ecologie (fulltime)
- Voeselek - Ecofysiologie
- van der Zwaan - Biogeologie (zie ook kun)

#### **Wageningen Universiteit**

- Berendse - Natuurbeheer en plantenecologie (fulltime)
- van Breemen - Bodenvorming en ecopedologie (fulltime)
- Brussaard - Bodembioecologie en biologische bodemkwaliteit (fulltime)
- Cleef - Tropische vegetatie-ecologie en -kartering (bijzonder)
- Goudriaan - Plantaardige productiesystemen (persoonlijk)
- van Keulen - Plantaardige productiesystemen, met bijzondere aandacht voor bodem-plant-dier-relaties (persoonlijk)
- Leemans - Mondiale integrale landgebruiksmodellering (deeltijd: 0,3)
- Prins - Natuurbeheer in de tropen en ecologie van vertebraten (fulltime)
- Scheffer - Aquatische ecologie en waterkwaliteitsbeheer (fulltime)
- de Vos - Microbiologie (fulltime)

## **Bijlage 6. Overzicht relevante onderzoekscholen waar biogeologisch onderzoek plaatsvindt**

### **Korte beschrijvingen biogeologiethema's naar onderzoekschool, ontleend aan websites of jaarverslagen 2000**

#### **Research School Biodiversity** <http://www-biodiv.bio.uva.nl>

Focus on two basic questions:

- How to categorise present-day biodiversity (with as central topics: taxonomy and phylogeny of selected groups; biodiversity assessment and biodiversity informatics)
- How does biodiversity arise? (with as central topics phylogenetics, historical biogeography and processes of population differentiation and speciation)  
Increased emphasis on the use of molecular tools, particularly nucleic acid base sequence homologies as taxonomic characters.

#### **Graduate School Functional Ecology** <http://biol.rug.nl/functional>

Communication and adaptation: new frontiers in ecological research.

Subthemes:

1. Individual performance
2. Population and metapopulation processes
3. Community and ecosystem processes and constraints

#### **Netherlands Centre for Geo-ecological Research (icg)** <http://www.frw.uva.nl/icg/index.htm>

Research themes:

1. Dynamics and paleorecords of depositional environments
  - 1a. Dynamics and evolution of river and coastal systems
  - 1b. Paleoclimatology and paleoecology of the Quaternary
2. Functioning of Landscape Ecosystems
  - 2a. Processes and change in terrestrial ecosystems
  - 2b. Processes and changes in geomorphological systems

#### **C.T. de Wit Graduate School Production Ecology and Resource Conservation (perc)**

<http://www.dpw.wageningen-ur.nl/PEenRC/index.htm>

PEenRC Programme 1: Crop growth and vegetation development

Physical, chemical and physiological processes determine crop growth and vegetation development. Dynamic simulation coupled with experimental work on these processes and their interactions provides scientific understanding at various levels of integration, ranging from field crops and vegetation or crops grown under high-tech conditions in protected cultivation (including post harvest issues), to agro-ecological zone classification. The main areas of research deal with the effects of climate and soil on the growth and development of plants.

Theme 1.1: Plant growth

Theme 1.2: Soil fertility and nutrient uptake–supply relationships

Theme 1.3: Water and water–nutrient interactions

Theme 1.4: Soil structure and soil tillage

### **Graduate School Experimental Plant Sciences (eps)**

<http://www.graduateschool-eps.info>

Aspecten van moleculaire achtergronden van ecofysiologische kenmerken van planten in:

Theme 3 metabolism and adaptation

Subtheme 3a Metabolites and Metabolic Pathways

Subtheme 3b Partitioning, Storage and Transport

Subtheme 3c Plasticity and Stress

**Netherlands Research School of Sedimentary Geology** <http://www.geo.vu.nl/users/nsgl>

Biogeological aspects:

<.....> The further coupling of geology with biology is another area of great potential for the future. The succesful development of work on this interface on issues such as the organic imprints of carbondioxide relationships and *Emiliana Huxleyi* and the marine research programme of nsg provides an excellent starting point for future work on the geo-biological aspects of Global Change.

The work on timescales, ocean-continent correlations, marine and organic geo-chemistry and the coupling of the marine record to the biosphere is also an area of continuing high priority research.

<.....> The further coupling of geology with biology is another area of great potential for the future. The succesful development of work on this interface on issues such as the organic imprints of carbondioxide relationships and *Emiliana Huxleyi* and the marine research programme of nsg provides an excellent starting point for future work on the geo-biological aspects of Global Change.



## **Bijlage 7. Biogeologische onderzoekprogramma's van enkele niet-universitaire onderzoekinstellingen**

### **nioo Nederlands Instituut voor Ecologie**

<http://www.nioo.knaw.nl>

The biosphere of the earth is the result of chemical, physical and biological processes that have been going on for more than three billion years. During this period, changes in the genetic material of organisms have interacted continuously with the organism's environment. In the course of history, this has generated life of an ever-increasing degree of complexity and diversity.

In the course of the evolution, there have been substantial changes in the numbers of species. Some periods, such as the present one, have seen a sudden and dramatic decline in the numbers of individual species. However, this is the first time that man has been responsible for mass extinction, with water, air and food supplies under threat by worldwide ecological changes resulting from human activity.

These large-scale ecological changes pose a formidable scientific challenge: insight is needed into how exactly they take place. The nioo has taken up that challenge: to investigate the role of man in ecology. Its research focuses on how organisms adapt to changing environments and particularly on the flexibility of organisms and populations under changing circumstances. In addition, the nioo studies how ecological communities and ecosystems function at macro-level, where, again, research centres around the question of adaptation to a changing environment. These two research areas constitute the nioo's core task, the final objective of which is to improve our understanding of how ecosystems and organisms function under changing conditions.

### **Koninklijk nioz Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee**

<http://www.nioz.nl/>

Koninklijk nioz is a research institute under the Netherlands Organization for Scientific Research (nwo). Its mission is to pursue multidisciplinary marine research related to phenomena and mechanisms in coastal and shelf seas as well as the open ocean and involves close co-operation between physicists, chemists, geologists and biologists. Apart from curiosity-driven research, the institute is also engaged in policy-focused and society-driven research.

To create an optimal framework to answer key questions in oceanography related to the functioning of marine ecosystems and their changes over time (i.c. climate change) most of the research is concentrated and organized in four major research themes:

- Transfer and transport of matter and energy in the sea
- Transfer of matter in sediments
- Ecology of marine species, community dynamics and biodiversity
- Temporal variability in marine systems and climate change

Per research theme a limited number of subthemes have been defined to delineate the research topics selected within the themes. Based on these themes and subthemes two priority areas of research have been selected:

I. Processes determining the transport of energy and matter in coastal, continental slope and ocean systems

II. Marine system variability through time

A central theme of research related to biogeology is the fate of organic compounds in the marine environment.

*Biogeochemistry* studies the molecular composition of natural organic compounds in marine organisms, in suspended and dissolved organic matter, and in recent and ancient sediments. The ultimate aim is to establish the origin and diagenetic pathways of different classes of compounds, and to reconstruct palaeoenvironments and changes thereof. The compounds present in the organic material are characterised by gas chromatography/mass spectrometry (gc/ms), and compound specific <sup>13</sup>C and <sup>14</sup>C-analysis. Cultures of living algae and zoöplankton are studied in co-operation with the department Biological Oceanography.

The molecular data together with other geochemical and biological data are used to reconstruct paleo environments and paleoclimate variability.

**nitg Nederlands Instituut voor Technische Geowetenschappen tno**

<http://nitg.tno.nl>

The Netherlands Institute of Applied Geoscience tno – *National Geological Survey* is the central geoscience institute in the Netherlands for information and research to promote the sustainable management and use of the subsurface and its natural resources.

Applied biogeological research is primarily carried out in the Geo-Environment Department, within the sections Paleoenvironmental Research and Geochemical Research.

### *Paleoenvironmental Research*

The section Paleoenvironmental Research is involved in the development and application of biogeological knowledge for research in the fields of environment and climate. Its expertise and activities include dating and characterising of subsurface strata (biostratigraphy, archaeology), characterising and tracing soil (geoforensic research), interpreting recent and possibly anthropogenic climate changes in the light of historical fluctuations in climate, and compiling and laying down biogeological data and standards (taxonomy, ecology, stratigraphy, geography). The section is linked with Utrecht University through the Knowledge Centre for Biogeology tno/uu.

### *Geochemical Research*

The Section Geochemical Research is part of the Integrated Geochemistry Laboratory, a joint venture of nitg and the Faculty of Earth Sciences of Utrecht University. The group is committed to providing high-quality geochemical and organic petrological support and expertise to industry, governmental agencies, universities and (foreign) research organisations. The group comprises a state-of-the-art laboratory dedicated to research and development of geochemistry and organic petrology.

### **Naturalis**

([www.naturalis.nl](http://www.naturalis.nl))

Naturalis is, behalve een museum, ook een wetenschappelijk instituut. De belangrijkste wetenschappelijke taak is het uitbreiden, in stand houden en onderzoeken van de collectie (ruim 10 miljoen) natuurhistorische objecten. Met behulp van deze dieren, stenen, mineralen en fossielen zijn wetenschappers voortdurend bezig om de kennis omtrent de collectie en de natuur te vermeerderen. Dankzij de collectie kan bijvoorbeeld worden onderzocht of bepaalde dieren nog steeds voorkomen op de plaatsen waar ze ooit in het verleden werden gevonden.

Onderzoekthema's zijn: Fauna Malesiana Marina, Collectie documentatie, Geologie van het Westmediterrane gebied, Biodiversiteit, Fauna Malesiana Terrestri-ca, Fauna van Nederland.

## Lijst met gebruikte afkortingen

alw	Aard- en Levenswetenschappen (nwo)
br	Biologische Raad (knav)
ccb	Climate Change and Biosphere Research Programme
ceme	Centrum voor Estuariene en Mariene Ecologie (nioo-knav)
cko	Centrum voor Klimaatonderzoek
cl	Centrum voor Limnologie (nioo-knav)
clivar	Climate Variability and Predictability
eps	Graduate School Experimental Plant Sciences
esf	European Science Foundation
ibed	Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics
icg	Interuniversitair Centrum voor Geo-ecologisch onderzoek
igbp	International Geosphere-Biosphere Programme
knav	Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen
knmi	Koninklijke Nederlands Meteorologisch Instituut
kun	Katholieke Universiteit Nijmegen
nioo	Nederlands Instituut voor Ecologie
nioo-ceme	Nederlands Instituut voor Ecologie – Centrum voor Estuariene en Mariene Ecologie
nioo-cl	Nederlands Instituut voor Ecologie – Centrum voor Limnologie
nioz	Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee
nitg	Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen tno
nsf	Netherlands Research School of Sedimentary Geology
nwo	Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek
pages	Past Global Changes
perc	Graduate School Production Ecology and Resource Conservation
rak	Raad voor Aarde en Klimaat (knav)
rivm	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
rug	Rijksuniversiteit Groningen
sense	Netherlands Research School for the Socio-Economic and Natural Sciences of the Environment
solas	Surface Ocean – Lower Atmosphere Study
trias	Tripartite Approach to Soil System Processes
uu	Universiteit Utrecht
uva	Universiteit van Amsterdam
vcbg	Verkenning Commissie Biogeologie



vu Vrije Universiteit Amsterdam  
wcrp World Climate Research Programme  
wl Delft Hydraulics  
wu Wageningen Universiteit  
wur Wageningen University and Research Center





