

# Seismische stralen en lichtstralen

C. FLOOR. *Stichting Opleiding Leraren, Utrecht*

Voor het verkrijgen van gegevens over het inwendige van de aarde kunnen we geen gebruik maken van directe waarnemingen ter plaatse. Met boringen komt men niet verder dan enkele kilometers de aardkorst in. Door geologische processen kunnen wel eens lagen aan de oppervlakte komen die zich oorspronkelijk tot ongeveer 25 kilometer onder het aardoppervlak bevonden. Vulkanen stoten gesmolten gesteente uit dat afkomstig is van een diepte van 60–100 km. Vergelijken we deze dieptes met de straal van de aarde (ca. 6400 km) dan zien we dat op deze manier het grootste gedeelte van het inwendige van de aarde onbekend terrein zou blijven.

Een van de methoden om gegevens over grotere dieptes te verkrijgen maakt gebruik van de longitudinale en transversale trillingen die door aardbevingen of kernexplosies worden uitgezonden. Deze planten zich voort door de aarde en bereiken waarnemingsstations op diverse plaatsen, waar ze door seismografen worden geregistreerd.

De wijze waarop seismische stralen zich voortplanten door een medium vertoont grote overeenkomsten met de manier waarop lichtstralen, af-

komstig van een puntvormige lichtbron, zich voortplanten. Bij de hieronder te beschrijven modellen van de aarde wordt de kennis uit de geometrische optica benut voor het trekken van konklusies over het inwendige van de aarde. Het onderwerp biedt zo dus de gelegenheid de wetten van terugkaatsing en breking in een ander dan het gebruikelijke kader aan de orde te stellen.

Lichtstralen en seismische stralen worden met elkaar vergeleken in de tabel<sup>1</sup>.

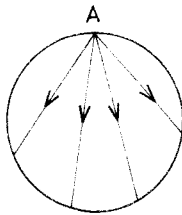
## *De aarde als homogene bol*

Het eenvoudigste model voor het inwendige van de aarde is dat van de homogene bol<sup>3</sup>. De seismische snelheden zijn overal gelijk. Als waarden kiezen we een gemiddelde van de waarden die aan het aardoppervlak gevonden worden: voor longitudinale (P--) golven  $v_p = 5,7 \text{ km s}^{-1}$ ; voor transversale (S--)  $v_s = 3,3 \text{ km s}^{-1}$ <sup>4</sup>

In een dergelijke aarde planten seismische trillingen zich rechtlijnig voort (figuur 1). De tijd tussen het tijdstip van de aardbeving en het moment

Tabel

	Lichtstralen	Seismische stralen
aard van de golven	transversale elektromagnetische golven	longitudinale en transversale elastische golven
rechtlijnige voortplanting	in een medium met constante $n$ (of constante voortplantingssnelheid)	in een medium met een constante seismische snelheid
terugkaatsing of breking	bij een abrupte verandering van de brekingsindex (of van de lichtsnelheid)	bij een abrupte verandering van de seismische snelheid
terugkaatsing en breking aan het grensvlak tussen twee media met constante brekingsindex - vlak van de invallende, teruggekaatste en gebroken straal	alle stralen liggen in het vlak door de invallende straal en de normaal	idem
- terugkaatsingshoek	gelijk aan de invalshoek	gelijk aan de invalshoek <sup>2</sup>
- Wet van Snellius	$\sin i / \sin r = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$	$\sin i / \sin r = \frac{v_1}{v_2}$
- totale terugkaatsing	kan optreden als $n_2 > n_1$ ( $v_1 < v_2$ )	kan optreden als $v_1 < v_2$
voortdurende straalkromming	in een medium waarin de brekingsindex (of de lichtsnelheid) continu verandert met de plaats. De lichtstralen zijn gekromd.	in een medium waarin de seismische snelheden continu veranderen met de plaats. De stralen zijn gekromd.



Rechtlijnige voortplanting van seismische stralen door een homogene bol (A = aardbevingshaard aan de oppervlakte).

waarop een seismograaf begint uit te slaan kan berekend worden (aanhangsel 1) en is uitgezet in figuur 2 (stippellijnen). Als maat voor de afstand is de haardafstand  $\Delta$  gebruikt: deze wordt gegeven door  $\angle AMS$  in figuur 3 en wordt uitgedrukt in graden. In de grafiek van figuur 2 zijn tevens de looptijdcurven getekend die gebaseerd zijn op de waarnemingen van de seismografische stations op aarde (getrokken lijnen).

Vergelijking van de gestippelde en getrokken krommen levert de volgende verschillen:

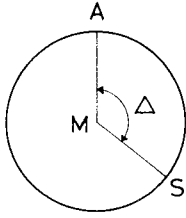
1. Op waarnemingsstations waarvoor de haardafstand meer dan 103 bedraagt, worden geen directe transversale trillingen geregistreerd.

2. De waargenomen looptijdcurven liggen onder de berekende.



Figuur 2

Looptijdcurven van seismische golven. Berekende (gestippeld) en waargenomen (getrokken) waarden. P: longitudinale golven; S: transversale golven.



Figuur 3

Haardafstand  $\Delta = \angle AMS$ : A = aardbevingshaard; S = seismograaf.

3. Op waarnemingsstations waarvoor  $103 < \Delta < 143$  worden in het geheel geen directe trillingen geregistreerd<sup>5</sup>. De looptijdcurve voor de longitudinale golven is onderbroken.

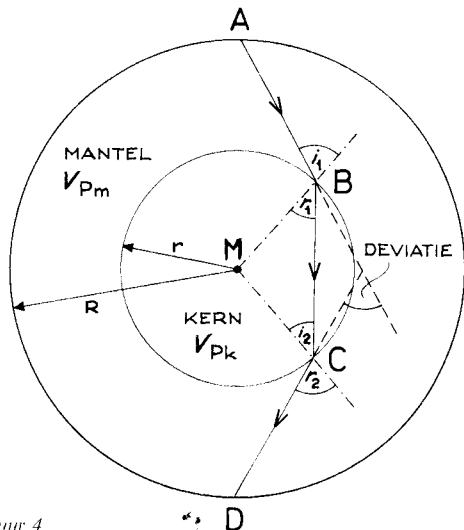
Het gebied waarvoor geldt  $103 < \Delta < 143$  noemt men de schaduwzone van de longitudinale seismische trillingen.

Bovendien zien we in figuur 2 dat de waargenomen looptijdcurve voor longitudinale trillingen ( $\Delta > 143$ ) P' is verschoven ten opzichte van die kromme ( $\Delta > 103$ ) (getrokken P).

We zullen deze verschillen nu bespreken, waarbij de laatste punten het eerst aan bod komen.

#### Model van mantel en kern

Longitudinale trillingen die dwars door de aarde heengaan ( $\Delta > 143$ ) hebben hiervoor meer tijd nodig dan men op grond van extrapolatie van de



Figuur 4

Konstruktie van seismische stralen in een aardmodel met mantel en kern.

$$v_{p,m} = 1.5 v_{p,k}; r = \frac{1}{2}R.$$

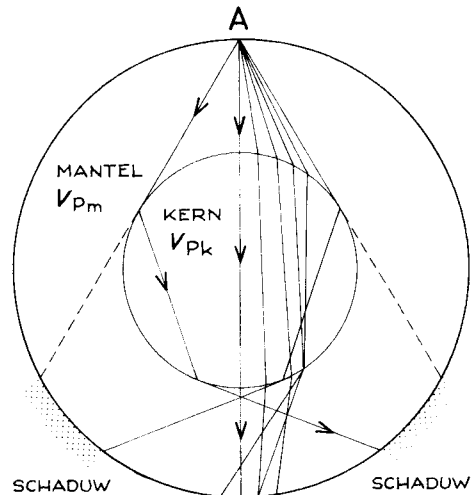
looptijdcurve voor  $\Delta < 103$  zou verwachten. Een verklaring hiervoor kan gevonden worden door aan te nemen dat zich in de aarde een gebied bevindt waar de seismische snelheden lager zijn dan daarbuiten. Men noemt dit gebied met lage seismische snelheden de 'aardkern', het gebied daarbuiten de 'aardmantel'. Het model voor het inwendige van de aarde corrigeren we hiervoor. De stralengang van de seismische trillingen kan gekonstrueerd worden voor een aardbevingshaard A op het aardoppervlak, onder aanname dat b.v. de straal  $r$  van de kern de helft bedraagt van de aardstraal  $R$  ( $r = \frac{1}{2}R$ ) en dat de snelheid van de seismische golven in de mantel  $\frac{1}{2}$   $\times$  zo groot is als in de kern ( $v_{p,m} = 1.5v_{p,k}$ ). De constructie verloopt volkomen analoog aan die, waarbij lichtstralen afkomstig van een in lucht opgestelde puntvormige lichtbron A een glazen bol (of cylinder) met een brekingsindex  $n = 1,5$  treffen ( $AM = 2r$ ).

Figuur 4 geeft de details van een dergelijke constructie; figuur 5 het resultaat. Bij de constructie wordt gebruik gemaakt van de Wet van Snellius in de vorm

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}.$$

#### De schaduwzone

We zien in figuur 5 dat het gekozen model van mantel en kern tevens een schaduwzone oplevert.



Figuur 5 Stralengang in een aardmodel met mantel en kern

$$v_{p,m} = 1.5 v_{p,k}; r = \frac{1}{2}R.$$

We kunnen geen stralen konstrueren zó, dat ze in het aangegeven schaduwgebied het aardoppervlak bereiken.

De straal van de kern is te berekenen, uitgaande van het gegeven dat de schaduwzone begint als  $\Delta = 103$  (aanhangel 2). In dit model bedraagt deze 3984 km. Seismische stralen die het aardoppervlak bereiken op een haardafstand van meer dan 143 hebben een weg door zowel mantel als kern afgelegd. In figuur 2 zijn ze aangegeven met P' 6, om ze te onderscheiden van de stralen, die uitsluitend door de mantel zijn gegaan.

Het ontstaan van de schaduwzone kan ook geïllustreerd worden met de proefopstelling van figuur 6<sup>7</sup>. Deze bestaat uit een cylinder die omwikkeld is met doorzichtig papier dat als scherm fungeert.

Binnenin bevindt zich een tweede cylinder (b.v. een jampot) waarvan de straal kleiner is dan van de eerste en die gevuld is met water. Een klein lampje fungeert als lichtbron. Duidelijk is het optreden van 2 schaduwzones te zien (figuur 7): recht tegenover de lichtbron is het scherm verlicht.

### Seismische snelheden

Het gewijzigde model levert nog geen verklaring voor het verschil tussen de waargenomen en de berekende looptijd-krommen in de mantel (figuur 2). De looptijden zijn korter dan verwacht, de seismische snelheden dus groter. Kennelijk nemen in de mantel de seismische snelheden toe met toenemende diepte. Op grond van uitvoeriger beschouwingen dan hier mogelijk zijn, neemt men aan, dat de snelheid afhangt van de diepte op de manier zoals is aangegeven in figuur 8<sup>8</sup>.

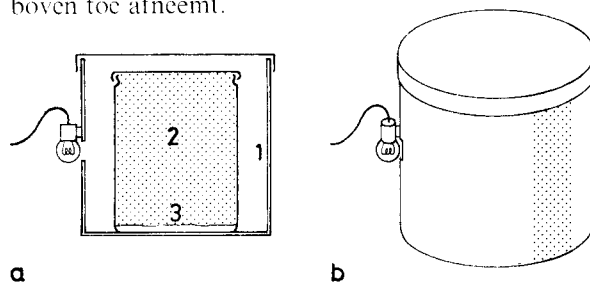
Zowel in figuur 2 als in figuur 8 ontbreken transversale trillingen die de kern doorlopen. Op grond hiervan konkludeert men dat de kern (of een gedeelte daarvan) vloeibaar (of gasvormig) moet zijn, omdat transversale trillingen zich niet door vloeistoffen en gassen kunnen voortplanten.

### Stralengang van de seismische golven

De geleidelijke snelheidstoename in de mantel

heeft tot gevolg dat de seismische trillingen zich voortplanten volgens gekromde banen. Het optisch analogon daarvan kan gedemonstreerd worden met het volgende experiment. In een bak met water bevindt zich een vloeistof waarvan de brekingsindex toeneemt met toenemende diepte. (De snelheid van het licht neemt dus af met toenemende diepte.)

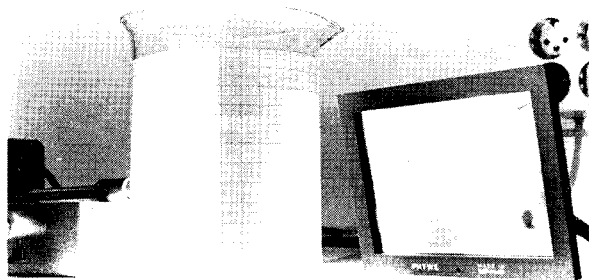
Een dergelijke vloeistof is te maken door een geschikte stof in water op te lossen, zodanig dat de concentratie aan de bodem maximaal is en naar boven toe afneemt.



Figuur 6

Proefopstelling voor demonstratie van de schaduwzone:

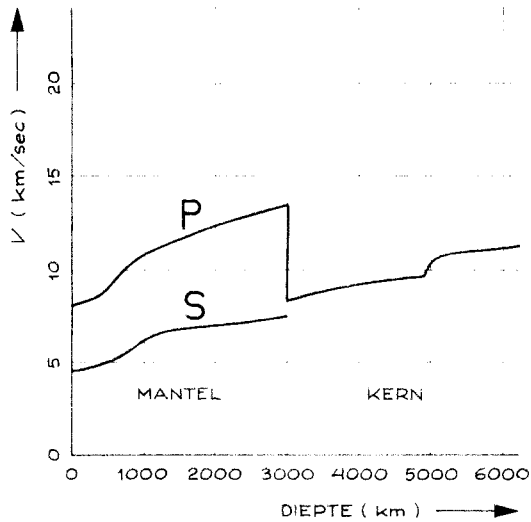
1. scherm van doorzichtig papier;
2. water;
3. lijm;
4. schaduwzone.



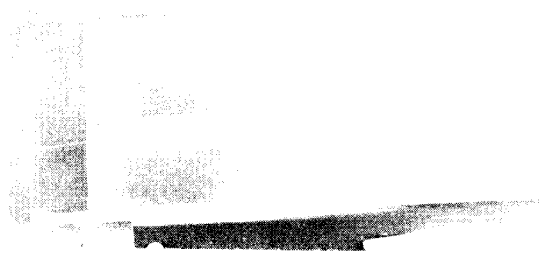
Figuur 7

Demonstratie schaduwzones. Een schaduwzone is direct zichtbaar, de andere is zichtbaar in de spiegel. Een krijtje markeert de lichte vlek tegenover de lichtbron.

In de opstelling van figuur 9 werd hiervoor gebruik gemaakt van suiker<sup>9</sup>. Eerst werd een geconcentreerde suikeroplossing gemaakt (160 gram suiker op 1 deciliter water) bij een temperatuur van ongeveer 50 °C. Vervolgens werd een bak met warm

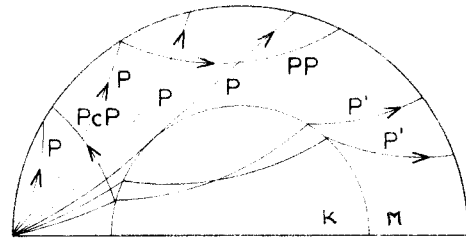


Figuur 8 Snelheid van de seismische golven in de aarde



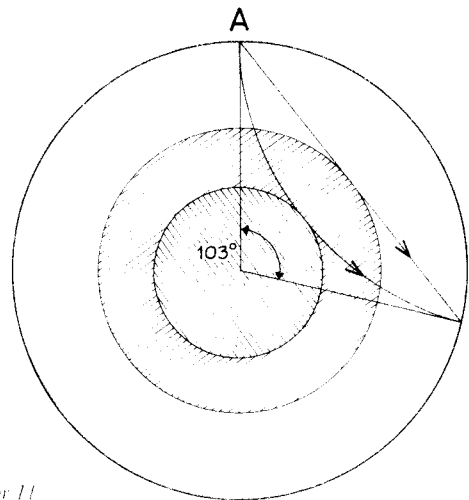
Figuur 9 Gekromde lichtstraal.

water op een plaats gezet, waar hij gedurende het experiment of de demonstratie kon blijven staan. De inmiddels afgekoelde suikeroplossing werd voorzichtig in de bak met water geschonken, zodat er zo min mogelijk menging optrad. Vervolgens werd de lichtbundel van een HeNe-laser op de vloeistof gericht. Het resultaat is zichtbaar in figuur 9: de lichtstraal is gekromd met de bolle zijde gekeerd naar de kant waar de snelheid het grootst is (en dus de brekingsindex het kleinst). In plaats van suiker kan ook keukenzout<sup>10</sup> of  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ <sup>11</sup> gebruikt worden om een geschikte vloeistof te verkrijgen.



Figuur 10

Seismische stralen in de aarde. P: directe straal; PP: straal met terugkaatsing tegen het aardoppervlak; PcP: straal met terugkaatsing tegen de kern.



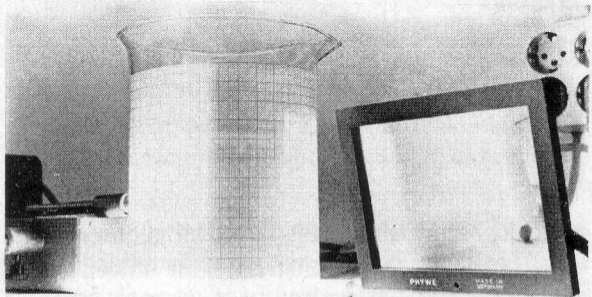
Figuur 11

Straal van de aardkern, berekend uit de grens van de schaduwzone ( $103^\circ$ ) is kleiner bij gekromde stralen dan bij rechtlijnige stralen.

Op grond van het bovenstaande neemt men aan dat de seismische trillingen gekromde banen beschrijven zoals aangegeven in figuur 10. Behalve 'direkte' stralen (P) zijn ook stralen weergegeven die een terugkaatsing tegen het grensvlak kern-mantel (PcP) of tegen het aardoppervlak (PP) hebben ondergaan.

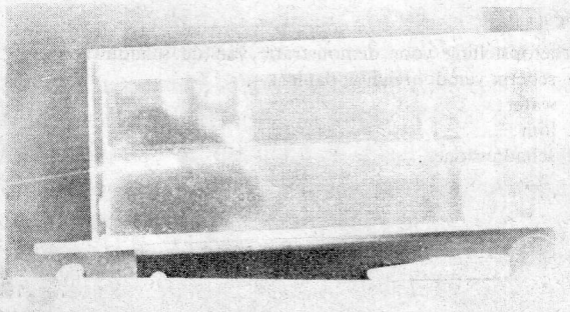
Bij deze terugkaatsing geldt de terugkaatsingswet, zoals bekend uit de geometrische optica.

De kromming van de lichtstralen maakt tevens duidelijk waarom de waarde van de straal van de kern, die kan worden afgeleid uit figuur 8, kleiner is dan de waarde die werd berekend onder de veronderstelling van een rechtlijnige voortplanting van de seismische stralen (zie figuur 11).



*Figuur 7*

Demonstratie schaduwzones. Een schaduwzone is direkt zichtbaar, de andere is zichtbaar in de spiegel. Een krijtje markeert de lichte vlek tegenover de lichtbron.



*Figuur 9* Gekromde lichtstraal.