

Aardwetenschappen volgens het Systeem Aarde

deel 2: Grootschalige processen en voorspellingen

door Wolfgang Schlager
vertaald uit het Engels door Aukjen Nauta

Dit artikel is het tweede deel van een tweeluik over de aardwetenschappen vanuit het perspectief van de aarde als één geheel: het Systeem Aarde. Het eerste deel, dat verscheen in het juni-nummer 2009 van *Gea*, beschreef de opbouw van de aarde – kern, mantel en korst –, legde uit hoe, waar en met welke snelheid de verschillende schillen van de aarde materiaal en energie verplaatsen of uitwisselen, en plaatste dat in de theorie van de platen tektoniek.

Dit artikel gaat in op het voorspellen van vulkaanuitbarstingen en aardbevingen. Het beschrijft de voordelen van het Systeem Aarde in de zoektocht naar olie-, gas- en ertsvoorkomens en het onderzoek naar klimaatvariaties en de invloed van de mens op het klimaat. Deze onderwerpen liggen geologisch gezien sterk uit elkaar, maar in ieder speelt voor-

spelling een belangrijke rol en ze kunnen allemaal beschreven worden volgens de theorie van het Systeem Aarde.

Voorspellingen in de Aardwetenschappen

Het doen van voorspellingen is een belangrijke taak voor alle natuurwetenschappen. Dat is altijd zo geweest. Geologen bijvoorbeeld voorspellen al eeuwenlang waar in de ontoegankelijke ondergrond natuurlijke rijkdommen kunnen zitten, of wat de eigenschappen van de ondergrond zijn in verband met de aanleg van ondergrondse constructies. Nu de mensheid zich steeds meer gaat realiseren dat zij invloed uitoefent op haar

Prof. dr. Wolfgang Schlager is emeritus-hoogleraar Mariene Geologie aan de Vrije Universiteit van Amsterdam, deeltijd-professor aan de Universiteit Salzburg en adjunct-professor aan de Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science/University of Miami, USA. Hij heeft op 26 maart van dit jaar de Van Waterschoot van der Grachtpenning gekregen, de hoogste Nederlandse onderscheiding voor een aardwetenschapper.



Afb. 1. Mount St. Helens (Washington, NW-USA), een vulkaan in een subductiegebied, wordt continu gemonitord en is uitgebreid onderzocht. Recente erupties zijn zeer succesvol voorspeld, zoals de catastrofale explosie in mei 1980. (A) De vulkaan op 17 mei 1980. (B) De vulkaan op 18 mei 1980. (Foto's: US Geological Survey, Cascades Volcano Observatory, Vancouver, Washington, USA).



Afb. 2. Deze kaart van grote subductie-gerelateerde aardbevingen in de Stille Oceaan en het oostelijk deel van de Indische Oceaan laat zien dat subductiezones gebieden zijn met een hoog risico op aardbevingen. Blauwe lijnen: subductiezones; lichtbruine lijnen: andere plaatcontacten; dichte cirkels: aardbevingen bij subductiezones van 7,5 of groter sinds 1900; open cirkels: aardbevingen in de periode 1700-1900 en hun geschatte grootte (kaart is niet volledig). Het voorspellen van aardbevingen is nog steeds erg moeilijk, maar het Systeem Aarde biedt goede mogelijkheden om die gebieden op aarde aan te wijzen die gevoelig zijn voor aardbevingen. De aardbevingen in Californië staan niet op de kaart, omdat die gerelateerd zijn aan een transform fault (een breuk met een horizontale beweging) en niet aan een subductiezone (Van McCaffrey, 2007; met toestemming van de American Association for the Advancement of Science).

natuurlijke omgeving, komt er, naast deze klassieke taken, een nieuwe verantwoordelijkheid bij: het voorspellen van veranderingen in het systeem van oceaan en atmosfeer. Onderbouwd voorspellen is alleen mogelijk als alle facetten van het Systeem Aarde grondig bestudeerd worden. Hieronder volgen enige voorbeelden om dit te illustreren. Twee belangrijke theoretische concepten in verband met geologische voorspellingen zijn de niet-lineaire dynamica (non-linear dynamics) en de zelf-organiserende kritische toestand (self-organized criticality, oftewel SOC) (zie kaders).

Self Organised Criticality

Een SOC is een dynamisch systeem (zoals een geologisch systeem), dat een kritisch moment kent waarop plotseling veranderingen optreden. Een klassiek voorbeeld is een hoopje droog zand waarop van bovenaf steeds meer zand wordt gestrooid. Eerst ontstaat een kegelvormig bergje waarvan de helling steeds steiler wordt tot de kritische hoek bereikt is. Op dat moment is één extra korrel voldoende om op de zandberg een reeks zandlawines te ontketenen waarvan grootte, volgorde en exacte locaties onvoorspelbaar blijven. SOC is o.a. in staat om het statistische gedrag van aardbevingen, landverschuivingen, turbidieten en andere geologische fenomenen te verklaren (Bak, 1996; Jensen, 1998; Hergarten, 2002).

Vulkaanuitbarstingen

Het voorspellen van vulkaanuitbarstingen heeft in alle dichtbevolkte gebieden hoge prioriteit. Er is de afgelopen halve eeuw grote vooruitgang geboekt. Een aansprekend voorbeeld is Mount St. Helens in het noordwesten van de VS (afb. 1). De uitbarstingen van deze vulkaan zijn in de afgelopen 30 jaar met een grote betrouwbaarheid voorspeld. De 'grote gemene deler' van deze en andere succesvolle voorspellingen is de multidisciplinaire aanpak en de brede geologische benadering van het probleem. Mount St. Helens bezit een netwerk van observatiepunten dat continu de micro-aardbevingsactiviteit, de temperatuur en de oppervlaktedeformatie van de vulkaan meet. Naast deze meetgegevens worden alle beschikbare details van de geologische eruptiegeschiedenis van de vulkaan gebruikt en

gecombineerd met nauwkeurige analyses van de plaattektonische positie van de vulkaan.

Aardbevingen

Het tijdig voorspellen van aardbevingen blijkt veel moeilijker. Er zijn op dit moment nog geen betrouwbare indicatoren bekend die een aardbeving aankondigen. Het lijkt er sterk op dat aardbevingen zich gedragen volgens het principe van de Self Organized Criticality (SOC, zie kader). Als dat werkelijk zo is, dan is het vrijwel onmogelijk om aardbevingen 'per stuk' te voorspellen (Bak, 1996). Maar onderzoek volgens het principe van het Systeem Aarde levert toch veel op. Met behulp van de platen tektoniek kunnen wij met succes die plekken op aarde aanwijzen waar regelmatig zware aardbevingen voorkomen. Buitengewoon gevaarlijk in dat opzicht is de cirkel van subductiezones die rondom de snelspreidende mid-oceanische ruggen liggen in de Stille Oceaan en in het oosten van de Indische Oceaan (afb. 2). Deze voorspelling is gebaseerd op gegevens over de snelheid waarmee daar subductie plaatsvindt en kennis over warmteverdeling in de lithosfeer in dit gebied.

Om de schade veroorzaakt door aardbevingen zoveel mogelijk te beperken zijn twee dingen nodig: (1) meten en (2) waarschuwen. (1) Door de grote hoeveelheid gedetailleerde metingen van aardbevingen krijgen wij inzicht in de krachten die optreden tijdens een aardbeving. Deze kennis kunnen wij gebruiken om steeds specifiekere bouwkundige eisen te formuleren, zodat gebouwen beter bestand zijn tegen aardbevingen. (2) De waarschuwingssystemen voor aardbevingen zijn recentelijk uitgebreid met nieuwe types, die gebaseerd zijn op het feit dat de signalen van onze elektronische communicatiesystemen zich aanzienlijk sneller voortplanten dan de fysieke aardbevingsgolven in de aarde. Daardoor is er (enige) tijd om te waarschuwen en noodmaatregelen uit te voeren (Yamamoto et al., 2008). Iedereen weet sinds kerst 2004 dat er na een aardbeving een allesverwoestende tsunami kan ontstaan. Alle problemen bij het voorspellen van aardbevingen, en alle vooruitgang die geboekt is, hebben een direct effect op het voorspellen van tsunami's. Er is echter één heel groot verschil. Een tsunami ontstaat later in de keten van gebeurtenissen, die begint met een beweging langs een breuk in de lithosfeer. Hierdoor is er meer tijd om te waarschuwen. Een tsunami-waarschuwingssysteem zal dus altijd efficiënter zijn dan een waarschuwingssysteem voor aardbevingen (o.a. Gonzalez et al., 2005).

'Petroleumsystemen' als gereedschap voor de exploratie naar olie en gas

Dat de drie-eenheid 'moedergesteente, reservoir en afsluitende laag erboven' noodzakelijk is voor het ontstaan van olie- en gasvoorkomens, werd al aan het eind van de 19^{de} eeuw begrepen. Dit uitgangspunt is steeds verder verfijnd, tot in de jaren 1990 het idee van 'petroleumsystemen' de zoektocht naar olie en gas ging overnemen (Magoon en Dow, 1994). Deze aanpak neemt als rode draad de weg die de vloeistoffen gevolgd hebben door de gesteenten. Het probeert kwantitatief alle kritische gebeurtenissen te reconstrueren van dat deel van de geologische geschiedenis dat bepalend is geweest voor de vorming van olie en/of gas. Een geschiedenis die begon met de afzetting van een organisch rijk sediment waaruit het moedergesteente van de olie en het gas gevormd werd, het pad dat de olie en het gas gevolgd hebben door het bovenliggende gesteente, de vorming van een afzetting met gunstige reservoir eigenschappen en een afsluitende laag erboven, tot de ophoping van olie en gas in dat reservoir. In bepaalde gevallen daarna nog gevolgd door een periode van deformatie en omzetting. Het uitpluizen van deze geschiedenis is een enorme taak die kwantitatieve inzichten vereist in het sedimentatieproces, de geochemie van organische en anorganische stoffen en de tektoniek. De benadering volgens het petroleum-systeem reconstrueert tot in alle mogelijke details dat speciale hoofdstuk in de geschiedenis van de Aarde, om zo de locatie en de kwaliteit van de olie- en/of gasvoorkomens in de diepe ondergrond te voorspellen. De exacte architectuur van de begraven

Non-lineaire dynamiek en chaos

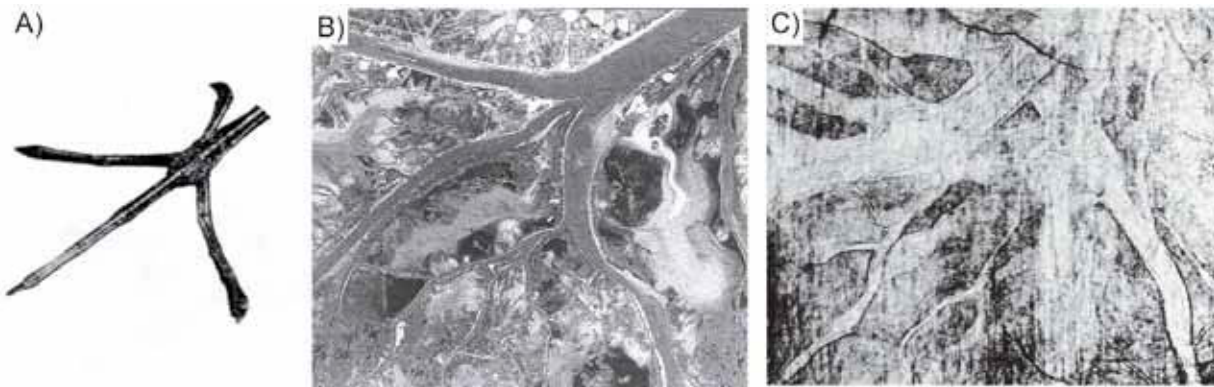
Door het verschijnen van grote, krachtige computers in de jaren '60 werd ontdekt dat bepaalde dynamische systemen extreem gevoelig zijn voor de startcondities bij een berekening. Deze systemen zijn deterministisch – er kan in de volgende stap maar één ding gebeuren – maar ze lijken niet deterministisch omdat de uitkomst drastisch kan veranderen door minuscule verschillen in de startcondities. Exacte voorspelling van deze 'chaotische' systemen vereist oneindig nauwkeurige kennis van de startcondities, iets wat onmogelijk is voor natuurlijke systemen. De differentiële vergelijkingen die chaotische systemen beschrijven zijn non-lineair, d.w.z. zij vertonen geen lineaire relatie tussen verstoring en effect. Hiervan afgeleid is de naam 'non-lineaire dynamica' voor dit wetenschapsgebied (Lorenz, 1993; Hergarten, 2002).

sedimentlichamen blijft echter onvoorspelbaar door het sterk non-lineaire aspect van sedimentatie (zie kader). Voorspelling van de sedimentarchitectuur wordt desalniettemin mogelijk door algemene sedimentatiemodellen te combineren met seismische beelden van de ondergrond (afb. 3).

Deze 'systeembenadering' wordt ook gebruikt in de exploratie en exploitatie van metallische ertsen. Met de komst van de platen tektoniek, onze groeiende inzichten over de vorming van de Aarde en de invloed van de zwaartekracht in de verdeling van elementen in korst en mantel, bezitten aardwetenschappers nu krachtige concepten om analyses te maken over het ontstaan van ertsvoorkomens en voorspellingen te doen (o.a. Blundell et al., 2005).

Siliciklastische gesteenten: studies van verwerking tot afzetting ('Source-to-sink')

De meeste sedimentaire gesteenten op onze Aarde zijn siliciklastisch (bestaan uit grind, zand, silt en klei). Deze gesteenten zijn zeer stabiel aan het aardoppervlak, in tegenstelling tot carbonaatgesteenten en evaporieten, die onder deze condities chemisch instabiel zijn. Het sediment dat door erosie vrijkomt in het achterland (de bergen) blijft dan ook intact tijdens de reis van de bergen naar de oceaan, de laatste rustplaats van het sediment. De *source-to-sink*-benadering van siliciklastische systemen combineert tektoniek, sedimentologie en stratigrafie met klimatologie en oceanografie. Ook dit is een voorbeeld in de moderne geowetenschappen om processen en hun interactie in een groter verband te bestuderen (Allen, 2008). De resultaten van deze benadering lijken zeer veelbelovend. Ik geef hier twee voorbeelden: de Ganges en de Karpaten. Het 3000 km lange riviersysteem van de Ganges heeft een betrouwbaar sedimentarchief opgebouwd van de klimaatveranderingen in het laatste deel van het Kwartair (Goodbread, 2003). Een sterkere zomerwoestijn bijvoorbeeld leidt tot grotere regenval en snellere erosie in de Himalaya, waar de Ganges haar brongebied heeft. Daardoor zullen de puinhellingen in het voorland van de Himalaya sterker ingesneden worden en zal er meer sediment afgezet worden in de onderzeese delta van de Ganges in de Golf van Bengalen. Klimaat signalen zijn zo binnen een paar duizend jaar terug te vinden in het hele systeem. Een ander voorbeeld van een studie waarbij de ontwikkeling van een orogene gordel in detail teruggevonden is in het geassocieerde sedimentaire bekken, is die van de Karpaten (de halve-maanvormige bergketen in Roemenië en de Oekraïne).

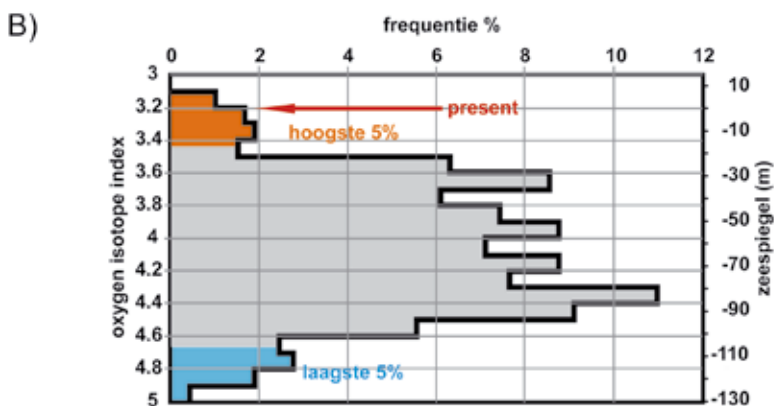
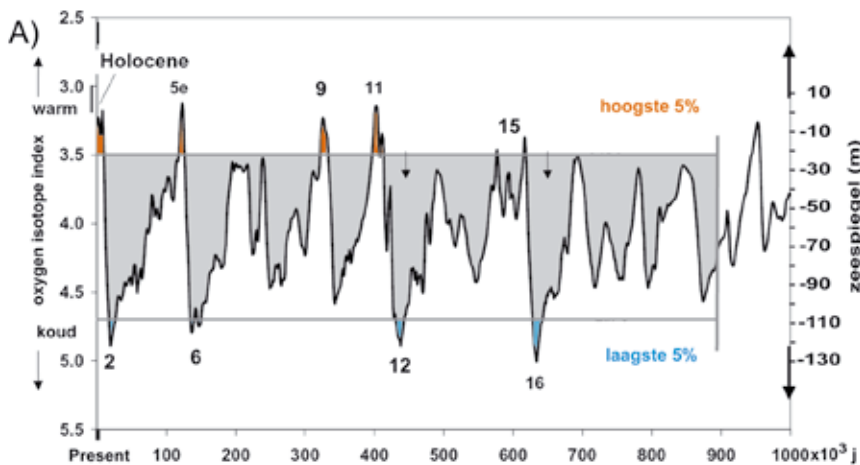


Afb. 3. Het voorspellen van de architectuur van een sedimentlichaam in de ondergrond is van groot belang voor het zoeken naar olie en gas, en voor andere activiteiten van de mens. Een systeem dat zich gedraagt volgens de non-lineaire dynamica legt grote beperkingen op aan het 'voorwaarts' voorspellen van sedimentpatronen, maar gelukkig levert het schieten van seismiek uitstekende beelden op.

(A) De anatomie van een vogelpoot is precies te voorspellen als bekend is om welke vogel het gaat.

(B) De geometrie van de Mississippi-delta, die lijkt op een vogelpoot, kan als grove vorm bepaald worden als de stromingsomstandigheden van de rivier, en de golfbewegingen van de zee waarin de rivier uitstroomt, bekend zijn. Een gedetailleerd beeld van het geulensysteem valt niet te voorspellen door het sterk niet-lineaire karakter van het transport en de afzetting van sediment.

(C) Het voorspellen van de vorm van een ondergronds sedimentlichaam wordt wel mogelijk door modellen van verschillende sedimentaire milieus te combineren met seismische beelden. Hier zijn geulen zichtbaar in 3D seismische beelden. (Naar Schollnberger, 1998; aangepast in Schlager, 2000).



De koppeling van source en sink is bijzonder duidelijk, doordat de brongebieden (het omhoog komende orogeen) erg dicht bij de centra van depositie liggen (het bekken wordt omringd door de Karpaten) (Cloetingh et al., 2005).

Klimaatverandering

Klimaatverandering en de rol van de mens daarin is de grootste uitdaging voor de mensheid nu. Pakken we dit probleem aan in de context van het Systeem Aarde, dan gaat het over de wisselwerking tussen atmosfeer, oceaan en het 'vaste' aardoppervlak. De klassieke geowetenschappen kunnen langetermijn-archieven leveren waarin de klimaatveranderingen in het verleden opgeslagen zijn. Dit is te vergelijken met de medische anamnese – de medische voorgeschiedenis – die een arts afneemt bij een patiënt. De anamnese van het klimaatstelsel is buitengewoon belangrijk om een 'diagnose' te kunnen stellen en een 'plan van aanpak' op te stellen in een systeem dat non-lineair is, en dat dus met kwantitatieve modellen niet exact 'vooruit' te berekenen is.

Afbeelding 4 geeft een voorbeeld van de inbreng van deze anamnese-techniek in de klimaatdiscussie. Het diagram laat zien dat de zee tijdens twee interglacialen verscheidene meters hoger heeft gestaan dan nu. Dit wijst er sterk op dat een deel van de bestaande ijsmassa op Aarde gevoelig is voor snel smelten. De antropogene emissies van kooldioxide (CO₂) zouden net dat extra zetje kunnen zijn om het ijs snel te laten smelten en de zeespiegel een aantal meters te laten stijgen. Dit scenario wordt waarschijnlijker als wij kijken naar de variaties in CO₂. Over de afgelopen 650.000 jaar varieerde de atmosferische CO₂-concentratie tussen ongeveer 180 en 300 ppm vrijwel parallel met de variaties in zeespiegelstand en temperatuur. Sinds 1950 is het CO₂-gehalte in de atmosfeer gestegen naar 370 ppm (IPCC, 2007, afbeelding 6.3), duidelijk hoger dan de concentra-

Afb. 4. Eustatische zeespiegelschommelingen van de afgelopen 900.000 jaar, gereconstrueerd met behulp van de verhouding van de stabiele zuurstofisotopen ($\delta^{18}O / \delta^{16}O$) in mariene kalkige microfossielen.

(A) De zeespiegelcurve laat zien dat hoge zeespiegelstanden, zoals in het Holoceen, in de laatste 900.000 jaar alleen maar in 5% van de tijd zijn voorgekomen. (B) Het frequentiehistogram van de zeespiegelcurve van (A) laat zien dat de Holoceen zeespiegelstanden hoog zijn, maar niet de allerhoogste. Er zijn hogere geweest gedurende twee interglacialen, waardoor het aannemelijk lijkt dat er nu ijsmassa's zijn die op instorten staan en snel zouden kunnen afsmelten als de temperatuur toeneemt. (Berger, 2008, aangepast).

ties tijdens de interglacialen uit het Kwartair. Dit betekent dat de huidige concentratie CO₂ in de atmosfeer volledig uit evenwicht is met de grootte van de huidige landijsvlakten. Verder afsmelten van het landijs, met de bijbehorende zeespiegelstijging, lijkt nagenoeg onontkoombaar.

Een ander voorbeeld van geologisch onderzoek naar klimaatverandering maakt gebruik van Scleractinia (hexakoralen). Korallen slaan informatie over de temperatuur en bijvoorbeeld het zoutgehalte van het zeewater ten tijde van hun groei op in hun kalkskelet door variaties in sporenelementen en de verhouding tussen stabiele isotopen. Veel korallen hebben jaarlijkse groeiringen, vergelijkbaar met de jaarringen van een boom. Die jaarringen, gecombineerd met de mogelijkheid om met ¹⁴C met grote precisie de leeftijd van de korallen te bepalen, leveren een archief op van de omstandigheden waaronder de korallen gegroeid zijn. Dit archief heeft een precisie van individuele jaren, soms zelfs nog nauwkeuriger.

Door het koraalarchief te kijken met instrumentele metingen uit het recente verleden, weten wij nu welke variaties horen bij welke temperatuur en bijvoorbeeld welk zoutgehalte. Deze kennis kan worden gebruikt voor het hele koraalarchief, dat veel verder teruggaat, zodat het nu mogelijk is om de groeicondities te bepalen over een periode van vele honderden jaren. Deze techniek is toegepast op korallen in het westelijk deel van de Indische Oceaan om het gedrag van El Niño / de Zuidelijke Oscillatie in de Stille Oceaan te voorspellen, waarbij de antropogene klimaatverandering in de berekeningen is meegenomen.

Onderwijs in het Systeem Aarde

Het idee van de Aarde als een systeem van componenten die elkaar beïnvloeden is relatief makkelijk uit te leggen aan middelbare scholieren of een geïnteresseerd publiek. Het idee maakt gebruik van levendige en goed aansprekende modellen en beelden en neemt zo weinig mogelijk abstractie toe. Er is veel minder kennis nodig om het Systeem Aarde te begrijpen, dan wat vereist was voor het onderwerp 'Aarde' toen ik op de middelbare school zat, 50 jaar geleden. Dat terwijl de hoeveelheid kennis zo enorm is toegenomen. Deze schijnbare paradox is te verklaren doordat het Systeem Aarde de werking van de Aarde uitlegt gebaseerd op een klein aantal basisprincipes (de zwaartekracht die zorgt voor de scheiding van materiaal; convectorie in iedere laag, maar per laag met zeer verschillende omloopnelheden, in gang gebracht en gehouden door de warmte uit de aardkern en de warmte van de zon). Het Systeem Aarde slaat zo twee vliegen in een klap: het legt uit hoe de Aarde werkt, verklaart bijvoorbeeld dat de vormen aan het aardoppervlak het gevolg zijn van de drijvende krachten in het binnenste van de Aarde, en legt uit hoe de Aarde zich ont-

wikkeld heeft. Dit laatste is mogelijk doordat convectie van de vaste Aarde zo traag is, dat de continentgrenzen zoals die nu zijn nog steeds tonen hoe deze massa's samengevoegd hebben gezeten in het supercontinent Pangea, ongeveer 250 miljoen jaar geleden.

Het leefmilieu op Aarde staat sterk onder druk door klimaatverandering, milieuvervuiling en de krimpende voorraden erts, olie en gas. De mens zal zijn omgeving alleen maar verder verstoren en dat zal consequenties hebben. Wereldwijde strategieën voor klimaatverandering, vervuiling en grondstoffen zouden gebaseerd moeten zijn op democratische beslissingen van politici en burgers met kennis van zaken. Onderwijs in het Systeem Aarde zou een goede stap kunnen zijn om de maatschappij voor te bereiden om op een verantwoorde manier beslissingen te nemen.

Geneeskunde als rolmodel voor de kennis van het Systeem Aarde

Geneeskunde is een 'systeemwetenschap' bij uitstek. Zij is afhankelijk van de natuurkunde voor de apparatuur (röntgen-apparatuur, NMR-scanners, etc.) en van de scheikunde voor nagenoeg alle medicijnen. Toch gaat iedereen naar een arts en niet naar een natuurkundige of scheikundige. Dit komt omdat de arts gezien wordt als de specialist van het systeem van het menselijk lichaam. Geowetenschappers moeten dezelfde rol krijgen als specialisten van het Systeem Aarde. De mensheid maakt zo intensief gebruik van onze planeet dat degelijk wetenschappelijk advies hard nodig is; niet alleen om ondergrondse hulpbronnen te vinden en te managen, maar ook om de verstoringen in onze natuurlijke omgeving in te schatten en te beheersen.

De geowetenschappen zouden zich ook moeten spiegelen aan de geneeskunde als het gaat om onderwijs. De geneeskunde kent vele specialisaties, maar toch is er nog steeds de traditie van algemeen, breed onderwijs dat het hele veld bestrijkt. Deze standaardkennis van iedere arts vormt de basis van medisch handelen in noodgevallen en van communicatie over de 'schuttingen' van de specialisaties. Geneeskunde leidt niet alleen specialisten op, maar onderwijst ook het brede publiek als het gaat om roken of vetzucht, zaken die iemands stijl van leven bepalen. De geowetenschappen zouden beide uitgangspunten moeten overnemen. Wij moeten het onderwijs in het Systeem Aarde grondiger aanpakken binnen onze eigen discipline, maar wij moeten ook zichtbaar worden voor het grote publiek en gaan meedoen in het openbare debat over klimaatverandering. Frank Press, een geoloog die ooit opklom tot wetenschappelijk adviseur van de president van Amerika, zei het als volgt (Press, 2008): "De ... uitdagingen die de mensheid vandaag de dag te wachten staan, maken het belangrijker dan ooit tevoren dat de wetenschappers van de Aarde hun kennis van onze planeet gebruiken ten bate van de samenleving en dat die samenleving hen uitnodigt om dat te doen."

Conclusies

- Na een eeuw van specialisatie ontwikkelt het Systeem Aarde zich razendsnel als een allesomvattend concept in de geowetenschappen.

- De zwaartekracht is verantwoordelijk voor de differentiatie van de aarde in lagen (sferen). In iedere laag komt convectie voor, maar doordat de grenzen tussen de lagen niet 'waterdicht' zijn, vindt er uitwisseling plaats van massa en energie tussen de lagen. Dit maakt de Aarde tot een complex systeem van componenten die effect op elkaar hebben.
- Het doen van voorspellingen in de aardwetenschappen (vulkanuitbarstingen, aardbevingen, voorkomens van olie, gas, of erts) gaat beter als het probleem geowetenschappelijk breed aangepakt wordt, waarbij alle relevante componenten meegewogen worden.
- Het concept van het Systeem Aarde is een goed platform voor onderwijs: het concept berust op heldere beelden en een beperkt aantal breed toepasbare principes. Ook is de minimaal vereiste kennis van de wiskunde tamelijk beperkt.

Bovenstaand artikel is de vertaling van het tweede deel van het artikel *Earth's layers, their cycles and Earth system science*, door Wolfgang Schlager, 2008. *Austrian Journal of Earth Sciences* 101, 4-17.

Referenties

- Allen, P.A., 2008. From landscapes into geological history. *Nature* 451, 274-276.
- Bak, P.A., 1996. *How Nature Works*. New York, Springer, 212 pp.
- Bak, P. et al., 1987. Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise. *Physical Review Letters*, 59, 381-384.
- Blundell, D. et al., 2005. Processes of tectonism, magmatism and mineralization: Lessons from Europe. *Ore Geology Reviews*, 27, 333-349.
- Cloetingh, S.A.P.L. et al., 2005. The evolution of the Carpathians-Pannonian system: interaction between neotectonism, deep structure, polyphase orogeny and sedimentary basins in a source to sink natural laboratory. *Tectonophysics*, 410, 1-14.
- Gonzalez, F.I. et al., 2005. The NTHMP tsunameter network. *Natural hazards*, 35, 25-39.
- Goodbread, S.L., 2003. Response of the Ganges dispersal system to climate change: a source-to-sink since the last interstade. *Sedimentary Geology*, 162, 83-104.
- Hergarten, S., 2002. *Self-Organized Criticality in Earth Systems*. Berlin, Springer, 272 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. 4th assessment report – working group 1: Geneva (IPCC Secretariat).
- Jensen, H.J., 1998. *Self-organized criticality*. Cambridge, Cambridge University Press, 154 pp.
- Lorenz, E.N., 1993. *The essence of chaos*. Seattle, University of Washington Press, 227 pp.
- Magoon, L.B. en Dow, W.G., 1994. The petroleum system. In Magoon & Dow, eds., *The petroleum system – from source to trap*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 60, 3-24.
- Yamamoto, S. et al., 2008. On the estimation of seismic intensity in earthquake early warning systems. *Geophysical Research Letters*, 35.