

Seismische exploratie van de continentale bovenmantel

door G. Nolet*)

Oceanen en continenten

Het is inmiddels meer dan twintig jaar geleden dat bepaalde geofysische waarnemingen (afwijkingen in het magnetisch veld boven de oceaankorst) leidden tot aanvaarding van de principes van de scholentectoniek. De buitenste laag van de aarde (de lithosfeer) is opgebouwd uit min of meer star bewegende schollen. Waar deze uiteendrijven, zoals op de mid-oceanische ruggen, wordt nieuwe korst gevormd. Waar schollen botsen duikt de oudere lithosfeer terug in de mantel. Hier kan de korst worden verdikt en kunnen gebergtekets worden gevormd.

De scholentectoniek is voortgekomen uit marien onderzoek, en de verklaring van het gedrag van de oceanen en van actieve subductie- (onderduikings-) zones staat binnen deze theorie dan ook centraal. Enkele voorbeelden: de spreiding van de oceaانبodem gaat gepaard met afkoeling. Een fysisch afkoelingsmodel voorspelt dan ook vrij nauwkeurig de toename van de diepte van de oceanen met de ouderdom van de lithosfeer, die op zich weer een functie is van de afstand tot de rug. Dit verklaart waarom we de diepste delen van de oceanen niet in het midden daarvan vinden, maar juist niet ver van de continentranden. Ook verschijnselen aan de rand van de platen, zoals vulkanisme en gebergtevorming, passen goed in de theorie. Hoewel er op detailpunten wel verschillen van mening te

Afb. 1. Een schematische weergave van het "tectosphere"-model van Jordan. De mantel onder de oudste schilden op aarde is ver afgekoeld. Als dit zonder meer een afkoelingsproces was zouden deze schilden nu onder de waterspiegel liggen. De inklinking is niet tegengegaan door groei van de korst, want die blijkt (uit seismologische waarnemingen) een normale dikte te hebben. Een simpele toestroming van gesteente op grote diepte in de mantel zou een massaoverschot veroorzaken, wat echter niet zichtbaar is in het zwaartekrachtsveld. Jordans hypothese is dat de afgekoelde mantel chemisch verschillend is, en daardoor een lagere soortelijke massa heeft dan het gesteente in jongere mantel, en dat dit lichtere gesteente als een wortel met de schilden meebeweegt, en een massaoverschot aldus compenseert.

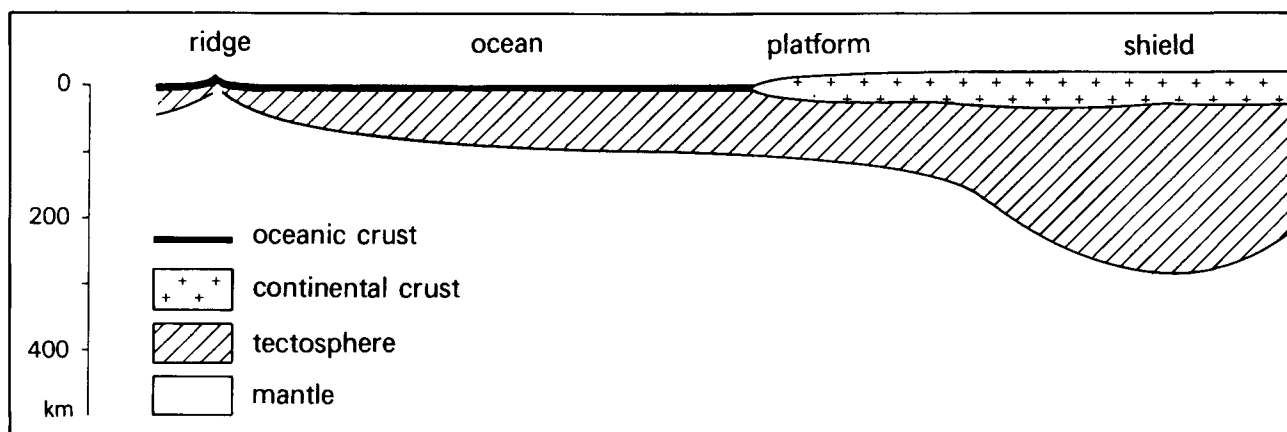
constateren zijn, kan gesteld worden dat de scholentectoniek gezorgd heeft voor een grote mate van eenstemmigheid tussen de meer marien georiënteerde aardwetenschappers.

De situatie is echter anders met betrekking tot de continenten. In feite heeft de scholentectoniek nog weinig eenstemmigheid in de theorieën over de evolutie van continenten opgeleverd. Op dit moment zijn er een aantal theorieën in omloop:

Vroege pogingen om het afkoelingsmodel voor de oceanische bovenmantel ongewijzigd van toepassing te verklaren op continenten leden schipbreuk. Simpele afkoeling zou tot zo'n grote inkrimping van het gesteente aanleiding geven dat bijvoorbeeld het oude Scandinavische schild enkele kilometers onder het wateroppervlak zou moeten liggen, ondanks de korstdikte van zo'n 35 km.

De Amerikaanse geofysicus T.H. Jordan, die deze tegenstrijdigheid voor het eerst aan het licht bracht, ontwikkelde vervolgens de theorie van de "tectosphere". Hij postuleerde dat er belangrijke chemische verschillen zouden kunnen bestaan in de samenstelling van het gesteente onder oceanische en oude continentale gebieden. Deze chemische verschillen zouden kunnen ontstaan door het uitsmelten van de zware basaltische componenten in het gesteente (granaat en clinopyroxeen). Dit proces zou zich tot op diepten van ongeveer 300 km moeten afspelen. Op zich is dat geen probleem, maar het is wel de vraag hoe het peridotitisch (d.i. olivijn-rijk) residu-gesteente als een eenheid onder het oude deel van de schol blijft meebewegen: onder de oceanen varieert de dikte van de schol tussen 10 km bij de rug en 120 km voor de oudste oceaanolithosfeer, zoals in het westen van de Stille Oceaan. Uit seismische waarnemingen zijn er inderdaad aanwijzingen voor het bestaan van een diepe "wortel" van afwijkend materiaal onder de oude schilden, al is het nog lang

*) De auteur is als hoogleraar verbonden aan de afdeling theoretische geofysica van de Rijksuniversiteit Utrecht.



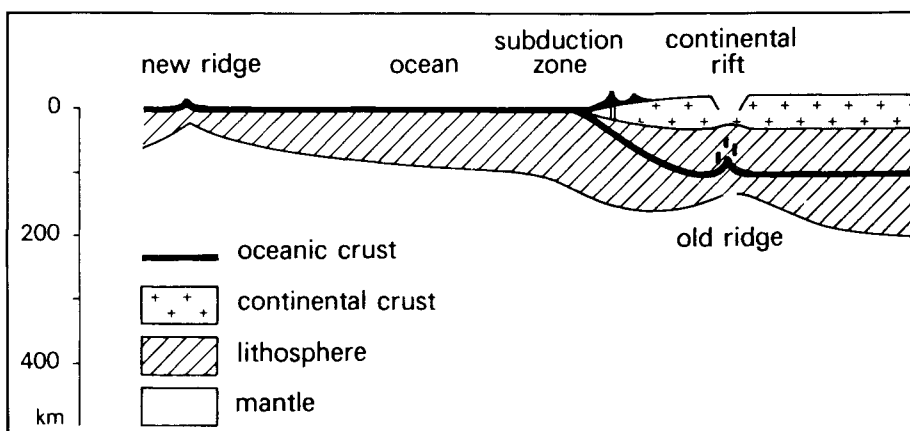
niet duidelijk tot op wat voor diepte deze meebewegende laag, die door Jordan "tectosfeer" werd genoemd, zich uitstrekt (zie afb. 1).

De Utrechtse hoogleraar N.J. Vlaar ontwikkelde een alternatieve theorie, waarmee ook een aantal geologische verschijnselen op continenten wat begrijpelijker worden. Om deze te kunnen begrijpen moeten we eerst de rol van het subductie- of onderduikingsproces wat nader bekijken. Alle bewegingen van het mantelgesteente hebben uiteindelijk één doel: de aarde te doen afkoelen. Het gesteente dat onder de mid-oceanische ruggen met een snelheid van enkele centimeters per jaar naar boven stroomt, voert daarmee warmte af vanuit het diepe inwendige naar het oppervlak van de aarde. Eenmaal aan het oppervlak koelt het gesteente steeds verder af. De terugkeer van de afgekoelde lithosfeer naar de mantel, aan de oceanische troggen, voltooit deze kringloop. Fysisch is terugkeer mogelijk omdat het gesteente bij zijn afkoeling een hogere soortelijke massa krijgt. Omdat de terugkerende lithosfeer een waar "spoor" van aardbevingen in de mantel trekt, kunnen we dit proces tot op een diepte van 700 km goed volgen uit seismologische waarnemingen.

Hoewel het hierboven beschreven fysische principe juist is, is de geologische werkelijkheid veel gecompliceerder: vaak worden van verschillende kanten krachten op platen uitgeoefend, en schuiven platen over elkaar. Vlaars theorie is gebaseerd op de observatie dat oude, ver afgekoelde oceanbodembij subductie of overschuiving dieper en sneller in de mantel wegzinkt dan jonge, nog warme oceanische lithosfeer. Zeer jonge lithosfeer is zelfs helemaal niet zwaarder dan het omringende gesteente en het blijft dan ook het liefst "drijven". Berekeningen tonen aan dat de oceanische lithosfeer pas na ongeveer 30 miljoen jaar zover is afgekoeld dat ze zwaarder is geworden dan het onderliggende gesteente. De continentale lithosfeer kan echter wel over de jonge oceaankorst heenschuiven, tengevolge waarvan de oceanische lithosfeer onderaan het continent zal "plakken".

Het is een proces dat we nu waarnemen aan de westkust

Afb. 2. Een schematische voorstelling van het model van lithosfeerverdubbeling dat door de Nederlandse geofysicus Prof. Dr. N.J. Vlaar is ontwikkeld: indien een jong oceanisch bekken wordt "overreden" door een continent, zal het te licht zijn om in de mantel weg te zinken. Dit leidt tot verdubbeling van de lithosfeer onder continenten, en waarschijnlijk tot een sterke gelaagdheid van de mantel. Indien ook een actieve rug subduceert, zoals in deze figuur aangegeven, geeft de thermische anomalie aanleiding tot ingrijpende geologische verschijnselen zoals opheffing en slenkvorming.



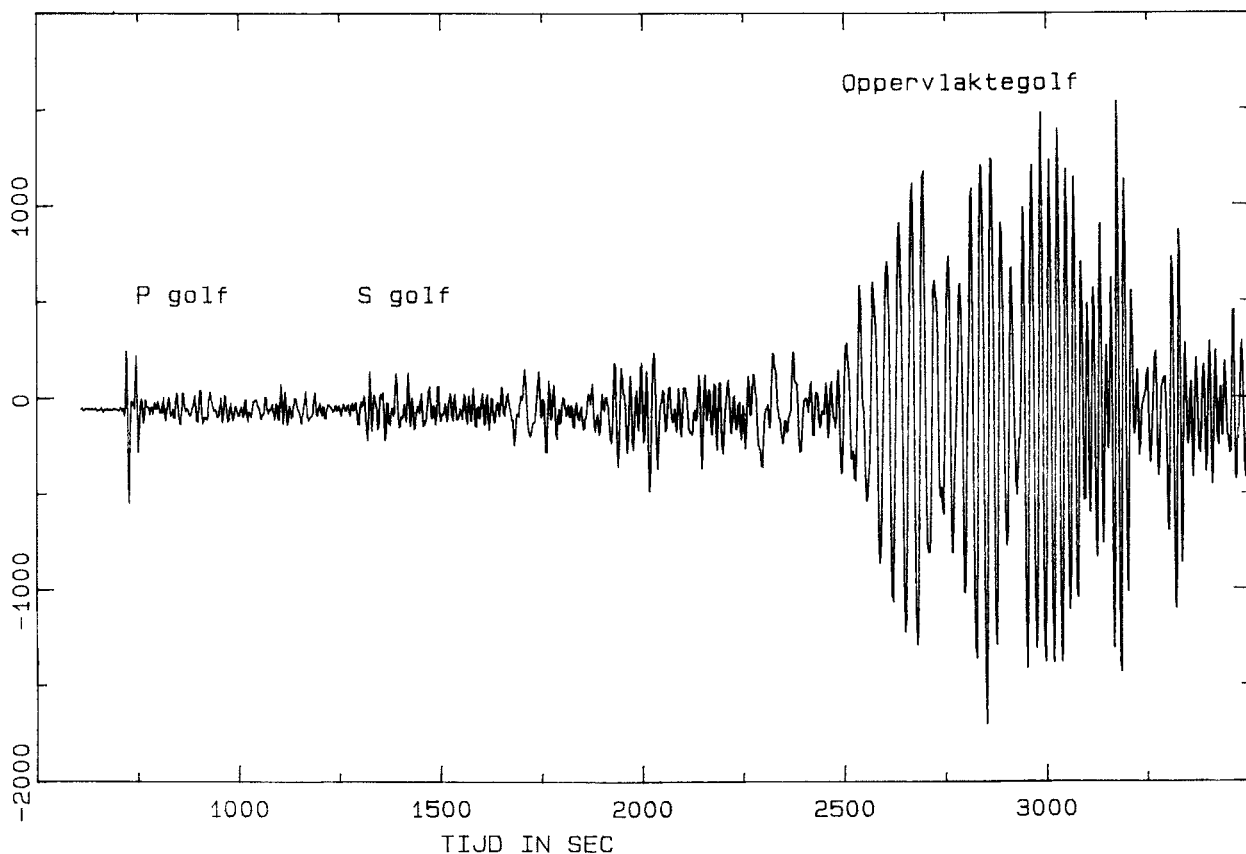
van Noord-Amerika, maar dat mogelijkveel meer algemeen is dan tot voor kort werd aangenomen. Uit berekeningen blijkt namelijk dat de jonge oceanische lithosfeer, door zijn grotere buigzaamheid, veel makkelijker in de mantel kan duiken dan oudere lithosfeer. Die laatste is niet alleen zwaarder, maar ook sterker — en dat laatste effect weegt ruimschoots op tegen de zwaartekracht, tenzij er zwaktezones (zoals breuken) aanwezig zijn. Dit model van "lithosfeerverdubbeling" zou aanleiding moeten geven tot sterke gelaagdheid van de mantel (zie afb. 2).

Ook over de chemische en mineralogische samenstelling van de continentale bovenmantel bestaat geen volledige overeenstemming. Ofschoon het merendeel van de aardwetenschappers ervan uitgaat dat de mantel een peridotitische (olivijn-) samenstelling heeft, met pyroxenen als voornaamste tweede bestanddeel, betoogt de Amerikaanse geofysicus D.L. Anderson dat dit alleen geldt voor de bovenste 200 km van de mantel. Daaronder zou zich een laag eclogitisch materiaal hebben verzameld, die zich uitstrekt tot op 650 km diepte, de diepte waarop met seismische golven een belangrijke discontinuïteit wordt waargenomen. (Eclogiet bestaat voornamelijk uit granaat en clinopyroxeen, en is op te vatten als de hogedrukfase van basalt.) Een van Andersons argumenten is dat er een zeer grote discrepantie bestaat tussen de relatieve hoeveelheden basaltisch gesteente in de Maan en de Aarde, indien alle basalt van onze planeet in de korst zou zijn opgeslagen.

Seismische golven

Aardwetenschappers proberen niet alleen de voorbije historie van de planeet te ontrafelen uit waarnemingen in het heden, ze staan ook voor de taak de samenstelling van het inwendige van de Aarde te onderzoeken uit waarnemingen aan het oppervlak. Het is mogelijk dat de resultaten van deze onderzoeken tot in lengte van dagen iets speculatiefs zullen blijven behouden: we zijn immers nimmer in staat af te dalen en de mantel zelf in ogenschouw te nemen, net zo min als we ooit naar het verleden kunnen afreizen om onze ideeën te toetsen. In tegenstelling tot het meer op de tijd gerichte geologische onderzoek is het geofysische onderzoek naar het inwendige van de aarde zeer jong. Lang niet alle methoden om tot een verbeterd beeld van de mantel te komen zijn al uitgeprobeerd, en er worden steeds nieuwe mogelijkheden ontdekt.

De bruikbare geofysische waarnemingen aan het aardoppervlak betreffen het zwaartekrachtsveld, het magnetisch veld, de warmteafgifte en de respons van de aarde op



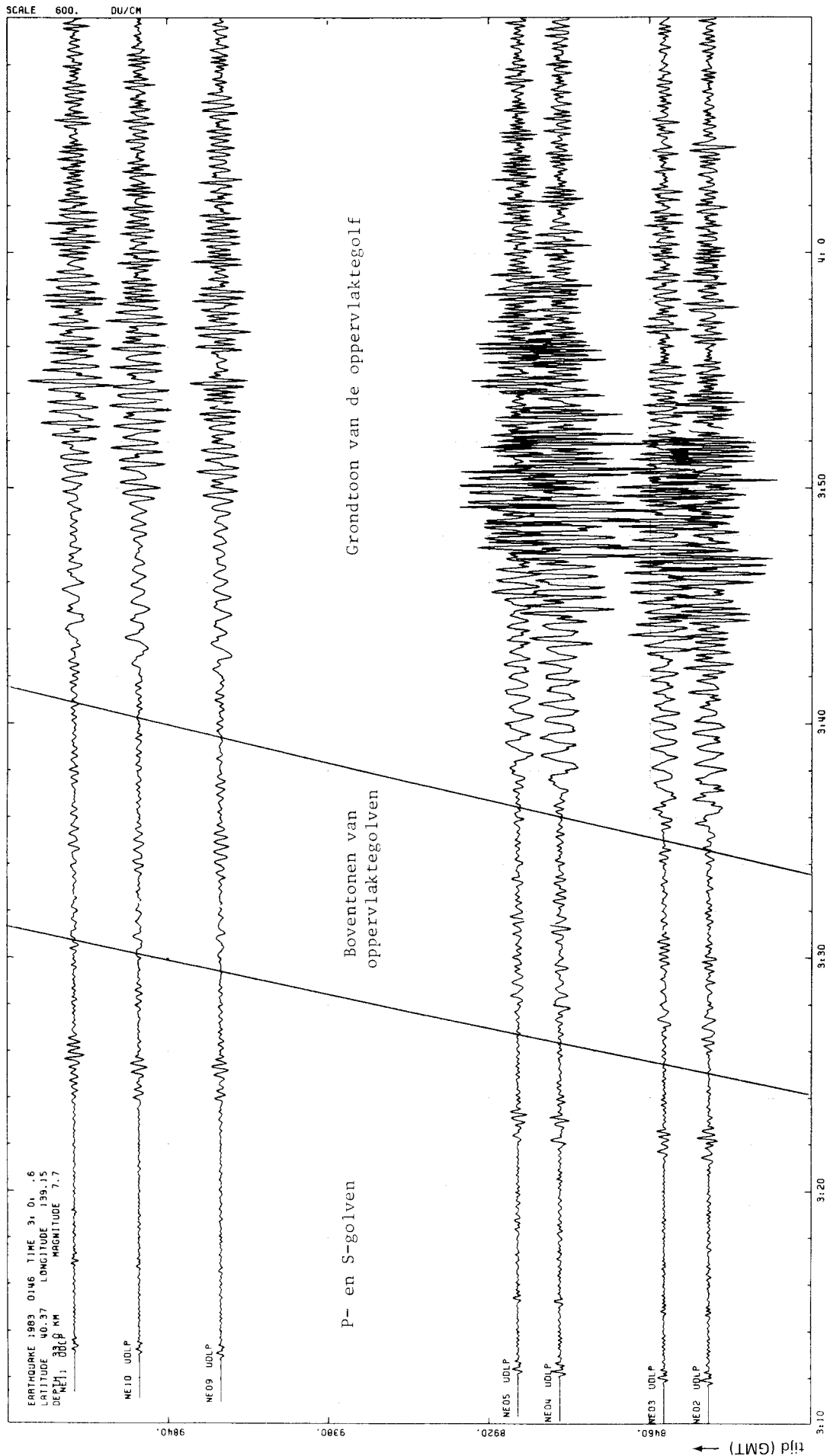
Afb. 3. Een voorbeeld van een seismogram van een ondiepe aardbeving op grote afstand van de bron: het betreft hier een aardbeving in Japan, en de registratie daarvan in het NARS-station in Valkenburg. De P-golf of "primary wave" arriveert als eerste. Deze golf doorkruist het gesteente van de aardmantel met snelheden tussen 8 en 13 km/sec. De S-golf ("secondary wave") wordt met snelheden tussen 4 en 7 km/sec in de mantel doorgelaten. Maar het opvallendste fenomeen op dit seismogram is de oppervlaktegolf, die zich als een rimpeling over het oppervlak van de aarde voortplant (snelheid tussen 3 en 4 km/sec). Duidelijk is te zien dat de langzame trillingen van deze golf eerder arriveren dan de meer hoogfrequente trillingen. Dat komt omdat de langzame trillingen dieper in de mantel doordringen en daar veerkrachtiger gesteente tegenkomen. Uit de snelheidsverschillen tussen deze hoog- en laagfrequente trillingen kunnen seismologen afleiden hoe de elastische eigenschappen van de aardmantel met de diepte variëren. De hier aangegeven grondtoon van de oppervlaktegolf reikt tot op zo'n 150 à 200 km diepte.

aardbevingen. Het zijn met name deze laatste, de **seismische** waarnemingen, die ons de meest gedetailleerde informatie over het aardinwendige verschaffen. Hoogfrequente seismische golven doorsnijden de aarde en afwijkingen van de snelheid waarmee het gesteente deze golven doorlaat kunnen tegenwoordig letterlijk "in kaart" gebracht worden. Die snelheid is op zich weer een maat voor de veerkrachtigheid van het gesteente. Er is een duidelijke analogie met de röntgendiagnostiek in de geneeskunde, met dit verschil dat de seismoloog geen kunstig geconstrueerd apparaat voor de opwekking van golven heeft, maar afhankelijk is van het voorkomen van aardbevingen, waarvan hij plaats noch tijd in de hand heeft.

Er zijn twee soorten van seismische golven: longitudinale of P-golven, met een bewegingspatroon dat het beste als "duw-trek" kan worden gekarakteriseerd, en transversale of S-golven, met een bewegingspatroon dat zijwaarts is, zoals dat van een snaar. De snelheden waarmee deze golven zich voortplanten hangt af van het soort gesteente, maar ook van de temperatuur. Een geringe hoeveelheid smelt kan de S-snelheid drastisch omlaagbrengen. P- en S-golven planten zich door de aarde voort zoals lichtgolven door een lens.

Andere golven zijn laagfrequent (met perioden in de orde van een minuut) en planten zich voort als een rimpeling **langs het oppervlak van de aarde**, zoals golven in een vijver waarin een steen wordt gegooid. Dat maakt deze golven zeer geschikt voor de bestudering van de aardmantel. Deze zg. "oppervlaktegolven" hebben bovendien het voordeel dat ze niet alleen informatie geven over de snelheden van seismische golven, maar ook over de dichtheid van het gesteente. Het meest gangbare type oppervlaktegolf staat bekend als de "grondtoon" en is het opvallendste fenomeen op het seismogram van een ondiepe aardbeving (zie afb. 3). Analyses van de snelheden van deze grondtoon als functie van de frequentie hebben ons geleerd dat zich een laag met waarschijnlijk gedeeltelijk gesmolten materiaal bevindt op dieptes die kunnen variëren tussen 50 en 200 km. Dit is de "asthenosfeer". Het is niet duidelijk of de asthenosfeer ook, wellicht op een wat dieper niveau, aangetoond kan worden onder de oudste schilden. Helaas komt de grondtoon niet diep genoeg om gedetailleerd bovenmantelonderzoek mogelijk te maken. Oppervlaktegolven kennen echter ook "boventonen". In de waarneembare frequentieband reiken deze boventonen tot een diepte van 700 km en meer. De boventonen hebben als groot nadeel dat hun snelheden zeer moeilijk meetbaar zijn. Op een seismogram komen deze golven meestal in groepjes tegelijk binnen, en de snelheidsmetingen falen in het algemeen met gangbare methoden (afb. 4).

WEST COAST OF HONSHU 26 MAY 1983

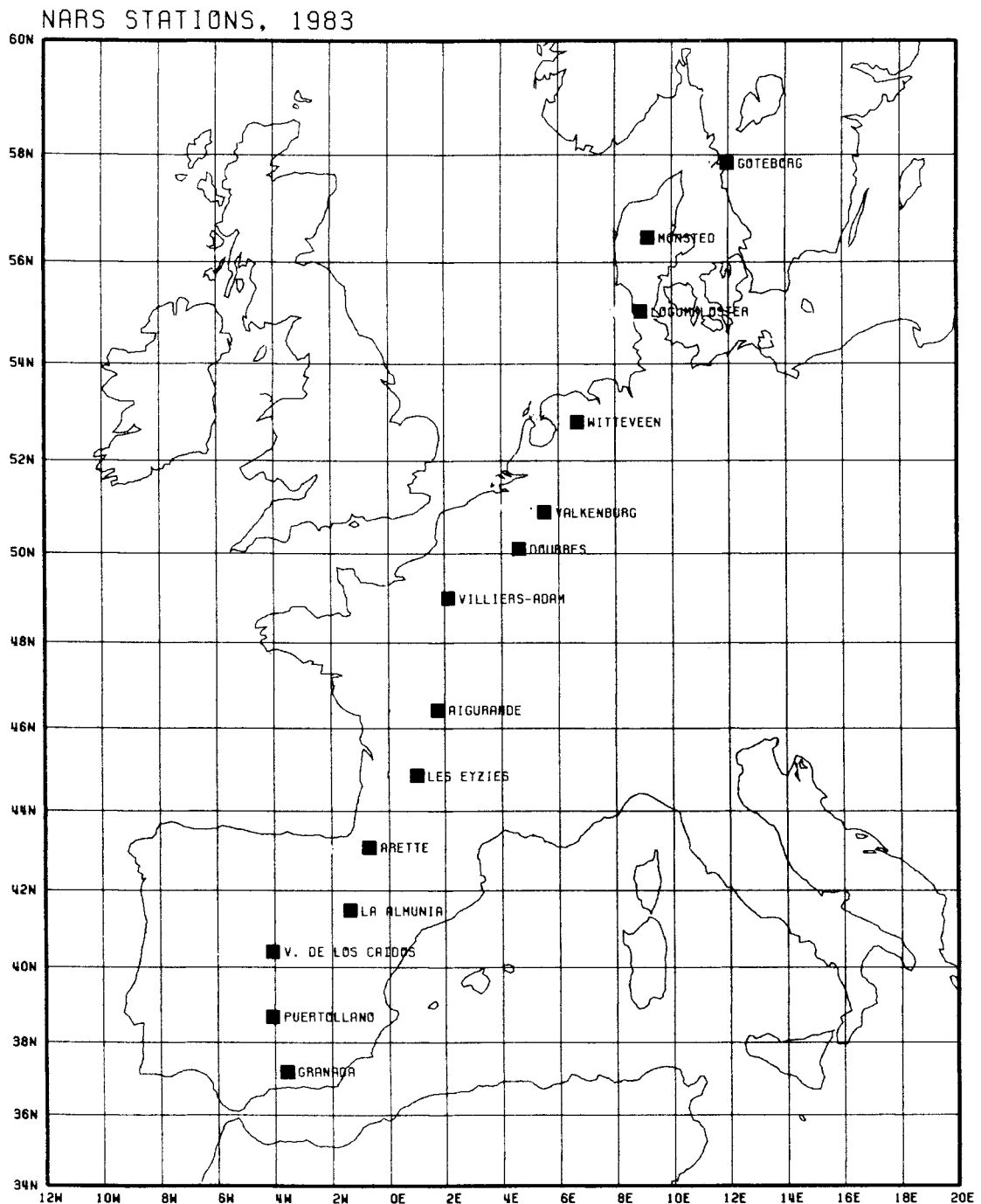


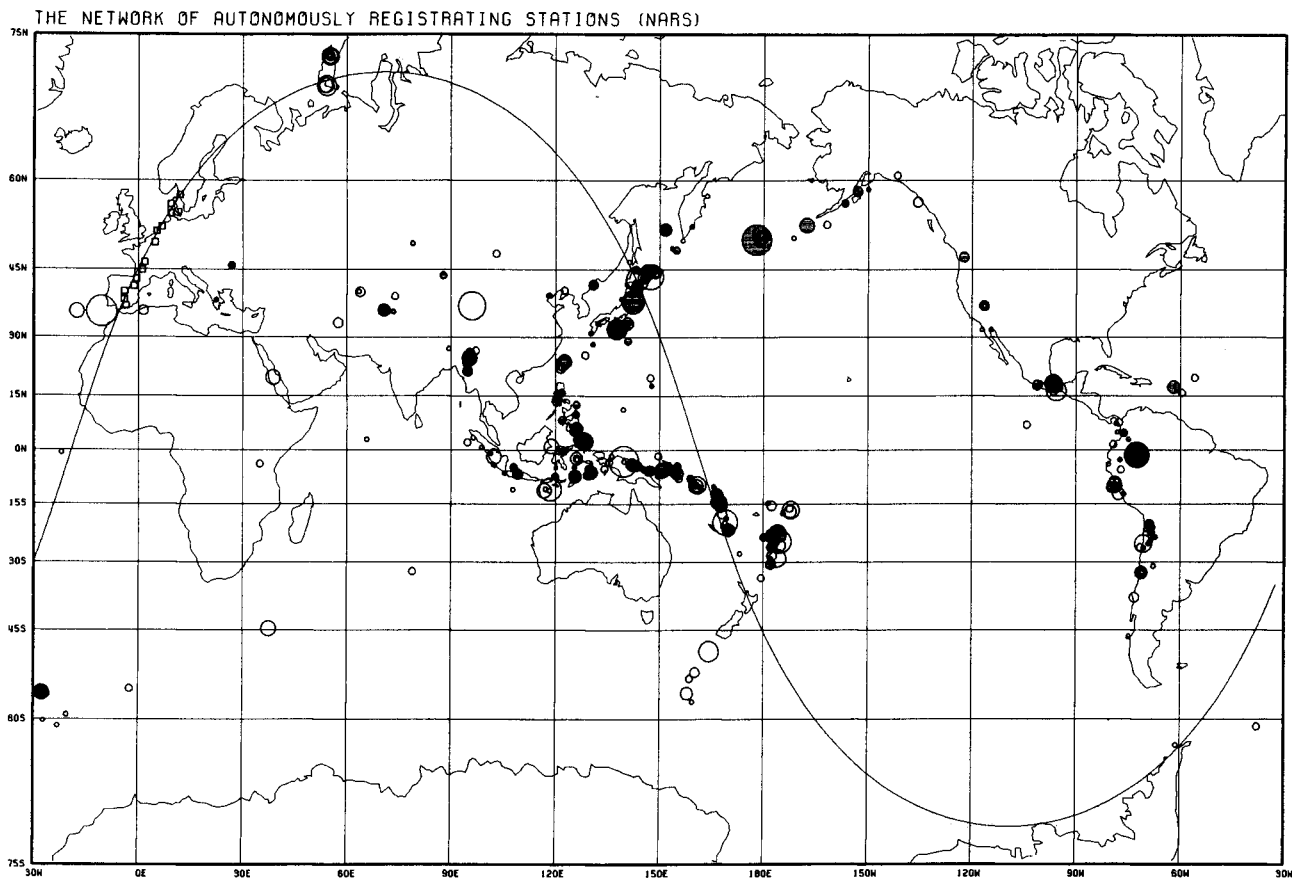
Afb. 4. Deze figuur toont hoe een aantal boventonen van oppervlaktegolven zich langs de stations van het NARS-netwerk voortplanten. In tegenstelling tot de grondtoon komen deze boventonen aanzienlijk dieper (600 km), en geven veel gedetailleerder informatie over de samenstelling van de mantel.

op een bepaald gebied van de hemel, en de manier waarop we een serie seismometers zo kunnen combineren dat een bepaalde boventoon wordt versterkt. Een eerste serie metingen werd rond 1975 uitgevoerd en toonde aan dat de methode in principe werkbaar is. Daarbij werd gebruik gemaakt van bestaande seismologische stations van het World Wide Standard Seismograph Network (WWSSN).

Om deze boventonen toch te kunnen meten, hebben Utrechtse seismologen gebruik gemaakt van het beginsel dat seismische golven van elkaar te scheiden moeten zijn door ze niet in één station te meten, maar in een hele serie stations, die samen als één antenne worden opgevat. Er bestaat een duidelijke analogie tussen de manier waarop de radioastronomen in Westerbork hun telescopen richten

Afb. 5. De stations van het Netwerk van Autonoom Registrerende Seismografen (NARS) zijn voor de duur van 4 jaar in Europa geplaatst, met het oogmerk de aardmantel daar tot in detail te bestuderen. Elk van deze stations bevat een drietal seismometers. Deze zijn gekoppeld aan een microprocessor die de signalen analyseert en zo nodig op magnetische tapes opslaat.





Afb. 6. De NARS-stations staan in één lijn, en de analyse van oppervlaktegolven geschiedt optimaal voor aardbevingen die zich dichtbij de grote cirkel door deze lijn van stations bevinden (zie de getrokken lijn). NARS is gericht op het westelijk deel van de Stille Oceaan, waar de aardbevingsactiviteit zeer groot is. De zwaarste aardbevingen uit het tijdperk 1970-1980 zijn aangegeven met cirkels. De grootte van de cirkel is evenredig aan de sterkte van de beving, de zwarting is een maat voor de diepte daarvan (deze varieert tussen 0 en 700 km).

Het Netwerk van Autonom Registerende Seismografen

De snelle opkomst van microprocessors in de tweede helft van de jaren 70 maakte het mogelijk om onbemande stations in te richten. De afdeling theoretische geofysica van de Rijksuniversiteit in Utrecht heeft zich de afgelopen jaren bezig gehouden met de inrichting van een netwerk van seismologische stations dat speciaal is ontworpen voor de meting van boventonen van seismische oppervlaktegolven. Dit Netwerk van Autonom Registerende Seismische Stations (NARS) werkt met kleine computers, die als het ware het seismisch signaal "afluisteren". Detecteert zo'n computer de aankomst van een aardbevings signaal, dan slaat het de registratie ervan op op een cassettebandje, dat eens per week moet worden verwisseld. De bandjes worden vervolgens naar het datacenter in Utrecht gestuurd om daar verder te worden geanalyseerd. De "antenne" van NARS staat sedert eind 1983 opgespannen tussen Goteborg (Zweden) en Granada (Spanje), en is gericht op het seismisch actieve gebied van de westelijke Stille Oceaan (afb. 5 en 6). Het is op dit moment nog te vroeg om definitieve conclusies te kunnen trekken uit de nu voorhanden zijnde

gegevens die met NARS zijn verzameld. Niettemin zijn we bij de allereerste analyses al voor enkele verrassingen komen te staan, die, indien ze door nader onderzoek bevestigd worden, van groot belang zullen blijken te zijn. De Utrechtse seismoloog Drs. Bernard Dost onderzocht de trillingen van vier zware aardbevingen in Japan en een in West-Afrika. Hij wist de boventonen van elkaar te scheiden tot frequenties van 70 mHz (milliHertz, d.w.z. 70 perioden in een tijdsbestek van 1000 seconden), praktisch een verdubbeling van het frequentiebereik van 10-40 mHz dat met "klassieke" seismologische stations in het verleden was behaald. Deze hoge frequenties vergroten met name de precisie waarmee we de eigenschappen van het gesteente in de bovenste 400 km van de mantel kunnen bepalen. De eerste gegevens bevatten sterke aanwijzingen voor het bestaan van een afwijkende laag op zo'n 100 km diepte onder het netwerk. De laag kenmerkt zich door een veerkracht die hoger is dan die van olivijn of pyroxeen, en die eigenlijk alleen goed door een zwaar eclogitische samenstelling zou kunnen worden verklaard. De laag is wellicht enkele tientallen km dik. Daaronder zou het gesteente weer peridotitisch van samenstelling kunnen zijn.

Een speculatieve verklaring van een eclogitische laag zou gevonden kunnen worden in Vlaars model van lithosfeerverdubbeling. De basaltische korstlaag, die zich bovenop de oceanische lithosfeer bevindt, komt bij subductie onder zeer hoge druk te staan, en zal geleidelijk transformeren tot eclogiet. Het is vooraansnog een raadsel waarom deze laag, die veel zwaarder wordt dan het gesteente eronder, niet verder naar beneden zakt. Aan de andere kant is er zeer weinig bekend over de stromingseigenschappen van gesteenten onder de temperatuur- en drukcondities die in de bovenmantel heersen, en moet een langdurige stabiliteit van een zware laag niet onmogelijk geacht worden. Voorlopig is de aandacht van de NARS-onderzoekers gericht op het verkrijgen van meer waar-

nemingen die het bestaan van deze laag kunnen bevestigen, en de eigenschappen ervan met wat grotere precisie kunnen bepalen.

Literatuur

Binnenkort verschijnen twee wetenschappelijke artikelen

waarin meer in detail wordt ingegaan op deze voorlopige bevindingen met het NARS-netwerk:

B. Dost, Preliminary results from higher mode surface wave measurements in western Europe using the NARS array, in druk in Tectonophysics, 1986.

G. Nolet, B. Dost en H. Paulssen, The first NARS results: a preliminary appraisal, voor publicatie aangeboden aan Geologie en Mijnbouw, 1986.

De fosfaatmineralen van Blaton (Henegouwen, België)

door W. Israël

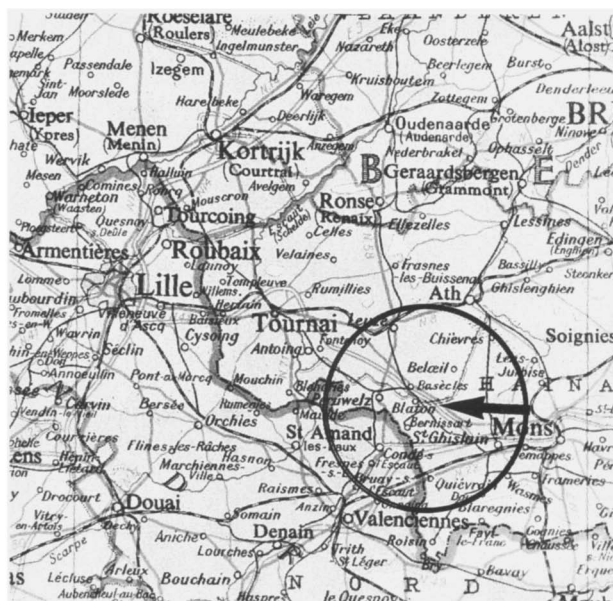
Localisatie

De bij velen bekende "vindplaats Blaton" is ontstaan door het graven van het binnenvaartkanaal Nimy-Blaton in de jaren vijftig (afb. 1). Ten zuiden van het dorp Blaton snijdt dit kanaal door de Mont des Groseillers. De kanaalbedding ligt ongeveer 25 meter dieper dan het oorspronkelijke niveau. Aldus ontstond een ontsluiting in gesteenten van het Namurien (Boven-Carboon) en van de overgang van het Boven-Viséen (Onder-Carboon) naar het Namurien.

De zwarte gesteenten bestaan uit pyriethoudende kiezel-schalies met zwarte vuursteenknollen. De gelaagdheid is zeer regelmatig en heeft een helling van 20° tot 30° naar het zuiden.

In de diaklazen en ook in de splijtingen van de schalies worden een veertiental fosfaatmineralen en talrijke andere species gevonden. Naar Belgische normen kan zeker van een rijke vindplaats worden gesproken, althans voor de micromountverzamelaar.

Afb. 1. Geografische ligging van Blaton



Vanaf het begin der werkzaamheden werden de mineraal-vondsten bestudeerd door Prof. Dr. R. van Tassel (Kon. Belg. Inst. voor Natuurwetenschappen). Zijn aandeel in de bibliografie getuigt daarvan (Van Tassel 1956, 1959, 1960, 1966, 1981, 1982). Van zijn werk maakten wij dankbaar gebruik.

Van de fosfaatmineralen zullen er hier tien worden behandeld.

Zie voor het voorkomen van een aantal mineralen langs het kanaal Nimy-Blaton afb. 2. *)

Overzicht van de voorkomende mineralen

Sulfiden: pyriet.

Oxiden: kwarts.

Sulfaten: bariet, gips, jarosiet, copiapiet, coquimbiet, epsomiet, halotrichiet, metavoltien, rozeniet.

Fosfaten: crandalliet, strunziet, berauniet, strengiet, fosfosideriet, cacoxeniet, minyuliet, evansiet, whitmoreiet, vivianiet, rockbridgeiet, mitridatiet, apatiet, destineziet.

Silicaten: kaoliniet, allofaan, halloysiet.

Carbonaten: calciet, dolomiet, sideriet.

Mineraalbeschrijvingen

CRANDALLIET: $\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$

De eerste specimens van crandalliet werden te Blaton verzameld in 1955 en onderzocht door de Belgische Geologische Dienst. Aanvankelijk werd het door de verzamelaars voor wavelliet gehouden. Macroscopisch is inderdaad verwarring tussen beide soorten mogelijk. Ook minyuliet lijkt heel sterk op crandalliet en wavelliet. Toen het een uitgemaakte zaak was dat het wel degelijk om crandalliet ging, noemde men het daarna nog dikwijls

*) Aan de ene kant van het kanaal Nimy-Blaton staan grote betonnen ramen als beschoeiing. In de uitgespaarde ramen zit crandalliet. Aan de andere zijde van het kanaal komen de andere mineralen in micromountgrootte voor. Brokjes liggen gewoon voor het oprapen aan de onderkant van het talud. Hakken is nauwelijks nodig. Informatie d.d. april 1985.