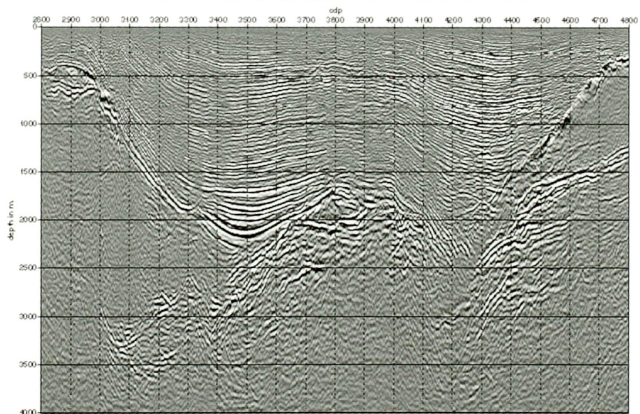


# Seismische reflecties

Intreerede

Prof. dr. ir. C.P.A. Wapenaar

---





78663  
30.08.2001

Red 2001

Seismische reflecties

**Seismische reflecties**

Uitgegeven ter gelegenheid van de afsluiting van het onderzoek  
van de aard- en zwaartevoeligheden  
in het gebied van de Eindhovense Geomorfologie en Algemeen  
Landelijk Cultuur Techniek en Landbouwonderzoek  
aan de Technische Universiteit Eindhoven

afsluiting 7 maart 2001

1998

Prof. dr. H. G. P. A. Wapenaar

Wapenaar\_  
red\_  
2001



## **Seismische reflecties**

### **Intreerede**

Uitgesproken ter gelegenheid van de aanvaarding van het ambt  
van Antoni van Leeuwenhoek hoogleraar  
in het vakgebied van de Exploratie Seismologie en Akoestiek  
aan de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
en aan de Faculteit Technische Natuurwetenschappen  
van de Technische Universiteit Delft

woensdag 7 februari 2001

door

**Prof. dr. ir. C.P.A. Wapenaar**



*Voor Gineke, Mar, André en Bertukan*

*Mijnheer de Rector Magnificus,  
leden van het College van Bestuur,  
Collegae hoogleraren en andere leden  
van de universitaire gemeenschap,  
Zeer gewaardeerde toehoorders,  
Dames en heren,*

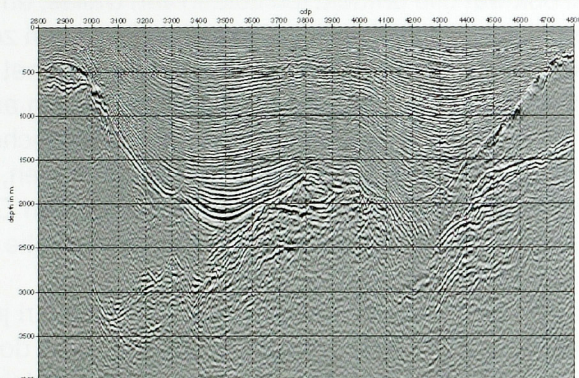
“Sinds de ontdekking van olie in 1859 in Pennsylvania, de bakermat van de Amerikaanse olie-industrie, geloofden geologen dat alleen de bodem in het oosten van de VS olie bevatte. Door het boren naar water was bij toeval ook wat olie ontdekt ten zuiden van Dallas, en dat voedde de gedachte dat er misschien ook in Texas olie te vinden zou zijn. Het was een zekere Higgins, die geobsedeerd raakte door het idee dat er olie was op Spindletop Hill. De ruige houthakker, die zijn arm had verloren in een gevecht, rook op tochten met de zondagsschool naar de heuvel steeds gas. De eerste pogingen om olie te vinden, in 1893 en 1895, mislukten jammerlijk. Met de hulp van Lucas, een Oostenrijkse mijnbouwingenieur die hij met behulp van een advertentie vond, lukte het hem in 1900 uiteindelijk wel.”

Tot zover dit citaat uit NRC handelsblad van 6 januari jongstleden. De kans dat er in de 21<sup>ste</sup> eeuw nog olie gevonden wordt door houthakkers die op hun zondagse tochten gas ruiken is uiterst klein. Vandaag de dag staan ons echter andere methoden ter beschikking om fossiele brandstoffen in de ondergrond van de aarde op te sporen en om bestaande velden te exploreren. Eén van deze methoden is de exploratie seismologie, het vakgebied waarvoor ik ben aangesteld en waar ik de komende 40 minuten enige reflecties aan wil wijden.

### **Seismische reflecties**

In de exploratie seismologie maken we gebruik van seismische golven, die met kunstmatige bronnen op of net onder het aardoppervlak worden opgewekt en die, na reflectie aan structuren in de ondergrond, met detectoren op het aardoppervlak worden geregistreerd. De ontvan-





*Geologische lagen in de Grand Canyon en in een seismische afbeelding.*



*Seismische acquisitie op zee (met dank aan PGS) (pagina 9).*

gen signalen worden in de computer met geavanceerde algoritmes verwerkt tot een beeld van de ondergrond.

Om een idee te krijgen van de structuren die zich in de ondergrond bevinden neem ik u mee naar de Verenigde Staten van Amerika. De Colorado-rivier, die onder andere door de staat Arizona stroomt, heeft daar in een proces van enkele miljoenen jaren een kloof in het landschap geslepen die vandaag de dag bekend staat als de Grand Canyon. Hier is op indrukwekkende wijze een miljard jaar geologische geschiedenis te zien. De geologische lagen die we daar waarneemen hebben zich sinds de vroege geschiedenis van de aarde afgezet met een gemiddelde snelheid van twee millimeter laagdikte per duizend jaar. Hoewel de structuur globaal horizontaal gelaagd is, zijn ook complexere structuren waarneembaar. Op een seismische afbeelding van de ondergrond is die gelaagde structuur duidelijk herkenbaar. Om een idee te geven: de laagdikte die we op zo'n afbeelding nog kunnen onderscheiden is ongeveer 50 meter, hetgeen overeenkomt met 25 miljoen jaar geologische geschiedenis.

### **Seismische beeldvorming**

Hoe nu komt zo'n seismische afbeelding tot stand? Seismische golven in de aarde zijn vergelijkbaar met akoestische golven in lucht. Een deel van het seismische spectrum komt overeen met de lage tonen van het hoorbare geluid. Een seismische reflectiemeting, zoals ik die eerder heb geschetst, is in feite een echo-akoestisch experiment. Het makkelijkst laat zich een seismisch experiment daarom vergelijken met een roep in een echoput. Hierbij plant een geluidsgolf zich vanaf de bron met de geluidssnelheid voort naar beneden. Wanneer de golf de bodem van de put bereikt wordt deze weerkaatst en plant zich weer naar boven voort, waar hij als echo wordt waargenomen. Door het tijdsverloop te meten tussen het roepen in de echoput en de waargenomen echo is de diepte van de put te berekenen. Hiertoe vermenigvuldigen we de geluidssnelheid in lucht (340 m/s) met het gemeten tijdsverloop en verkrijgen zo de totaal afgelegde weg van de geluidsgolf. Omdat

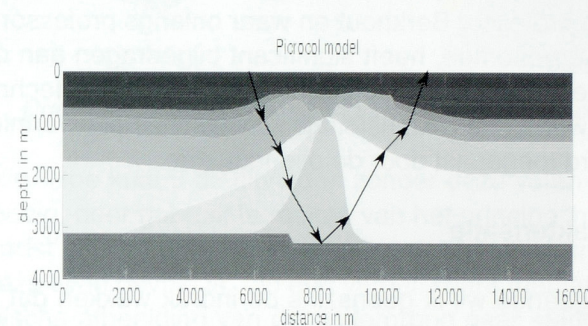


deze golf zich zowel naar beneden als naar boven door de put heeft voortgeplant delen we het resultaat door twee en, voilà, zo hebben we de diepte van de put verkregen met een eenvoudig echo-akoestisch experiment.

Nu is een echoput, bij benadering, één-dimensionaal, terwijl de structuren in de ondergrond van de aarde drie-dimensionaal zijn. Het verkrijgen van een drie-dimensionaal beeld met behulp van seismologie is daardoor ingewikkelder dan het bepalen van de diepte van een echoput. Echter, het zal u misschien verbazen maar het principe is al tientallen miljoenen jaren bekend: vleermuizen passen het toe bij hun navigatie en bij het zoeken van hun prooi. Een vleermuis zendt tientallen tot honderden keren per seconde een kort, voor de mens onhoorbaar zeer hoog geluidssignaal uit en neemt de reflecties waar met zijn (of haar) oren. Hierdoor kan hij (of zij) niet alleen de afstand tot bijvoorbeeld een muur bepalen (zoals in ons echoput experiment), maar door zich te verplaatsen door de ruimte en als het ware de metingen op verschillende plaatsen te herhalen wordt zoveel informatie verkregen dat hij verschillende objecten in verschillende richtingen en op verschillende afstanden kan onderscheiden. Bovendien kan hij door toonhoogtevariaties, vergelijkbaar met de sirene van een passerende ambulance, de snelheid van zijn prooi schatten. Hoewel wij ons niet in de belevingswereld van een vleermuis kunnen verplaatsen is het niet ondenkbaar dat onze vleermuis zich door signaalverwerking in de hersenen een mentaal drie-dimensionaal beeld van de ruimte vormt, vergelijkbaar met het mentale beeld dat wij ons van de ruimte om ons heen vormen door signaalverwerking van de lichtreflecties die wij met onze ogen waarnemen. We kunnen dus zeggen dat de vleermuis 'kijkt met geluid'. Ik verwijs u graag naar het boek 'De blinde horlogemaker' van Richard Dawkins voor een fascinerend relaas over het waarnemingsvermogen van vleermuizen.

We hebben zojuist gezien dat het voor drie-dimensionale beeldvorming essentieel is dat de echo-akoestische experimenten vanuit verschillende posities worden uitgevoerd, hetgeen in de exploratie seismologie ook daadwerkelijk gebeurt. Bij metingen op land worden de

seismische golven geregistreerd door een groot netwerk van trillingsopnemers, zogenaamde geofoons. Bovendien worden de golven steeds vanuit een ander bronpunt met dynamiet of seismische vibratoren opgewekt. Bij metingen op zee (pagina 6) bevindt de bron, in feite een groot luchtdrukpistool, zich achter een varend schip terwijl de ontvangers, zogenaamde hydrofoons (in feite onderwater-microfoons), aan kabels worden meegesleept. Tegenwoordig wordt in bepaalde situaties ook gebruik gemaakt van zogenaamde zeebodem-acquisitie. In dit geval bevindt zich een netwerk van ontvangers op de zeebodem, terwijl een schip met bron daarboven zijn baantjes trekt. Hierover later meer.



*Plaatsafhankelijke propagatiesnelheid veroorzaakt straalbreking.*

In al deze gevallen verkrijgen we Gigabytes tot Terabytes aan echo-akoestische informatie die met computeralgoritmes, gebaseerd op de akoestische golfvergelijking, verwerkt wordt tot een drie-dimensionaal beeld van de ondergrond. Ten opzichte van de beeldvorming bij vleermuizen treedt hier een belangrijke complicatie op. De propagatiesnelheid van geluid in lucht is min of meer constant, maar die van seismische golven in de ondergrond is sterk plaatsafhankelijk, waardoor straalbreking optreedt. Als we hier geen rekening mee zouden houden, zou een sterke vervorming van de afbeelding plaatsvinden. Vergelijk dit met een rietje in een glas water dat lijkt te knikken ten gevolge van de verschillende voortplantingssnelheden van licht in lucht en water.

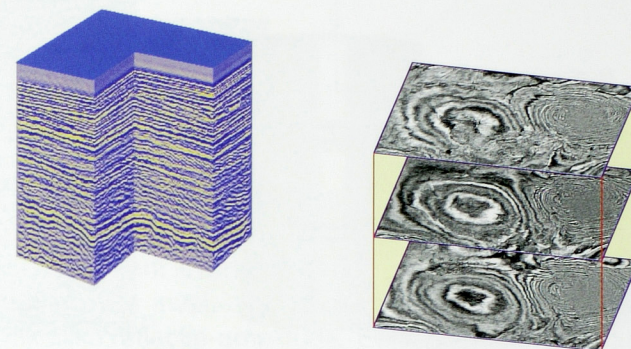


Het bepalen van de plaatsafhankelijke propagatiesnelheid in de ondergrond is derhalve een essentieel onderdeel van de seismische beeldvormingsmethode.

Ik zal in mijn verhaal verder niet op de details van de beeldvorming ingaan. Ik wil alleen opmerken dat akoestische golfveldextrapolatie, gebaseerd op de wiskundige beschrijving van golven in inhomogene media, hierin een belangrijke rol speelt. Ik hoop met de bespreking van het simpele echoput-experiment en met mijn verwijzing naar de analogie van de drie-dimensionale beeldvorming door vleermuizen duidelijk te hebben gemaakt wat de onderliggende principes zijn. Het werk in de groep Seismische en Akoestische Technieken, die tot voor kort onder leiding stond van professor Berkhout en waar onlangs professor Gisolf het roer heeft overgenomen, heeft significant bijgedragen aan de ontwikkeling van drie-dimensionale seismische beeldvormingstechnieken. Heden ten dage wordt drie-dimensionale seismische beeldvorming min of meer standaard toegepast door de olie-industrie.

### Seismische karakterisatie

Met het voorgaande wil ik geenszins de indruk wekken dat de exploratie seismologie nu 'af' is. De huidige technieken leveren weliswaar een scherp beeld van de structuren in de ondergrond, ze geven echter nog geen eenduidig uitsluitsel over wát er nu precies is afgebeeld. Hoewel geologen bepaalde structuren kunnen herkennen waarin zich wellicht olie of gas heeft opgehoopt en zodoende (potentiële) reservoirs kunnen aanwijzen, bestaat er een grote behoefte aan een verdere kwantitatieve karakterisatie van deze afgebeelde reservoirs. Dit wordt mede ingegeven door het feit dat exploratie seismologie vandaag de dag steeds minder gebruikt wordt voor het vinden van nieuwe olie- of gasvoorraden, maar meer voor het nauwkeurig analyseren van bekende velden. Ik zal de kwantitatieve karakterisatie illustreren aan de hand van een eenvoudig voorbeeld. Stel u ziet twee vaten die u aan de vorm herkent als olievaten. U weet echter dat deze vorm nog niets zegt over de inhoud: één vat kan bijvoorbeeld leeg zijn en het andere gevuld



*Drie-dimensionale seismische afbeelding van de ondergrond.*

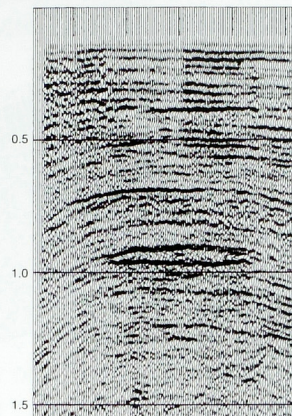
met olie. Hoe kunt u dit uitvinden zonder deze vaten te openen? Heel eenvoudig, door gebruik te maken van het principe 'holle vaten klinken het hardst'. Door beide vaten te bekloppen vindt u onmiddellijk uit welke van deze twee gevuld is. Op een vergelijkbare manier kan men op een seismische afbeelding van de ondergrond naar sterke of juist zwakke reflecties zoeken, die een indicatie kunnen zijn voor de aanwezigheid van olie of gas. Zo kan bijvoorbeeld een gasreservoir herkend worden aan een relatief sterke reflectie. Tot op zekere hoogte is deze methode succesvol, maar in de praktijk is het niet altijd zo eenvoudig. Olie en gas bevinden zich niet in vaten of bellen in de ondergrond, zoals door de term 'gasbel' vaak ten onrechte gesuggereerd wordt. Een olie- of gasreservoir bestaat uit poreuze gesteenten waarvan de poriën geheel of gedeeltelijk gevuld kunnen zijn met olie of gas, terwijl zich er ook nog water in kan ophouden, bijvoorbeeld tijdens het winningsproces, waarbij water vanuit één boorput geïnjecteerd wordt om de olie of het gas in de richting van een andere boorput te sturen.

Stelt u zich nogmaals de olievaten voor, maar nu beide gevuld met zand, in één van de vaten gemengd met olie en in het andere gemengd met water. Nu zal het met behulp van klopsignalen op de beide vaten





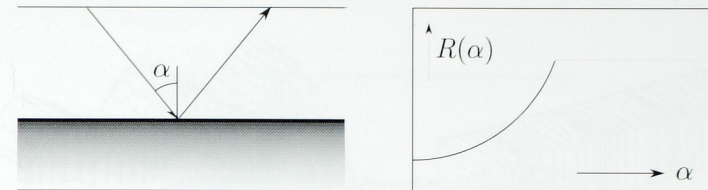
'Holle vaten klinken het hardst'



Sterke reflectie  $\Rightarrow$  gas  
(Tegland, 1973).

veel moeilijker zijn om uit te maken welk van de twee vaten de olie bevat. De subtiele verschillen in sterkte en klank zouden geanalyseerd moeten worden om uitsluitsel te geven. Overigens is het interessant te vermelden dat ook vleermuizen aan de hand van de sterkte en klank van de ontvangen echo's tot op zekere hoogte verschillende materialen kunnen onderscheiden.

Weer terugkerend naar de exploratie seismologie betekent het voorgaande dat we voor een kwantitatieve karakterisatie niet langer alleen de structuren, maar ook zeer nauwkeurig de reflectie-amplitudes van de afgebeelde reservoirs zullen moeten analyseren. Laten we, om de gedachten verder te bepalen, een reservoir voorlopig beschouwen als een eenvoudige planparallele laag, bestaande uit olie- of gashoudend poreus zandsteen, omringd door homogene lagen met andere akoestische eigenschappen. Wanneer een seismische golf op deze laag invalt wordt hij gereflecteerd, waarbij de reflectie-sterkte afhangt van het contrast van de seismische parameters van de reservoir-laag met de parameters van de bovenliggende laag. Als we de golf onder een andere



De reflectie-sterkte hangt af van de hoek van inval.

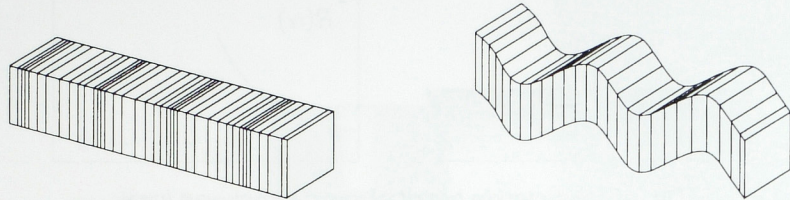
hoek laten invallen zal opnieuw reflectie optreden, echter de reflectie-sterkte zal in het algemeen anders zijn dan bij loodrechte inval. Herhaling van dit experiment levert een serie reflectie-amplitudes voor verschillende hoeken van inval. Dit zal ik in het vervolg aanduiden als de hoekafhankelijke reflectie-amplitude. Een nauwkeurige analyse van dit hoekafhankelijk reflectiegedrag geeft ons informatie over de seismische eigenschappen van de reservoir-laag en indirect over de mogelijke aanwezigheid van olie of gas in deze laag. In de praktijk bevindt een reservoir zich echter op enkele kilometers diepte en voeren we onze metingen niet direct boven het reservoir uit maar vanaf het aardoppervlak. Bovendien is de structuur van een reservoir in het algemeen veel complexer dan de zojuist geschetste plan-parallelle laag. Het moge duidelijk zijn dat deze en andere factoren in rekening gebracht dienen te worden.

Nauwkeurige kwantitatieve seismische karakterisatie (in de ruimste zin van het woord) is één van de uitdagingen die ons vakgebied ons biedt. Dit onderwerp krijgt dan ook zowel in de olie-industrie als bij universiteiten en onderzoeksinstituten ruime aandacht. Ook bij onze universiteit staat het al geruime tijd op het programma. In het volgende wil ik u mijn visie geven en aan de hand van een aantal onderling samenhangende thema's mijn onderzoeksprogramma uiteenzetten.

### Multi-componenten metingen

Het eerste thema zal ik aanduiden met de term 'multi-componenten metingen'. Tot nu toe heb ik seismische golven vergeleken met akoes-

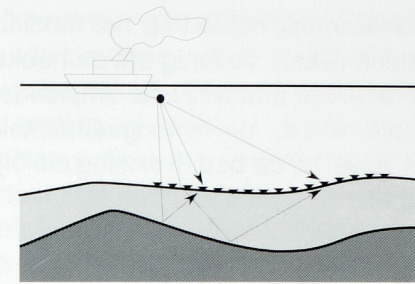




*In de ondergrond komen zowel compressie- als schuifgolven voor.*

tische golven in lucht. Een akoestische golf bestaat uit plaatselijke verdichtingen en verdunningen van lucht die in ruimte en tijd variëren en zich met een snelheid van 340 m/s door de lucht voortplanten. We hebben hier te maken met een longitudinale golf, ook wel aangeduid als compressiegolf of kortweg *P*-golf. Door de ondergrond van de aarde kunnen zich behalve longitudinale golven ook transversale golven voortplanten, waarbij geen verdichtingen en verdunningen optreden, maar waarbij de golfbeweging loodrecht op de voortplantingsrichting staat. Dit golftype duiden we aan als schuifgolf of kortweg *S*-golf. Wanneer we onze reservoir-laag onder verschillende hoeken met een schuifgolf belichten verkrijgen we opnieuw hoekafhankelijke reflectie-informatie die verschilt van die voor compressiegolven. We kunnen deze informatie nog verder uitbreiden door ook conversies van het ene naar het andere golftype te beschouwen, opnieuw voor verschillende hoeken van inval.

Deze hoekafhankelijke reflectie-informatie voor verschillende golftypen verhoogt de nauwkeurigheid waarmee we de hoeveelheid olie of gas in het reservoir kunnen bepalen aanzienlijk. Echter, het is al eerder gezegd, we voeren onze metingen niet direct boven het reservoir uit maar vanaf het aardoppervlak. Bovendien is het met de seismische methode niet mogelijk om beide golftypen gescheiden waar te nemen. Een seismische meting bevat een combinatie van beide golftypen, waarbij in het algemeen de compressiegolf het sterkst aanwezig is. Door nu verschillende typen geofoons toe te passen worden meer-



*Multi-componenten acquisitie op de zeebodem.*

dere componenten van het seismische golfveld gemeten die achteraf, d.w.z. in de computer, gescheiden kunnen worden in compressie- en schuifgolven. We kunnen dit vergelijken met de werking van een polaroid zonnebril, waarmee licht van verschillende polarisaties gescheiden wordt. Het meten van meerdere componenten van het seismische golfveld is sterk in opkomst. Behalve bij acquisitie op land gebeurt dit ook bij zogenaamde zeebodem-acquisitie, een relatief nieuwe techniek die ik in het begin van mijn verhaal al even aanstipte. Bij deze techniek worden verschillende typen geofoons en hydrofoons op de zeebodem geplaatst die de gereflecteerde *P*- en *S*-golven simultaan registreren. Recent onderzoek van drs Karin Schalkwijk heeft aangetoond dat multi-componenten metingen op de zeebodem op een nauwkeurige wijze gescheiden kunnen worden in *P*- en *S*-golven.

In het algemeen geldt dat multi-componenten acquisitie meer informatie over een reservoir levert dan standaard acquisitie en daarmee de mogelijkheden vergroot om onderscheid te kunnen maken tussen de aanwezigheid van, bijvoorbeeld, olie of water in het poreuze reservoirgesteente. In mijn onderzoeksprogramma van de komende jaren zal ruime aandacht besteed worden aan multi-componenten metingen. In wiskundige termen betekent dit dat veel aspecten van het onderzoek gebaseerd zullen zijn op de elastodynamische golfvergelijking in plaats van op de akoestische golfvergelijking, die ik eerder in mijn betoog genoemd heb bij de bespreking van de seismische beeldvorming. Het



onderzoek zal zich ondermeer richten op het modificeren van seismische beeldvormingstechnieken, zodanig dat de hoekafhankelijke  $P$ - en  $S$ -reflecties van een reservoir met de juiste amplitudes kunnen worden afgebeeld. Anisotropie, d.w.z. de richtingsafhankelijkheid van  $P$ - en  $S$ -golfsnelheden, zal zowel bij de beeldvorming als bij de karakterisatie een belangrijke rol spelen.

### Multi-schaal analyse

Het tweede onderzoeksthema dat ik met u wil bespreken zal ik aanduiden met de term 'multi-schaal analyse'. Ik zal dit begrip introduceren aan de hand van een voorbeeld dat niets met geofysica te maken heeft. Stel u wilt weten hoe lang de kust van Noorwegen is. U zou dit kunnen meten door er met een schip van zuid naar noord langs te varen en op één of andere manier (bijvoorbeeld met satelliet-metingen) nauwkeurig de afgelegde weg te bepalen. U zult dan een afstand vinden van ongeveer 2500 kilometer. Zoals u weet is de kust van Noorwegen door alle fjorden heel grillig van vorm en omdat het schip niet alle fjorden in en uit vaart is de op deze manier bepaalde lengte te laag. Als u de fiets zou nemen en zo nauwkeurig mogelijk alle fjorden zou proberen te volgen, zou u een afstand vinden van 57000 kilometer. Echter, ook met de fiets snijdt u noodgedwongen hier en daar wel eens een bocht af. Nu hebben de Noorse autoriteiten onlangs besloten de lengte van de kust nog eens nauwkeurig op te meten en daarbij alle inhammen en landtongen mee te nemen (pagina 21). De conclusie was dat de kust nog eens 26000 kilometer langer is dan men tot dan toe had gedacht. Dus als u de kust te voet zou volgen, zodat u geen bochten meer hoeft af te snijden (aanemende dat u hier voldoende tijd voor had), zou u 83000 kilometer afleggen. Een heel verschil met de 2500 kilometer die u met de boot had afgelegd. U voelt al aankomen dat ook hiermee het laatste woord nog niet gezegd is. Een muis die u op pad zou sturen zou om alle rotsblokken en stenen heen lopen en een nog langere afstand afleggen. Een mier zou om alle zandkorrels heen lopen, en een microbe zou zelfs de grillige structuur van ieder zandkorreltje volgen en

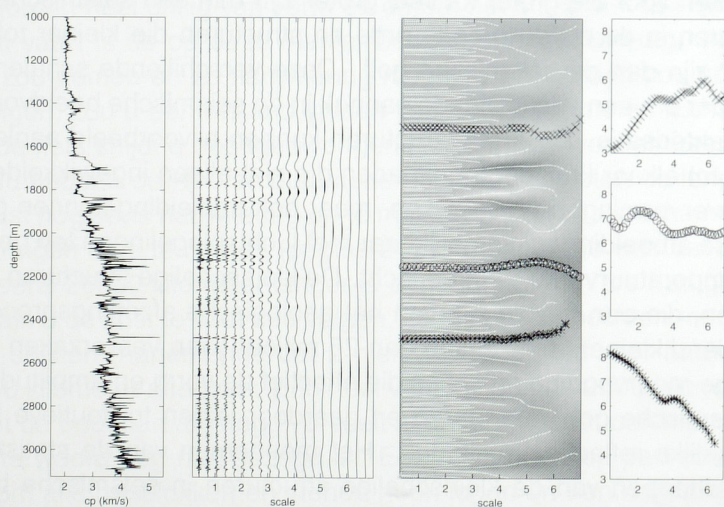
zodoende een afstand van vele miljoenen kilometers moeten afleggen om de Noordkaap te bereiken. We zien dus dat de lengte van de kust van Noorwegen niet eenduidig bepaald is maar afhangt van de schaal waarop we onze meting uitvoeren. In wiskundige termen zeggen we dat de kust van Noorwegen een fractale dimensie heeft, een begrip geïntroduceerd door B.B. Mandelbrot in zijn boek 'De fractale geometrie van de natuur'. In de kunst komen we een vergelijkbaar verschijnsel tegen in het werk van de Nederlandse graficus M.C. Escher.

Ik keer nu weer terug naar de exploratie seismologie. Analoog aan de onbepaaldheid van de lengte van de kust van Noorwegen, kunnen we stellen dat de dikte van een aardlaag onbepaald is (pagina 21). Het 'meetinstrument' waarmee we aardlagen in de ondergrond observeren is de seismische golf, met een typische lengte van honderd meter, vergelijkbaar met de hoogte van de Big Ben in Londen. Hiermee kunnen we lagen onderscheiden met een dikte van ongeveer 50 meter, hetgeen, zoals ik al eerder heb gezegd, overeenkomt met zo'n 25 miljoen jaar geologische geschiedenis. In de ondergrond van de aarde komen structuren voor die groter tot veel groter zijn dan een seismische golf, structuren in de zelfde grootte-orde en structuren die kleiner tot veel kleiner zijn dan de seismische golf. Deze verschillende schalen vragen ieder om een verschillende aanpak in de seismische beeldvorming en karakterisatie. De grote structuren kunnen bijvoorbeeld aanleiding geven tot elkaar kruisende golfpaden die niet alleen ingewikkelde amplitudevervormingen veroorzaken, maar ook aanleiding kunnen geven tot valse afbeeldingen, vergelijkbaar met luchtspiegelingen ten gevolge van temperatuurvariaties in de lucht. De kleinschalige structuren daarentegen, die een gevolg zijn van het geologische afzettingsproces op beduidend kleinere tijdschalen dan 25 miljoen jaar, veroorzaken kleinschalige meervoudige reflecties die effectief de vorm en amplitude van de seismische golf veranderen en daardoor leiden tot foutieve hoekafhankelijke reflectie-amplitudes. Het meenemen van de statistische eigenschappen van de kleinschalige structuren in seismische beeldvorming moet leiden tot een verbetering van de afgebeelde hoekafhankelijke reflectie-amplitudes. Hier wordt momenteel door postdoc dr



Menno Dillen aan gewerkt. In dit verband wil ik ook de samenwerking met professor Bauer van de groep Theoretische Natuurkunde noemen.

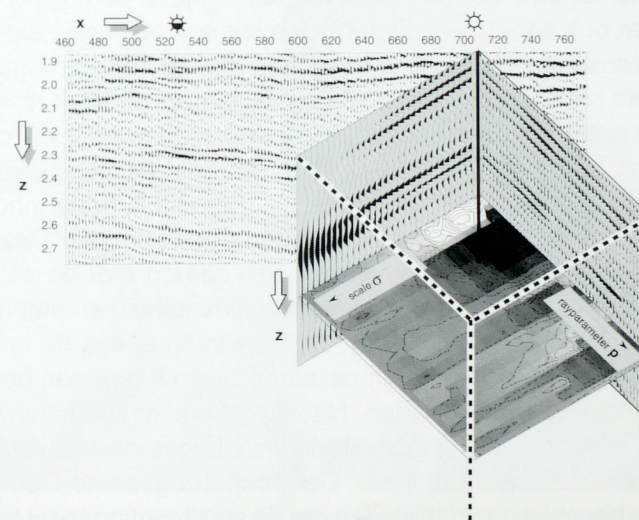
Om dieper inzicht te krijgen in de structuur van de gelaagdheid op een schaal kleiner dan de seismische golf, kijken we naar metingen die uitgevoerd zijn in een boorput. Gedetailleerde metingen van bijvoorbeeld de  $P$ -golf propagatiesnelheid als functie van de diepte vertonen een grillig gedrag met variaties op verschillende schalen die een gevolg zijn van de geologische afzettingsprocessen. We zien hier opnieuw een uiting van de fractale geometrie van de natuur. Ik kan niet nalaten te wijzen op de frappante overeenkomst met het verloop van de olieprijs als functie van de tijd (pagina 22). Ik wil hier echter geen voorbarige conclusies uit trekken en zal me weer richten op de geofysica. Voor het kwantificeren van het schaalafhankelijke gedrag van bijvoorbeeld de  $P$ -golf propagatiesnelheid is de zogenaamde wavelettransformatie onontbeerlijk. In dit verband mag de naam van dr Felix Herrmann niet ongenoemd blijven. Hij heeft als promovendus in Delft pionierswerk op dit gebied verricht. Ik kan in het tijdsbestek van deze rede helaas niet



Multi-schaal analyse van  $P$ -golf propagatiesnelheid (Herrmann, 1997).

ingaan op de details van de wavelettransformatie. Ik volsta hier met op te merken dat deze transformatie bij uitstek geschikt is om de singulariteiten (de uitschieters) zoals die in boorputmetingen voorkomen te kwantificeren. Wanneer we deze analyse zouden toepassen op een seismische reflector tussen twee homogene lagen, dan zou blijken dat zo'n reflector schaal-*on*afhankelijk is. De analyses van Herrmann hebben met name aangetoond dat vele singulariteiten, die geïdentificeerd kunnen worden met reflectoren, juist een sterk schaalafhankelijk gedrag vertonen. Dit betekent dat de standaardmodellen voor seismische reflectie, zoals die in vele seismische karakterisatie-procedures worden toegepast, in veel situaties ontoereikend zijn.

De afgelopen jaren hebben we een begin gemaakt met het relateren van het schaalafhankelijke gedrag van de  $P$ - en  $S$ -golfsnelheden aan de schaal- en hoekafhankelijke seismische reflectie-eigenschappen van een reservoir. Belangrijke bijdragen zijn geleverd door dr Frank Desing, dr Frédéric Verhelst, dr Aart-Jan van Wijngaarden en nog-net-geen-dr Jeroen Goudswaard.



Multi-schaal analyse van hoekafhankelijke reflecties.



De multi-schaal analyse levert relevante informatie over de geologische opbouw van een reservoir en zal uiteindelijk kunnen leiden tot een nauwkeurigere bepaling van de olie- of gasinhoud van het reservoir. De komende jaren zal dit onderzoek op ruime schaal voortgezet worden. Meer algemeen zal de multi-schaal analyse een belangrijke rol gaan spelen in het onderling relateren van verschillende soorten metingen uit verschillende disciplines.

### Multi-disciplinair onderzoek

Hiermee ben ik aangekomen bij het derde thema: multi-disciplinair onderzoek. Het voorbeeld in het begin van mijn betoog gaf het al aan: de samenwerking tussen geologen, mijnbouwingenieurs en een houtkapper leidde in 1900 tot de eerste grote olievondst in Texas: multi-disciplinair onderzoek avant-la-lettre. Ook uit het vervolg van mijn betoog mag duidelijk geworden zijn dat seismische reservoir-karakterisatie niet een kwestie is van alleen maar toegepaste geofysica. Zo is om de geologische opbouw van een reservoir te begrijpen geologische kennis nodig. Maar ook andere kennisgebieden kunnen bijdragen aan een betere karakterisatie. Wanneer we eenmaal de seismische eigenschappen van een reservoir bepaald hebben, willen we afleiden hoeveel olie of gas zich in het reservoir bevindt. We zullen hiervoor een beroep moeten doen op het vakgebied petrofysica, dat gesteente-eigenschappen bestudeert, zoals minerale samenstelling, porositeit, porie-inhoud, permeabiliteit, dichtheid, samendrukbaarheid, rigiditeit, etc. Deze eigenschappen hangen op een complexe wijze samen met de seismische eigenschappen zoals  $P$ - en  $S$ -golf propagatiesnelheid en met het hoekafhankelijke  $P$ - en  $S$ -reflectiegedrag. Bovendien speelt de druk waaronder het gesteente zich diep in de aarde bevindt ook een belangrijke rol in deze onderlinge verbanden. Naast wiskundige modellen die deze verbanden beschrijven zijn laboratorium-metingen noodzakelijk om de modellen te verifiëren en te ijken. De groep Toegepaste Geofysica en Petrofysica beschikt over faciliteiten om dit soort metingen uit te voeren. Ik doel hier onder andere op de triaxiale testbank, waarin een blok re-

## Noren krijgen er 26.000 km kust bij

OSLO, 18 NOV. De kust van Noorwegen is bijna de helft langer dan werd gedacht. De Noorse autoriteiten zijn daar achter gekomen dankzij een nieuw computerprogramma dat plattegrondmakers in staat stelt zelfs de kleinste inhammen in kaart te brengen. De kust heeft een lengte van ruim 83.000 kilometer, 26.000 kilometer meer dan altijd was aangenomen. (AP)

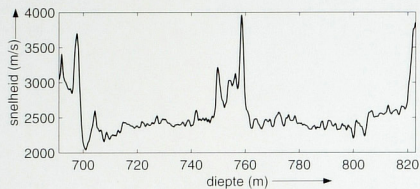


*De lengte van de kust van Noorwegen is niet eenduidig bepaald (pagina 16).*

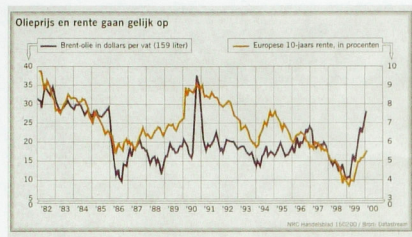


*De dikte van een laag in de ondergrond is niet eenduidig bepaald (pagina 17).*



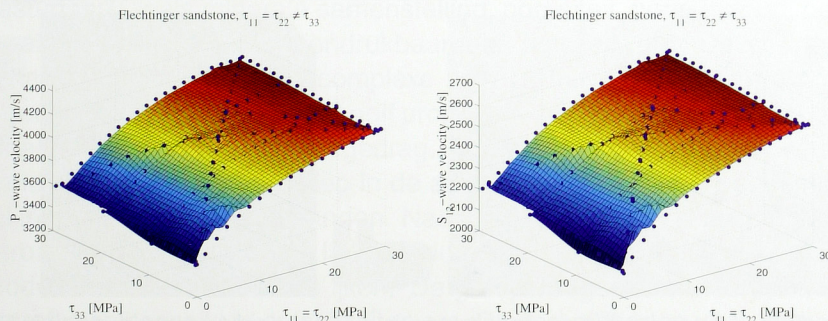


Snelheid als functie van de diepte.  
(pagina 18)



Olieprijs als functie van de tijd (NRC).  
(pagina 18)

servoirsteente van 30 bij 30 bij 30 cm geplaatst kan worden en onder drie verschillende richtingen onder grote druk gezet kan worden, waarmee de situatie diep in de ondergrond van de aarde nagebootst wordt. Door middel van zogenaamde piëzo-electrische transducenten kunnen *P*- en *S*-golven door het materiaal gestuurd worden en aan de hand van de geregistreerde signalen kunnen de *P*- en *S*-golf propagatiesnelheden onder verschillende drukken en in verschillende richtingen bepaald worden. Andere meetfaciliteiten maken het mogelijk om de invloed van porie-inhoud op golfpropagatie te bepalen. Omdat petrofysische metingen op een andere schaal worden uitgevoerd dan seismische metingen is ook hier weer inzicht in het schaalafhankelijke gedrag nodig om de koppeling tussen petrofysica en geofysica tot stand te brengen.



Petrofysische metingen van *P*- en *S*-snelheid (Dillen, 2000).

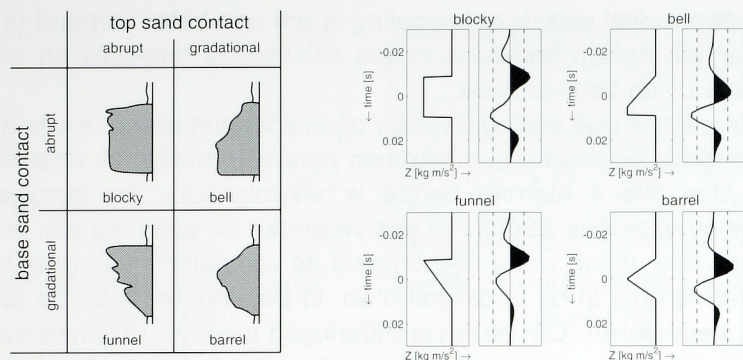
Het ultieme doel van deze koppeling is om een beter verband te kunnen leggen tussen hoekafhankelijke seismische reflecties en olie- of gasinhoud van een reservoir.

We kunnen nog een stap verder gaan door niet alleen te kijken naar de statische eigenschappen van een reservoir, maar ook naar de dynamische. Wat ik hiermee bedoel is het volgende. Ten gevolge van het winningsproces van olie of gas verandert de toestand van een reservoir. Niet alleen wordt bijvoorbeeld de olie verdrongen door water, ook zal de druk in de ondergrond en, in beperktere mate, de temperatuur veranderen. Om deze veranderingen tengevolge van winning te kunnen volgen worden tegenwoordig de seismische metingen één of meerdere keren herhaald met tijdsintervallen van zes maanden tot drie jaar. Men spreekt dan wel van 4-dimensionale seismologie; de vierde dimensie is hierbij de tijd die verstrijkt tussen de herhaalde metingen. De veranderingen in een reservoir die op deze manier worden gevolgd hangen samen met zowel de stromingseigenschappen als de geometrische eigenschappen van het reservoir. Deze eigenschappen vallen buiten het kennisgebied van de geofysica, waardoor opnieuw een beroep gedaan moet worden op andere vakgebieden.

De 'homo-universalis' zoals we die in vroegere eeuwen nog wel eens tegenkwamen, bestaat in de 21<sup>ste</sup> eeuw niet meer. De hoeveelheid wetenschappelijke kennis en inzicht is dusdanig gegroeid dat geen mens meer in staat om zowel overzicht te hebben over vele vakgebieden, als ook specialistische kennis in ieder van die vakgebieden. Multi-disciplinair onderzoek vereist een samenwerking tussen specialisten die bereid zijn over de grenzen van hun eigen vakgebied heen te kijken en te communiceren met specialisten uit andere vakgebieden. Professor Berkhout heeft als lid van het College van Bestuur multi-disciplinair onderzoek hoog op de agenda gezet.

Ik prijs mij gelukkig aangesteld te zijn bij de afdeling Technische Aardwetenschappen, waar de randvoorwaarden voor multi-disciplinair onderzoek aanwezig zijn (pagina 27). Als geofysicus in de groep Toegepaste Geofysica en Petrofysica zal ik mij gaan bezighouden met seismische beeldvorming en reservoir-karakterisatie. In samenwerking met





Geologische overgangen en hun seismische reflecties (Verhelst, 2000).

de geologen binnen de afdeling, met name professor Kroonenberg en professor Luthi, hoop ik verbanden te kunnen leggen tussen de geologische opbouw van een reservoir en de seismische reflecties. Het zojuist afgeronde onderzoek van dr Verhelst vormt hiervoor een mooie start. De samenwerking met petrofysici moet leiden tot verbeterde methodes voor het bepalen van de hoeveelheid olie of gas in een reservoir aan de hand van de seismische reflecties. De samenwerking met reservoiringenieurs en geomechanici is onontbeerlijk om de veranderingen in een reservoir te kunnen bepalen aan de hand van 4-dimensionale seismologie. In dit verband hoop ik op een goede samenwerking met professor van Kruijsdijk en professor Currie. Tenslotte zal ik samenwerken met collega-geofysici. In de eerste plaats met vriend en collega professor Jacob Fokkema, die in de groep Toegepaste Geofysica en Petrofysica een hoogwaardige onderzoeksomgeving heeft gecreëerd en onlangs een uitgebreid programma heeft opgezet voor 4-dimensionale seismologie. Daarnaast zal ik mijn mede-benoeming bij Technische Natuurkunde gebruiken om samen te werken met collega-geofysicus professor Gisolf, die een zeer waardevolle expertise vanuit de geofysische industrie inbrengt. Samenwerking met industrie en technologische instituten is van net zo groot belang als universitaire samenwerking. Ik ben blij met de goede contacten met o.a. Shell Rijswijk, NAM,

Jason Geosystems, TNO-NITG, TNO-TPD en met de ondersteuning van de Stichting Technische Wetenschappen, die samenwerking met de industrie stimuleert.

Naast olie- en gas-exploratie wil ik u nog een aantal andere geofysische onderzoeksterreinen noemen waarop ik mij de komende jaren in samenwerking met collega's in aanverwante vakgebieden zal begeven.

### De top-onderzoekschool ISES

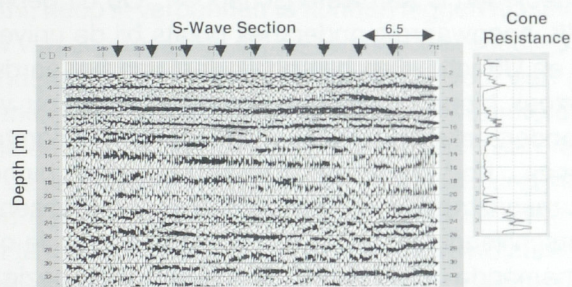
In dit kader wil ik eerst de top-onderzoekschool ISES noemen. Een aantal jaren geleden heeft het ministerie van onderwijs in samenwerking met NWO een zestal onderzoeksgebieden geselecteerd voor de vorming van zogenaamde top-onderzoekscholen. Eén van deze zes onderzoeksgebieden is aardwetenschappen. Op dit gebied vindt, behalve in Delft, hoogwaardig onderzoek plaats bij de universiteiten van Amsterdam en Utrecht. Een belangrijk deel van het aardwetenschappelijk onderzoek binnen deze drie universiteiten is nu verenigd binnen de top-onderzoekschool ISES, wat staat voor 'Integrated Structural Earth Sciences'. Kort samengevat is het onderzoek binnen ISES gericht op het reconstrueren en voorspellen van processen in de vaste aarde op verschillende schalen. Traditioneel houden de onderzoekers van de deelnemende universiteiten zich gescheiden bezig met processen in complementaire ruimtelijke en temporele schaalgebieden. Bijvoorbeeld, het exploratie-onderzoek in Delft bestrijkt de eerste vier kilometer van de ondergrond in het 'hier en nu'. Aan de andere kant van het schaal-spectrum is het onderzoek in Utrecht gericht op het bestuderen van het inwendige van de aarde op globale schaal en op het reconstrueren van de processen die in eeuwen tot de huidige toestand hebben geleid. Het multi-disciplinaire onderzoek in ISES is gericht op het koppelen van deze traditioneel gescheiden ruimtelijke en temporele schaalgebieden (pagina 27). Als voorbeeld noem ik hier het onderzoek naar de relatie tussen de wordingsgeschiedenis van een bekken en het bijbehorende schaalafhankelijke reflectiegedrag; dit in samenwerking met professor Cloetingh van de Vrije Universiteit van Amsterdam.



## De ondiepe ondergrond

Een nog niet eerder genoemd onderzoeksterrein in Delft is de exploratie van de ondiepe ondergrond, d.w.z. de eerste vijftig meter. De toepassingen zijn hier van geotechnische aard (bijvoorbeeld ten behoeve van tunnelboringen), of dienen het milieu of archeologisch onderzoek. Ik stip hier kort een paar voorbeelden aan.

Het onderzoek van postdoc dr Ranajit Ghose is gericht op het relateren van hoge resolutie S-golf seismologie in de ondiepe ondergrond aan geotechnische metingen van de mechanische eigenschappen van diezelfde ondergrond. De eerder genoemde multi-schaal analyse die gebruikt werd om boorputmetingen aan seismische metingen te relateren wordt ook hier weer met succes toegepast.

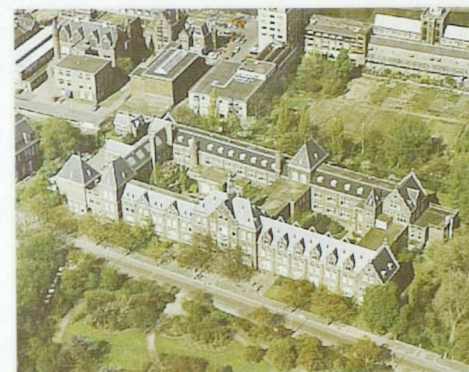


*Integratie van seismische en geotechnische metingen (Ghose, 2000).*

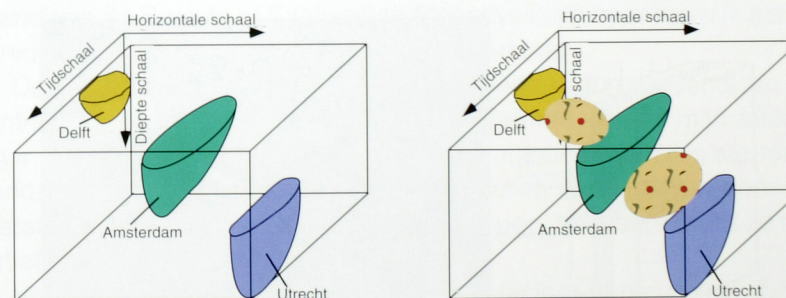
Een geheel andere methode van onderzoek aan de ondiepe ondergrond is grondradar. Deze methode is verwant aan de seismische methode, maar maakt gebruik van bronnen en ontvangers voor electromagnetische i.p.v. seismische golven. Ik wil hier met name het promotiewerk van bijna-dr Jan van der Kruk noemen die een techniek voor multi-componenten grondradar ontwikkeld heeft, daarbij gebruik makend van inzichten verkregen uit de multi-componenten seismologie.

Een interessante nieuwe ontwikkeling is de zogenaamde seismo-electrische methode die gebruik maakt van seismische bronnen en electromagnetische ontvangers of juist andersom. De omzetting van

het ene naar het andere type golven vindt plaats in de ondiepe ondergrond t.g.v. relatieve bewegingen tussen het poreuze materiaal en de vloeistof in de porieën. Op deze manier hopen we inzicht te krijgen in de permeabiliteit van de ondiepe ondergrond. Mogelijk leidt dit weer tot toepassingen voor reservoir-karakterisatie m.b.v. seismische bronnen in één boorput en electromagnetische ontvangers in een andere.



*Technische Aardwetenschappen: multi-disciplinair onderzoek (pagina 23).*



*Koppeling van schalen in de top-onderzoekschool ISES (pagina 25).*



## NDT onderzoek aan materialen

Een heel ander toepassingsgebied van echo-akoestische methoden vormt het niet-destructieve onderzoek aan materialen voor de lucht- en ruimtevaartindustrie. Hoewel dit op het eerste gezicht ver af staat van de geofysica maakt dit type onderzoek gebruik van vergelijkbare methoden, zij het op een heel andere schaal. Met behulp van een piezo-electrische transducent worden ultrasonische golven opgewekt (zoals door vleermuizen) die in het gelaagde materiaal van bijvoorbeeld een vliegtuigvleugel reflecteren om vervolgens weer met een piezo-electrische transducent ontvangen te worden. Aan de hand van dit type metingen kunnen fouten in het constructie-materiaal opgespoord worden. Ik wil mijn mede-benoeming bij Technische Natuurkunde gebruiken om ook op dit gebied onderzoek te kunnen doen. Onlangs heeft Airbus besloten gebruik te gaan maken van het zogenaamde constructiemateriaal Glare, dat ontwikkeld is door de groep van professor Vogelesang van de faculteit Lucht- en Ruimtevaart. In een gezamenlijk project hopen we, voortbouwend op het werk van dr Johan Vos die onlangs bij ons gepromoveerd is, een nieuwe methode te ontwerpen voor niet-destructief onderzoek aan gelaagde constructiematerialen, daarbij gebruik makend van hoekafhankelijke  $P$ - en  $S$ -reflecties. In dit onderzoek zullen professor Blacquière (deeltijdhoogleraar akoestische meetsystemen) en dr Verschuur bij Technische Natuurkunde een belangrijke rol spelen.



Het materiaal Glare dat gebruikt gaat worden door Airbus.

## Dankwoord

Dames en heren, ik kom aan het einde van mijn betoog, maar wil niet afsluiten zonder een aantal mensen te bedanken, immers: hoogleeraar word je niet zonder steun van anderen.

In de eerste plaats dank ik het College van Bestuur, dat in 1999 besloten heeft een aantal universitair hoofddocenten te benoemen tot persoonlijk hoogleraar en de voordracht voor mijn benoeming heeft ondersteund en goedgekeurd.

Deze voordracht werd gedaan door de dekaan van de faculteit Technische Natuurwetenschappen en de afdelingsvoorzitter van Technische Natuurkunde. Professor Karel Luyben en professor Ted Young, ik ben jullie hier zeer erkentelijk voor. Het feit dat jullie mij voordroegen, terwijl ik al had aangegeven graag de overstap naar Technische Aardwetenschappen te willen maken, getuigt van groothartigheid. Ik ben blij dat ik, ondanks deze overstap, een aanstelling in jullie faculteit behoud.

Hooggeleerde Berkhout, beste Guus. Jij hebt vorm gegeven aan het geofysische onderzoek bij Technische Natuurkunde, in het bijzonder d.m.v. het Delphi consortium. Als mijn promotor heb je me geïnspireerd, hetgeen ertoe geleid heeft dat ik heb gekozen voor een academische carrière. Terugkijkend op de afgelopen twintig jaar kan ik stellen dat we een zeer productieve samenwerking hebben gehad. Het feit dat de TU-Delft recent genomineerd is voor de Distinguished Achievement Award van de Society of Exploration Geophysicists beschouw ik als een eervolle erkenning van o.a. deze samenwerking.

Dames en heren hoogleraren, medewerkers, promovendi en studenten van de afdeling Technische Natuurkunde. Sinds mijn afstuderen in 1981 heb ik met veel plezier in deze afdeling met jullie samengewerkt. Hoewel de contacten kwantitatief zullen verminderen door mijn overstap naar Technische Aardwetenschappen, verwacht ik dat ze kwalitatief op hetzelfde peil zullen blijven.

Voor die overstap, die vorige maand officieel is geworden, ben ik de dekaan van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen en de afdelingsvoorzitter van Technische Aardwetenschappen zeer erken-



telijk. Professor Henk Jan Overbeek en professor Cor van Kruijsdijk, bedankt voor het in mij gestelde vertrouwen.

Hoogeleerde Fokkema, beste Jacob. Jouw rol in mijn persoonlijke en wetenschappelijke leven is moeilijk in woorden te vatten. Je bent een zeer goede vriend en een integer collega. Ik vind het een groot voorrecht met je te kunnen samenwerken. Een groot deel van die samenwerking speelt zich af in jullie mooie huis in Schiedam, waar ik als Vlaardinger overigens wel even aan heb moeten wennen.

Dames en heren hoogleraren, medewerkers, promovendi en studenten van de afdeling Technische Aardwetenschappen. Ik ben reeds twee jaar jullie gast geweest en heb dit als zeer plezierig ervaren. Ik kijk uit naar een langdurige en duurzame samenwerking.

Familie en vrienden, dank voor alle steun en vriendschap door de jaren heen en voor jullie aanwezigheid hier vandaag. Het maakt deze plechtigheid voor mij tot een feest.

Mariëlle, Ruud, Stefanie, Esther en Ivo. Al zesentwintig jaar mag ik mij oom noemen en ik ben er nog steeds even trots op.

Gineke, Mar, André en Bertukan. Jullie betrokkenheid en steun is en blijft van groot belang voor mij. Aan jullie draag ik deze rede op.

Dames en heren, tot slot nog dit: 15 jaar en een dag geleden, de dag voor mijn dertigste verjaardag, ben ik in de zaal hiernaast gepromoveerd. Velen van u waren daarbij aanwezig en hebben tijdens het aansluitende feest, dat tot 7 februari doorging, mijn dertigste verjaardag met mij gevierd. Vandaag ben ik blij u op deze plaats op mijn vijfenveertigste verjaardag te mogen begroeten. Over twintig jaar hoop ik hier weer te staan om mijn uittreerede te houden. Nu is het zo dat 7 februari 2021 op een zondag valt, dus op de dag nauwkeurig zal het niet zijn. Ik zal u echter bijtijds laten weten wanneer het wel zal zijn.

Geachte toehoorders, ik dank u allen voor uw aanwezigheid en uw aandacht.

Ik heb gezegd.

## Literatuur

Berkhout, A.J., Wapenaar, C.P.A. & Verschuur, D.J., 1986-1998, Delphi: Consortium-project op het gebied van seismische beeldvorming en karakterisatie.

Castagna, J.P. & Backus, M.M., 1993, Offset-dependent reflectivity - Theory and practice of AVO analysis: Society of Exploration Geophysicists (S.E.G.).

Dawkins, R., 1986, The blind watchmaker: Penguin Books.

Escher, M.C., 1971, De werelden van M.C. Escher: Meulenhoff.

Fokkema, J.T. & van den Berg, 1996, 4D geophysical monitoring as an application of the reciprocity theorem: Symposium ter ere van prof. A.T. de Hoop.

Ghose, R. & Goudswaard, J.C.M., 2000, Relating shallow S-wave seismic to cone penetration testing (CPT) in soft soil: 70th annual S.E.G. meeting.

Jack, I., 1997, Time-lapse seismic in reservoir management: S.E.G.

Mandelbrot, B.B., 1982, The fractal geometry of nature: W.H. Freeman.

Mavko, G., Mukerji, T. & Dvorkin, J., 1998, The rock physics handbook; tools for seismic analysis of porous media: Cambridge University Press.

Sheriff, R.E., 1992, Reservoir Geophysics: S.E.G.

Tatham, R.H. & McCormack, M.D., 1991, Multicomponent seismology in petroleum exploration: S.E.G.

Tegland, E.R., 1973, Dallas Geophysical and Geological Societies Symposium.

Vogelgesang L.B. & Vlot A., 1998, Development of Fibre Metal Laminates for advanced aerospace structures: Int. Conference SheMet Twente.

Wapenaar, C.P.A. & Berkhout, A.J., 1989, Elastic wave field extrapolation. Redatuming of single- and multi-component seismic data: Elsevier.



**Recente en geplande Delftse proefschriften die samenhangen met het onderwerp van deze rede**

Herrmann, F.J., 1997, A scaling medium representation: a discussion on well-logs, fractals and waves.

Dessing, F.J., 1997, A wavelet transform approach to seismic processing.

van Wijngaarden, A.J., 1998, Imaging and characterization of angle-dependent seismic reflection data.

Vos, J., 2000, Characterization of laminated construction materials based on ultrasonic reflection measurements.

Verhelst, F.J.P.C.M.G., 2000, Integration of seismic data with well-log data.

Dillen, M.W.P., 2000, Time-lapse seismic monitoring of subsurface stress dynamics.

van der Kruk, J., 2001, Three-dimensional imaging of multi-component ground penetrating data.

Schalkwijk, K.M., 2001, Decomposition of multi-component ocean-bottom data into P- and S-waves.

Goudswaard, J.C.M., 2001, Multi-angle multi-scale analysis of seismic reflection data.