ORATIE

DE AARDE ALS ZWARTE DOOS

ROEL SNIEDER

DE AARDE ALS ZWARTE DOOS

REDE

UITGEPROKEN BIJ DE AANVAARDING VAN HET AMBT
VAN HOOGLERAAR IN DE SEISMOLOGIE
AAN DE FACULTEIT AARDWETENSCHAPPEN
VAN DE UNIVERSITEIT UTRECHT
OP 19 MEI 1994

DOOR

ROEL SNIEDER

Mijnheer de Rector Magnificus,
Zeer gewaardeerde toehoorders

De natuurwetenschap bestudeert de wonderbaarlijke wereld waarin wij leven. Hierbij richt de wetenschap veelal de aandacht op delen van de werkelijkheid die ver van onze directe belevingswereld staan. U kunt hierbij denken aan de astronoom die sterren bestudeert op afstanden die ons bevattingsvermogen te boven gaan, of aan de natuurkundige die elementaire deeltjes bestudeert die zo klein zijn dat ze een bizar gedrag vertonen. Door deze extremem wordt wellicht de indruk gewekt dat de onbekende terreinen in de natuurwetenschap horen bij extreem grote of kleine afmetingen. Niets is echter minder waar. Het inwendige van de planeet waarop wij leven was tot voor kort "Terra Incognita". De reden hiervoor is dat wij de Aarde slechts vanaf het oppervlak kunnen waarnemen. Door beperkingen in de techniek van diepe boorgaten is het slechts mogelijk tot een diepte van ongeveer 10 kilometer in de Aarde te boren. Vergeleken met de doorsnede van Aarde, ongeveer 13.000 kilometer, is dat bijzonder weinig. Als we de Aarde met een appel zouden vergelijken is deze 10 kilometer op de doorsnede van de Aarde vele malen kleiner dan de dikte van een appelschil op de doorsnede van een appel. Dit betekent dat slecht enkele kilometers onder onze voeten zich een wereld bevindt die wij niet kunnen onderzoeken door er gaan kijken of door er monsters te nemen. Het zal u duidelijk zijn dat we het inwendige van een appel niet kunnen bepalen door alleen aan de schil van een appel te krabben. Evenzo kunnen wij het inwendige van de Aarde niet begrijpen door alleen het aardoppervlak te bestuderen.

De Aarde als zwarte doos

Dit betekent dat wij onze planeet alleen kunnen begrijpen door haar als zwarte doos op te vatten. Het klassieke probleem van de zwarte doos is het volgende. Stel iemand geeft u een zwarte doos die u niet open kunt maken. U bent natuurlijk nieuwsgierig wat er in die doos zit, want mensen hebben nu eenmaal een onbedwingbare nieuwsgierigheid. Aangezien u de doos niet kunt openen bestudeert u de inhoud van de doos van buiten. U zult de doos schudden of u zult er op kloppen, u zult de doos wellicht wegen, misschien ruikt u er aan of bedenkt u andere manieren om de doos te onderzoeken. Maar wat u ook doet, uw experimenten zijn er op gericht om de inhoud van de doos te bepalen zonder de doos open te maken. In dat proces formuleert u voor uzelf veronderstellingen over de inhoud van de doos. Deze veronderstellingen toetst u dan steeds aan de waarnemingen, en langzaam aan bouwt u voor uzelf een steeds nauwkeuriger model van de inhoud van de zwarte doos op. Wellicht bent u zich daar niet van bewust, maar in dit proces gaat u precies zo te werk als wetenschappers die een object onderzoeken dat ze niet direct kunnen bekijken. Het zal u uit het voorgaande duidelijk zijn dat we onze planeet slecht kunnen te hopen te begrijpen door haar als zwarte doos te behandelen.

Hoe kunnen we Aarde dan van buiten onderzoeken? We kunnen onze planeet wegen door de baan van de Aarde om de zon te meten. We kunnen de massaverdeling in de Aarde bepalen door de baan van satellieten te bestuderen. De electrische eigenschappen van de Aarde volgen uit waarnemingen van de variaties in electromagnetische velden om de Aarde. We kunnen op de Aarde 'kloppen' door de signalen van aardbevingen of kernproeven te analyseren. Er bestaan zo vele voorbeelden van technieken die gebruikt kunnen worden om het inwendige van de Aarde te bestuderen. Deze technieken hebben een ding gemeen, ze gebruiken de natuurkunde om waarnemingen aan het aardoppervlak te koppelen aan de samenstelling van de Aarde. Het is om deze reden dat de Geofysica, de natuurkunde van de Aarde, zo'n cruciale rol speelt bij het onderzoek naar de structuur van onze planeet. Reeds 20 jaar is binnen de Universiteit Utrecht gewerkt aan een beschrijving van de Aarde op wis- en natuurkundige grondslag. Hiermee heeft de Nederlandse Geofysica zich een prominente plaats verworven binnen de moderne aardwetenschappen.

Ik wil met u terugkomen op het model van de zwarte doos. Het kloppen op de doos is één van de meest effectieve manieren om de inhoud te onderzoeken. Binnen de aardwetenschappen "kloppen" we op de Aarde door de signalen van aardbevingen of kernproeven te bestuderen. Dit is het werkterrein van de seismologie. Binnen de seismologie wordt ernaar gestreefd de stuctuur van het inwendige van de Aarde te bepalen door de voortplanting van elastische golven door de Aarde te bestuderen. Naast de bepaling van de aardstructuur zijn aardbevingen als bron van deze golven object van studie binnen de seismologie. Behalve een direct maatschappelijk belang van aardbevingsonderzoek, geeft het mechanisme van aardbevingen belangrijke aanwijzingen over de spanningen in de Aarde.

De seismologie in Utrecht

Het seismologische onderzoek aan de Universiteit Utrecht heeft drie facetten; observationeel, theoretisch en toegepast. Het observationele onderzoek wordt uitgevoerd door een netwerk van seismologische stations te gebruiken. Deze seismologische stations bestaan ieder uit drie seismometers die de bodembeweging in drie richtingen registreren. Het Netwerk van Autonoom Registrerende Seismografen, ook wel NARS genoemd, zal dit jaar in de voormalige Soviet Unie geplaatst worden. Dit project zal unieke gegevens opleveren omdat de Soviet autoriteiten zich tot ongeveer 1990 altijd verzet hebben tegen de plaatsing van seismometers in de Soviet Unie in verband met de mogelijkheid om kernproeven met deze instrumenten te detecteren. Door de politieke veranderingen in het GOS wordt het mogelijk een nieuw gedeelte van de aardmantel te onderzoeken.

Het theoretische onderzoek binnen de seismologie richt zich op het beschrijven van de voortplanting van elastische golven door de Aarde. Hiernaast worden nieuwe technieken geformuleerd om beelden van het inwendige van de Aarde te vervaardigen. Ik zal later in meer detail op deze aspecten ingaan.

Zowel het obervationele als het theoretische onderzoek krijgen pas echt waarde wanneer het gecombineerd wordt. Dit gebeurt onder meer door moderne beeldvormings technieken toe te passen op nieuwe seismologische waarnemingen. Het is in deze fase van het onderzoek dat een duidelijke meerwaarde wordt verkregen. Voor de observationeel seismoloog is dit een verheugende fase van het onderzoek, zij ziet dat de verkregen gegevens leiden tot beelden van het inwendige van de Aarde. Voor de theoretisch seismoloog geldt dit ook, maar daarnaast is het voor hem een ontnuchterende ervaring; hij moet uit zijn ivoren toren klimmen en constateren dat de werkelijkheid aanmerkelijk complexer is dan de modellen die hij heeft geconstrueerd. Deze ervaring vormt echter een integraal onderdeel van goed theoretisch onderzoek dat consequenties voor de praktijk heeft.

Mijn eigen achtergrond ligt binnen de theoretische natuurkunde. Het zal u daarom niet verwonderen dat ik binnen de seismologie de grootste affiniteit met het theoretische onderzoek heb. Zonder afbreuk te willen doen aan het belang van het observationele en toegepaste seismologische onderzoek, wil ik me in deze reden daarom richten op het theoretische onderzoek in de seismologie en met name op de rol van de wiskunde in dit onderzoek. Ik zal u daarbij duidelijk maken waarom de wiskunde een natuurlijk spanningsgebied binnen de aardwetenschappen is.

Onze planeet

Voor ik op de rol van de wiskunde in de aardwetenschappen kan ingaan, wil ik u iets meer vertellen over de Aarde. De Aarde is beslist geen klomp steen die door het heelal zweeft. De Aarde heeft een zeer complexe samenstelling en opbouw. Het inwendige van de Aarde is ook niet in evenwicht; zowel de temperatuur in de Aarde als de verdeling van de verschillende chemische elementen binnen de Aarde veranderen met de tijd. De Aarde maakt een evolutie door.

De evolutie van de Aarde wordt gedomineerd door twee processen, afkoeling en differentiatie. Bij de vorming van de Aarde is een gigantische hoeveelheid zwaartekrachts energie in warmte omgezet. Daarnaast wordt continue een grote hoeveelheid warmte in de Aarde gegenereerd door radioactief verval; we leven op een grote kerncentrale! Uiteindelijk wordt deze warmte vanaf het aardoppervlak uitgestraald naar de ruimte, maar voor het zover is moet de warmte eerst naar het aardoppervlak reizen. Ten dele gebeurt dit door geleiding van warmte. Hiernaast wordt een grote hoeveelheid warmte getransporteerd door stromingen in het inwendige van de Aarde.

Het bevreemdt u wellicht dat ik spreek van stromingen in de vaste Aarde. U kunt de aardmantel het beste vergelijken met glas. Een glazen ruit die een eeuw in een sponning staat is merkbaar uitgezakt. Op zeer lange tijdschalen gedragen zowel een vensterruit als de aardmantel zich eerder als een vloeistof dan als een vaste stof. Voor de Aarde zijn deze vloeistofbewegingen met name van belang omdat ze nauw gerelateerd zijn aan het optreden van plaattektoniek. Zonder plaattektoniek zouden verschijnselen als continentale drift, vulkanisme en niet te vergeten aardbevingen, hetzij afwezig zijn of een geheel ander karakter hebben.

Met differentiatie wordt het proces bedoelt dat de verschillende elementen en mineralen in de Aarde zich van elkaar scheiden. Grofweg gezegd zinken zware componenten diep in de Aarde en drijven de lichte componenten aan het aardoppervlak. Dit is echter een overgesimplificeerde weergave van zaken omdat de chemie en de faseovergangen in de verschillende componenten waaruit de Aarde is opgebouwd een belangrijke rol spelen. De evolutie van de Aarde wordt sterk door differentiatie beinvloed. Zonder differentiatie zou de Aarde geen vloeibare buitenkern hebben. De differentiatie vormt mede de motor voor de stromingen in deze buitenkern, en is daarmee de oorzaak van het aardmagneetveld.

In de praktijk zijn de processen van afkoeling en differentiatie sterk gekoppeld. Om een voorbeeld te geven, de oudste continenten liggen al bijna 4 miljard jaar aan het aardoppervlak. Dit is veroorzaakt door de combinatie van een mechansche starheid door thermische afkoeling met een afwijkende chemische samenstelling ten gevolge van differentiatie. Het voorgaande moge aantonen dat de Aarde een complex geheel is en daarmee een intrigerend object van onderzoek is.

Ondanks al deze complexe factoren is de structuur van de Aarde in eerste orde gelaagd, we kunnen de Aarde als meest ruwe model opvatten als een toverbal waarin de verschillende lagen als bolschillen om elkaar heen liggen. Dit bolvormige aardmodel, dat overigens met seismologisch onderzoek is verkregen, geeft tot op enkele procenten een nauwkeurige beschrijving van het inwendige van de Aarde. Aardwetenchappers zijn echter vaak juist geinteresseerd in de afwijking van deze bolsymmetrie. In een perfect bolvormige Aarde zouden geen continenten en oceanen zijn. Gebergten, vulkanen en aardbevingen zouden er niet voorkomen, en delfstoffen zouden niet op bepaalde plaatsen accumuleren. In een bolvormige Aarde zou ook geen convectie optreden, omdat de convectie stromingen gedreven worden door de horizontale variaties in de massadichtheid in de Aarde. Om deze redenen is het juist de afwijking van de bolsymmetrie van de Aarde die voor veel aardwetenschappers van belang is. Het is om deze reden dat het moderne seismologische onderzoek zich richt op de bepaling van de horizontale variaties van de aardstructuur.

De kracht van de wiskunde

Om de inwendige structuur van de Aarde te kunnen bepalen is de wiskunde onontbeerlijk. Waarom speelt de wiskunde zo'n speciale rol? Ik zie de wiskunde graag als een speciale taal. De wiskunde is de enige taal die tot onze beschikking staat die een structuur heeft die de logische opbouw van de wereld om ons heen in zich draagt. Daarnaast is het een taal die zich bij uitstek leent om zaken te kwantificeren; de wiskunde gebruikt getallen. Hiermee wil ik overigens beslist niet zeggen dat de wiskunde de optimale taal is om alle aspecten van de werkelijkheid te beschrijven, integendeel. Echter het kwantitatieve aspect van de wiskunde maakt het mogelijk om metingen, die uiteindelijk getallen zijn die een aspect van de werkelijkheid beschrijven, te analyseren. De logische syntax van de wiskunde maakt haar bij uitstek geschikt voor de bestudering van oorzaak-gevolg relaties.

Lineariteit versus niet-lineariteit

In de wis- en natuurkunde wordt een onderscheid gemaakt tussen lineaire en niet-lineaire processen. Een proces is grofweg gezegd lineair als een twee keer zo grote oorzaak tot een twee keer zo groot gevolg leidt. Dergelijke processen voldoen aan het zo belangrijke superpositie princiepe: indien verschillende oorzaken tegelijk werkzaam zijn kan men de gevolgen optellen. De wiskunde die in de natuurwetenschap gebruikt wordt is voor een zeer groot deel lineaire wiskunde. In het algemeen is de lineariteit slechts een benadering van de werkelijkheid.

De lineaire wiskunde is veel simpeler dan de niet-lineaire wiskunde. Gelukkig is de voortplanting van elastische golven door de Aarde een lineair proces. Als dit niet zo zou zijn dan zou de golfvoortplanting afhangen van de sterkte van een aardbeving, gelukkig is dat niet het geval. Aangezien de lineaire wiskunde goed ontwikkelt is, is een breed scala aan wiskundige technieken beschikbaar voor het beschrijven van deze golfvoortplanting. Er is echter een uitzondering op de lineariteit binnen de aardwetenschappen die ik u niet wil onthouden, het betreft het optreden van aardbevingen. In de seismische haard overschreidt de optredende spanning de sterke van het gesteente. Het materiaal breekt en fragmenteerd, waarbij elastische golven uitgestraald worden. Om deze reden kan het optreden van aardbevingen niet begrepen worden zonder niet-lineair materiaal gedrag te bestuderen. Gezien de expertise binnen de faculteit Aardwetenschappen op zowel het gebied van het experimentele materiaal onderzoek onder hoge druk en temperatuur, als op het gebied van de seismologie, is dit een tak van onderzoek die binnen onze faculteit verder tot ontplooiing gebracht zou moeten worden.

De noodzaak van benaderingen

Ik heb over de kracht van de wiskunde gesproken. U moet echter geen al te hoge verwachtingen hebben van de problemen in de natuurwetenschap waarvoor exacte wiskundige oplossingen bestaan. In de klassieke mechenica is het drie-deeltjes probleem, dat is het probleem waar drie deeltjes bewegen en krachten op elkaar uitoefenen, al niet meer oplosbaar. In de quantummechanica is het één-deeltjes probleem veelal niet meer exact oplosbaar. In de quantum-electrodynamica is geen-deeltjes probleem, dat wil zeggen de vacuum toestand, een grote complicatie. Ook in de seismologie bestaat er voor een willekeurige verdeling van de seismische snelheid in het algemeen geen exacte oplossing die de voortplanting van seismische golven beschrijft.

Dit maakt het noodzakelijk om benaderingen te maken. Ik zie dat echter allerminst als een zwaktebod. De vergelijkingen die bijvoorbeeld de voortplanting van golven door de Aarde beschrijven zijn ongelofelijk complex. De oplossing van deze vergelijkingen is zo mogelijk nog complexer door de vele manieren waarop een golf door de Aarde kan lopen. In de praktijk zijn vaak een deel van de termen in een complexe vergelijking van ondergeschikt belang. Evenzo, kan het zijn dat een golf op zeer veel manieren door de Aarde kan lopen, maar dat in de praktijk slechts een bepaalde klasse van golfpaden een relevante bijdrage geeft. Het is om deze redenen vaak mogelijk om termen uit de wiskundige vergelijkingen of uit de oplossing van deze vergelijkingen te verwijderen zonder de waarheid een onaanvaardbare hoeveelheid geweld aan te doen. Dit leidt er niet alleen toe dat het probleem oplosbaar wordt, in het het algemeen vergroot dit proces ook het fysische inzicht. Men verwijdert immers alle complicaties uit het probleem die van ondergeschikt belang zijn, het is een methode om tot de essentie van het probleem door te dringen.

Logica en creativiteit

Het zal u duidelijk zijn dat het gebruik van benaderingen zekere risico's met zich meedraagt, de kans bestaat immers dat men het kind met het badwater weggooid. Hoewel de wiskunde de taal van de logica is, is het bedrijven van de wiskunde en het maken van de juiste benaderingen allerminst een logische aangelegenheid. Dit lijkt wellicht een paradox, maar deze paradox zult u begrijpen als u het belang inziet van goede benaderingen. Goede benaderingen zijn in het algemeen gebaseerd op een goede fysische intuitie, het is immers deze intuitie die ons in staat stelt de relevante zaken te scheiden van de complicerende irrelevante aspecten. Deze intuitie heeft noodzakelijkerwijs geen logische grondslag omdat zij is gebaseerd op onze subjectieve inschatting van de werkelijkheid. Het is in deze scheiding tussen relevante en niet relevante zaken waar voor mij een belangrijk deel van de creativiteit in het onderzoek gelegen is. De verdere uitwerking van deze creativiteit is dan verder grotendeels een logische aangelegenheid.

Baanbrekend onderzoek is gebaseerd op creativiteit, het zijn zelden logische stappen of routinematige metingen die tot fundamenteel nieuwe inzichten leiden. Het is om deze reden van groot belang dat de universiteit voorwaarden schept voor creatief onderzoek. Het is mijns inziens een zware uitdaging voor universitaire bestuurders om in een maatschappij die in toenemende mate een ambtelijk karakter krijgt voorwaarden te scheppen voor werkelijk creatief onderzoek.

De rol van computers

Voor het wetenschappelijk onderzoek maken we een interessante periode mee doordat steeds snellere en goedkopere computers in hoog tempo beschikbaar komen. Dit is van groot belang omdat het mogelijk is de werkelijkheid in computers na te bootsen. Hierdoor is men in staat gecontroleerde experimenten te doen die men anders nooit zou kunnen uitvoeren. Men moet zich echter realiseren dat computers slechts een versimpelde versie van de werkelijkheid kunnen nabootsen. Een mooi voorbeeld komt uit de meteorologie. De basiswetten die de atmosfeer beschrijven maken het mogelijk dat geluidsgolven zich door de atmosfeer kunnen voortplanten. Als dit niet zo zijn zou u me niet kunnen horen spreken. Geluidsgolven hebben een frequentie van enkel honderden of duizenden Hertz. Vergeleken met het tempo waarin het weer zich ontwikkeld, we praten dan over uren of dagen, is de geluidsgolf dus zeer hoogfrequent. Deze discrepantie in de tijdsduur geeft grote problemen bij het ontwikkelen van computer modellen voor de weersvoorspelling. Dit probleem wordt opgelost door uit de vergelijkingen die de atmosfeer beschrijven termen te verwijderen zonder welke de geluidsgolf niet kan bestaan, maar die voor de ontwikkeling van het weer van weinig belang zijn. Net als in het gebruik van benaderingen in de wiskunde, is het dus ook met computers noodzakelijk om benaderingen te maken om het probleem te kunnen oplossen. Hierin ligt echter ook de grote kracht van computers, men kan de complexe factoren van de werkelijkheid één voor één uitschakelen. Op deze wijze kan men de hoofdzaken van de bijzaken scheiden waardoor ons begrip van de werkelijkheid sterk vergroot wordt.

De rol van materiaal eigenschappen

De Achilles-hiel van iedere modelsimulatie op computers is dat men de eigenschappen van het model moet voorschrijven. De uitkomsten van een modelsimulatie zijn uiteraard nooit beter dan de eigenschappen van het model dat men gebruikt heeft. We komen hier dan ook aan één van de belangrijkste raakvlakken tussen de seismologie en de andere aardwetenchappen. Aangezien de seismologie informatie levert over de seismische snelheden en de massadichtheid in de Aarde, kan deze discipline belangrijke randvoorwaarden leveren voor het overige aardwetenschappelijke onderzoek.

Het gebruik van modellen voor de seismische snelheid binnen de rest van aardwetenschappen is echter niet zonder problemen. De reden hiervoor is dat de seismische snelheid niet op simpele wijze te relateren is aan grootheden waar andere aardwetenschappers mee werken. U kunt daarbij denken aan grootheden als de temperatuur, de vervormings eigenschappen, de diffusie- of uitzettingscoefficient of bijvoorbeeld de deformatiesnelheid. Om deze relatie te leggen is verdere informatie nodig.

De omkeerbaarheid van de tijd

In dit proces raken we aan het fundamentele probleem van de omkeerbaarheid van de tijd. De fundamentele wetten in de natuurkunde zijn invariant voor tijdsomkeer. Dit is een moeilijke manier om te zeggen dat als men de tijd de andere kant op laat lopen deze natuurwetten niet veranderen. Dit geldt voor de wetten van de klassieke mechanica (de wet van Newton), de wetten van de quantummechanica (de Schrödinger vergelijking) en bijvoorbeeld de wetten van het electromagnetisme (de Maxwell vergelijkingen). Deze omkeerbaarheid van de werkelijkheid is duidelijk in strijd met onze waarnemingen. De volgende karikaruur kan dit verduidelijken.

Beschouw een stad die in puin in gelegd door een aarbeving. Gebouwen zijn ingestort, de resten staan in brand. Plotseling concentreert de thermische energie van de vlammen zich tot chemische energie van het materiaal dat in brand stond. De puinhopen richten zich op tot statige bouwwerken, en seismische golven lopen weg van het rampgebied. Deze golven convergeren van alle delen van de wereld naar het epicentrum. Daar komt het golfveld op miraculeuze wijze tot rust, en in dat proces heelt het gefragmeenteerde gesteente in de breuk zone. De Aarde blijft vervolgens in serene rust, maar staat daarbij onder grote spanning.

Dit voorbeeld is natuurlijk absurd. Er is echter niets in de fundamentele natuurwetten die dit scenario verbiedt. Het is echter een zeer onwaarschijnlijk scenario. Een dergelijk scenario is echter niet mogelijk indien men regels voorschrijft die de diffusie van warmte of materiaal beschrijven. Diffusieverschijnselen zijn zeker niet invariant voor tijdomkeer. Thermsiche energie stroomt bijvoorbeeld van warme naar koude gebieden. Laat men de tijd teruglopen dan zou de thermische energie van koude naar warme gebieden stromen, er is in dat geval dus geen symmetrie voor tijdsomkeer. Een diffusiewet kan echter nooit een fundamentele natuurwet zijn, omdat er altijd een kleine kans is op een thermische fluctuatie waardoor warmte wel van koude naar warme gebieden stroomt.

We kunnen nu begrijpen waarom het gebruik van seismologische modellen binnen de aardwetenschappen verdere aandacht nodig heeft. Zoals eerder gezegd, de evolutie van de Aarde wordt gedomineerd door twee processen: afkoeling en differentiatie. Beide processen hebben een statistisch karakter en zijn zeker niet invariant voor tijdsomkeer. Zo is het bijvoorbeeld volkomen onwaarschijnlijk dat de aardkorst zich spontaan zal mengen met de onderliggende mantel. Voor de golfvoortplanting waar de seismologie op gebaseerd is, is tijdsomkeer een fundamenteel gegeven, er is zelfs een reciprociteits stelling. De oplossing voor deze paradox is de tijdsschaal waarop de verschillende processen optreden. Seismische golven hebben een trillingstijd tussen tienden van seconden en enkele honderden seconden. Diffusie en deformatie in de Aarde vinden plaats op een tijdschaal van tienduizenden tot miljoenen jaren. Het materiaal in de Aarde gedraagt zich net als glas op een korte tijdschaal als vaste stof op een wijze die invariant is voor tijdsomkeer, maar op een lange tijdschaal heeft het meer het karakter van een vloeistof die sterk door dissipatie van energie wordt beinvloed.

Het is deze discrepantie in tijdsschalen die het moeilijk maakt modellen in de seismische snelheid direct en op simpele wijze te relateren aan grootheden die voor andere aardwetenschppers van belang zijn. Er zijn twee manieren om uit deze impasse te raken. De eerste is om alleen de patronen van seismologische modellen te gebruiken en de grootte van de snelheids afwijkingen te negeren. Dit is in wezen de huidige gang van zaken. Seismologische modellen worden tegenwordig veelal gebruikt om zichtbaar te maken dat een bepaalde afwijkende structuur aanwezig is. Deze aanpak is puur kinematisch, men beschrijft de beweging maar bekommert zich er niet om wat de hierbij behorende krachten en processen zijn. De tweede manier om uit deze impasse te raken is door kennis op het gebied van de materiaal eigenschappen op meer geavanceerde manier te gebruiken bij de interpretatie van seismologische modellen. Als men bijvoorbeeld een subductie zone in een seismologisch model ziet, dan weet men dat een oceanische plaat onder een continent duikt. Er is veel bekend over de samenstelling en materiaal eigenschappen van oceanische platen. Door deze kennis van materiaal eigenschappen te integreren met de seismologische modellen kan voortgang geboekt worden bij het formuleren van nauwkeurige dynamische modellen voor onze planeet.

De uitdaging in het seismologische onderzoek

In het seismologische onderzoek liggen mijns inziens drie uitdagingen. Twee daarvan hebben te maken met de manier we met seismologische gegevens omgaan, de derde uitdaging heeft te maken met de te onderzoeken aardstructuren. Binnen de aardwetenschappen komen momenteel in hoog tempo grote hoeveelheden gegevens beschikbaar. Het betreft hier niet alleen grote hoeveelheden digitale seismologische gegevens verzameld met een reeks van seismologische netwerken, maar bijvoorbeeld ook geodetische gegevens, metingen van het aardmagneetveld van de isotopen samenstelling van materialen, en niet te vergeten een grote hoeveelheid informatie op het gebied van de materiaal eigenschappen onder hoge druk en temperatuur. Het is een enorme uitdaging om deze gegevens te integreren in aardwetenschappelijke studies.

De tweede uitdaging ligt binnen de seismologie en bestaat uit het gebruik van andere seismologische gegevens dan reistijden en dispersie metingen van oppervlakte golven. Beide gegevens zijn de werkpaarden van de klassieke seismologie. Hoewel het robuste indicatoren zijn voor de aardstructuur, zijn ze niet erg gevoelig voor details van de aardstructuur omdat ze slechts samenhangen met integralen van de aardstuctuur. Utrechts onderzoek op het gebied van de seismologie heeft laten zien dat het mogelijk is de seismologische gegevens op andere wijze te gebruiken. Gezien de beschikbaarheid van grote hoeveelheden seismologische data is op dit gebied nog veel werk te verrichten waarvoor zowel een theoretische als een observationele inspanning vereist is. Hierbij moeten de conflicterende doelen van een verhoogde resolutie en een verlaagde statistische significantie voortdurend tegen elkaar afgewogen worden.

Direct hieraan gerelateerd is de derde uitdaging. Ik wil hierbij volstaan met het stellen van een aantal vragen waarop momenteel geen duidelijk antwoord bestaat maar waar de seismologie kan helpen om de antwoorden te vinden. Tot welke diepte hebben continenten een afwijkende structuur van ander mantelmateriaal? Hoe zien botsings- en schuifzones er op diepte uit? Ik denk hierbij dan bijvoorbeeld aan de diepe structuur van de Tornquist-Tesseyre lijn. In hoeverre is de gelaagdheid van continenten stabiel, en waar treedt een inversie van de dichtheid op? Wat is het spectrum van lengteschalen van heterogeniteiten in de Aarde? Is dit spectrum verschillend in de bovenmantel en in de benedenmantel? Wat zijn de implicaties hiervan voor het optreden van convectie in de aardmantel? Ik zou deze lijst van vragen veel langer kunnen maken, en iedere specialist in de aardwetenschappen zou hier vragen aan toe kunnen voegen. Ik wil hierbij duidelijk stellen dat ik er bijzonder open voor sta om het seismologische onderzoek mede te richten op de vragen die door collega aardwetenschappers gesteld worden.

De wiskunde als spanningveld binnen de aardwetenschappen

Nabij het einde van mijn rede wil ik terugkomen op de rol van de wiskunde in de aardwetenschappen. Hierbij wil ik u drie voorbeelden geven die betrekking hebben op de toepasbaarheid van de wiskunde. Het eerste voorbeeld bestaat uit de invloed van een veranderende massaverdeling in de Aarde op de aardrotatie. Hierbij kunt u bijvoorbeeld denken aan het afsmelten van ijskappen sinds de laatste ijstijd. Het effect hiervan op de aardrotatie volgt op exacte wijze uit de wet van het behoud van impulsmoment. De wiskunde is volledig adequaat om hier een beschrijving van te leveren. Het tweede voorbeeld is een levende cel in de biologie. Geen bioloog zou het in zijn hoofd halen om een complete cel met behulp van de wiskunde te beschrijven. De reden hiervoor is dat een cel een te gecompliceerd object is om met een eventueel groot aantal vergelijkingen te beschrijven. Men kan hooguit een wiskundig model maken van bepaalde aspecten van een cel, zoals bijvoorbeeld de waterhuishouding van een cel. Het derde voorbeeld bestaat uit de vragen over de mysteries van het leven waar de mensheid al duizenden jaren mee worstelt. Men kan stellen dat de wetenschap, en zeker de wiskunde geen enkele vooruitgang op dit gebied heeft gebracht.

We gaan op een verbazend achteloze wijze om met de toepasbaarheid van de wiskunde. Zo gaan we er binnen de natuurkunde vanzelfsprekend van uit dat als natuurwet A geldt, en dat als we met behulp van de wiskunde natuurwet B uit de natuurwet A afleiden, dat deze nieuwe natuurwet B ook waar is. Hoewel er geen enkel princiepe is dat ons verteld dat dit het geval is, werken we er dagelijks mee. Aan de andere kant vindt iedereen het bijvoorbeeld vanzelfsprekend dat de wiskunde geen uitkomst biedt voor ethische problemen. De eerder genoemde voorbeelden laten zien dat de toepasbaarheid van de wiskunde sterk samenhangt met de complexiteit van het systeem dat beschreven wordt.

Het is juist om deze reden dat de wiskunde door de verschillende disciplines binnen de aardwetenschappen zo verschillend gewaardeerd wordt. Het zal u duidelijk zijn dat de wiskunde volkomen adequaat is voor het onderzoek van de seismoloog. Echter, de structureel geoloog die sterk gedeformeerde koststructuren onderzoekt, houdt zich bezig met een probleem dat qua complexiteit dichter staat bij het voorbeeld van een bioloog die een cel onderzoekt. Deze aardwetenschapper kan de wiskunde hooguit gebruiken om bepaalde deelaspecten van de korstdeformatie te beschrijven. Het verschil in toepasbaarheid van de wiskunde voor de verschillende disciplines van de aardwetenschappen maakt dat de wiskunde een natuurlijk spanningsveld in de aardwetenschappen wordt. Aangezien vergaande specialisatie in het algemeen tot isolatie leidt, is het van belang de geest open te houden teneinde waardering voor de werkwijze van collega's in andere deelgebieden van de aardwetenschappen op te brengen. Slechts dan kan men de uitgebreide Nederlandse expertise op het gebied van de aardwetenschappen ten volle benutten.

Richting van onderzoek

Goed onderzoek is gericht op nauwkeurig geformuleerde doelen. Ik wil u hiertoe een deel voorlezen uit een brief die Charles Darwin in 1861 aan Henri Fawcett schreef[1]:

About thirty years ago, there was much talk that geologists ought only to observe and not theorize; and I will remember someone saying that at this rate man might as well go into a gravel pit and count the pebbles and describe the colours. How odd it is that

[1] F. Darwin, 1903, "More letters of Charles Darwin", ed. J. Murray, p. 194-195.

anyone should not see that all observations must be for or against some view if it is to be of any service.

Deze citatie is allerminst denigrerend voor mijn geologische collega's bedoeld. Darwin heeft het hier over wat in het moderne management jargon de "activity trap" wordt genoemd. Hierbij worden doelen en middelen met elkaar verward, waardoor de activiteiten die de doelen zouden moeten dienen een hogere prioriteit krijgen dan de werkelijke doelen. Ieder onderzoek draagt dit risico met zich mee, of het nu de geoloog in het veld is, of de seismoloog die drie dimensionale aardmodellen produceert zonder zich om de implicaties van deze modell