

Uit de analyse van lava na een vulkaan-
uitbarsting krijgen wetenschappers
informatie over het inwendige van de
aarde. Met hetzelfde doel boren ze ook
gaten in de aarde, maar het diepste
boorgat komt slechts tot 12 km. Zijn
er andere meettechnieken die
informatie over het inwendige
van de aarde opleveren?

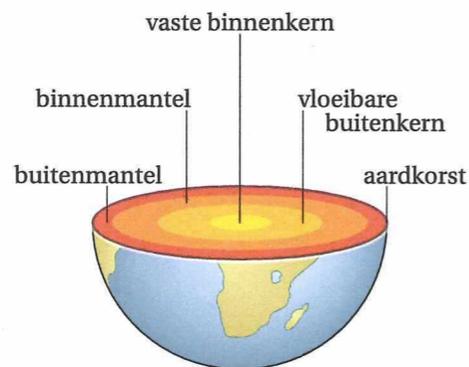


Figuur B.1

B.1 Inwendige van de aarde

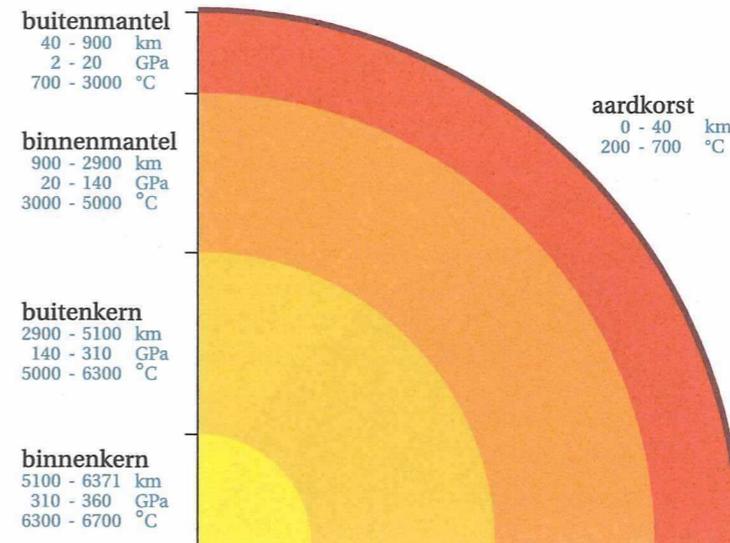
Opbouw van de aarde

De aarde is opgebouwd uit vijf lagen. Zie figuur B.2. De buitenste laag is de vaste aardkorst. Daaronder bevinden zich de vaste buitenmantel en de vaste binnenmantel. In het binnenste van de aarde bevindt zich de aardkern, die bestaat uit twee lagen: een vloeibare buitenkern en een vaste binnenkern.



Figuur B.2

In figuur B.3 zie je een dwarsdoorsnede van de aarde op schaal getekend. De straal van de aarde is 6371 km. Ongeveer de helft daarvan behoort tot de aardkern en de andere helft tot de mantel. De kern heeft een relatief hoge dichtheid, maakt 17% van het totale volume van de aarde uit en heeft 33% van de totale massa.



Figuur B.3

Aardkorst

De buitenste laag van de aarde is de **aardkorst** met een dikte van ongeveer 40 km. Bij bergketens is de korst natuurlijk wat dikker en onder meren en zeeën wat dunner.

Aardmantel

Het gebied tussen de aardkern en de aardkorst is de **aardmantel**. De temperatuur in de mantel varieert tussen 700 en de 5000 °C. Bij deze temperaturen verwacht je dat een groot deel van het mantelmateriaal vloeibaar is. Door het gewicht van de aardlagen erboven is de druk echter zo hoog dat het materiaal vast blijft. Wel is het een beetje vervormbaar, zoals asfalt in de hete zon.

Op plaatsen in de **buitenmantel** waar de druk niet zo hoog is, is het materiaal vloeibaar. Deze vloeistof noem je **magma**. De vloeistof kan uit de mantel opstijgen en door de korst dringen. Je spreekt dan van **vulkanisme**. De magma komt in de vorm van **lava** uit de vulkaan. Zie figuur B.1. Lava is dus niet afkomstig uit het binnenste van de aarde maar uit de buitenmantel.

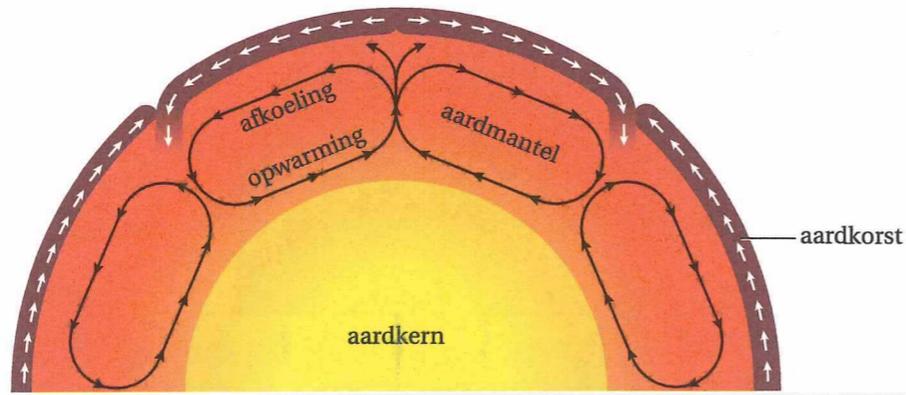
Tussen de buitenmantel en de kern bevindt zich de **binnenmantel**. Deze laag heeft een grotere dichtheid dan de buitenmantel.

Aardkern

De **aardkern** bestaat voornamelijk uit ijzer en nikkel. De **buiten kern** is vloeibaar met temperaturen tussen 5000 en 6300 °C. De temperatuur in de **binnen kern** is zo'n 1000 °C hoger. Toch is de binnenkern geen vloeistof maar een vaste stof, omdat de druk er extreem hoog is.

Convectiestromingen

De aardkern geeft warmte af aan de stroperige aardmantel. Hierdoor ontstaan zeer langzame stromingen in de aardmantel, de **convectiestromingen**. Warmer materiaal beweegt in de richting van de aardkorst en kouder materiaal stroomt weer terug richting de kern. Zie figuur B.4. De snelheid waarmee het gesteente in de aardmantel beweegt, is maar enkele centimeters per jaar.

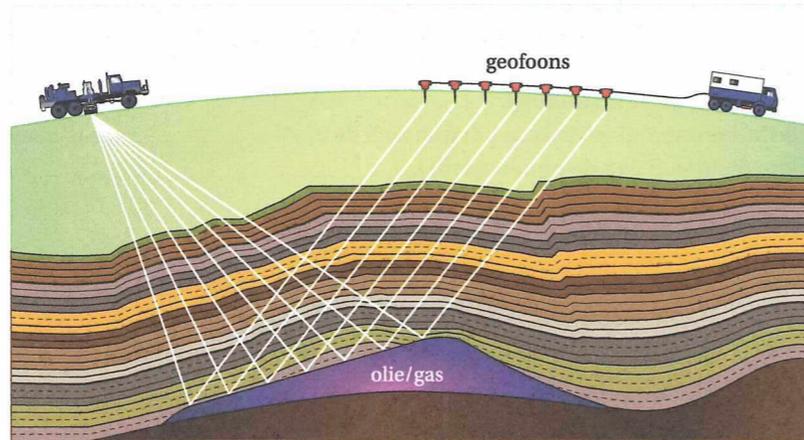


Figuur B.4

Ook in de vloeibare buitenkern vindt stroming van deeltjes plaats. De deeltjes zijn geladen en wekken door hun beweging een magnetisch veld op. Je kent dat veld als het **aardmagnetisch veld**. Daarover lees je meer in paragraaf B.4.

Seismiek

De olie-industrie is zeer geïnteresseerd in de lokale samenstelling van de aardkorst. Die samenstelling geeft namelijk aanwijzingen of er aardolie aanwezig is. Een veel gebruikte techniek om informatie te verkrijgen over diepere lagen in de aardkorst is de **seismiek**. In figuur B.5 zie je een tekening van de opstelling.

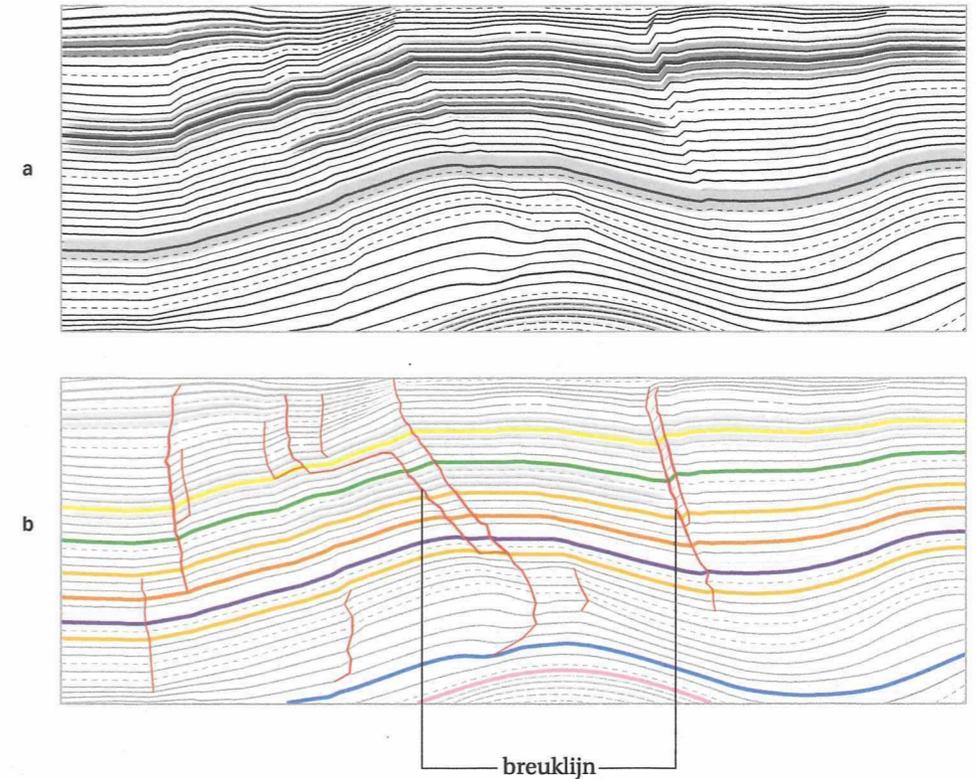


Figuur B.5

In de linker vrachtwagen zit een grote trilplaat waarmee drukgolven de grond in worden gestuurd. De drukgolven weerkaatsen op een aardlaag en worden daarna opgevangen door een aantal ondergrondse **geofoons**. Een gefoon is een speciale microfoon om kunstmatig opgewekte golven vanuit de aarde op te vangen.

De opgevangen golf is niet gelijk aan de uitgezonden golf, maar is op een karakteristieke wijze veranderd door de structuur van de aardlagen.

Uit de opgevangen drukgolf berekent een computer een **seismogram**. Zie figuur B.6a. Hieruit volgt een verdeling van de verschillende aardlagen en de aanwezigheid van breuklijnen. Zie figuur B.6b. Op grond hiervan doen seismologen voorspellingen over de aanwezigheid van olie of gas.



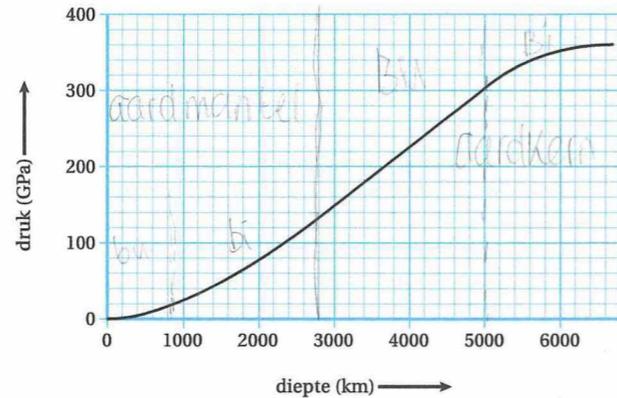
Figuur B.6

Een andere manier om informatie te verkrijgen, is het boren van diepe gaten in de grond. Deze techniek is heel duur en het diepste boorgat gaat maar tot 12 km. Dieper boren is technisch nog niet haalbaar.

Informatie over nog diepere structuren in de aarde wordt verkregen door analyse van aardbevingen. Daarover lees je meer in de volgende paragraaf.

Opgaven

- **werkblad** 1 De buitenmantel en de binnenmantel van de aarde bestaan uit hetzelfde materiaal.
- Leg uit waarom de buitenmantel meer vervormbaar is dan de binnenmantel. In figuur B.7 zie je een grafiek van de druk in het inwendige van de aarde als functie van de diepte.
 - Geef in figuur B.7 met verticale stippellijnen de grenzen aan van de aardmantel en van de aardkern.

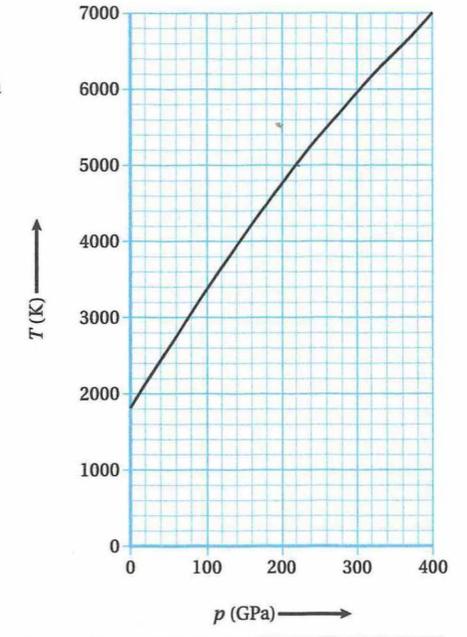


Figuur B.7

Om een idee te krijgen van de druk in de binnenkern, doe je een gedachten-experiment. Je gaat berekenen hoe groot de massa is die je op één pixel van je telefoon zou moeten leggen om dezelfde druk te krijgen als in het centrum van de aarde. Ga uit van een scherm met afmetingen $8,86 \text{ cm} \times 4,98 \text{ cm}$ dat bestaat uit 1136×640 pixels.

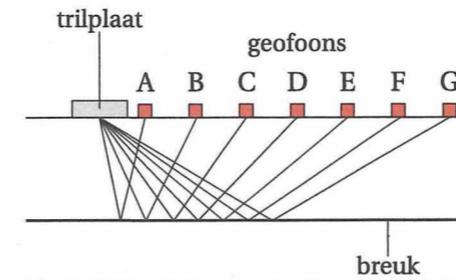
- Toon aan dat de oppervlakte van één pixel $6,07 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ is.
 - Bepaal de massa die je op een pixel van je telefoon zou moeten leggen om dezelfde druk te krijgen als in het centrum van de aarde.
- 2 De aarde bestaat uit een aantal lagen. In deze opgave vereenvoudig je de aarde tot een homogene bol.
- Zoek in BINAS de straal en de massa van de aarde op.
 - Toon aan dat de gemiddelde dichtheid van de aarde gelijk is aan $5,513 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. In BINAS tabel 8 zie je dat de dichtheden van ijzer en nikkel minstens 50% groter zijn.
 - Leg uit waarom de gemiddelde dichtheid van de aarde veel lager is dan die van de kern.

- 3 Boven het aardoppervlak is het smeltpunt van ijzer bij een druk van $p = p_0$ gelijk aan 1811 K. Het smeltpunt van ijzer neemt min of meer evenredig toe met de druk, zoals je in figuur B.8 ziet. De druk in de buitenkern varieert tussen 140 en 310 GPa. De temperatuur in de buitenkern varieert tussen 5000 en 6300 °C. Neem aan dat de buitenkern geheel uit ijzer bestaat. Toon met behulp van figuur B.8 aan dat het ijzer in de buitenkern zich in de vloeibare fase bevindt.



Figuur B.8

- **hulpblad** 4 In figuur B.9 zie je een schematische tekening van een seismografisch bodem-onderzoek. Een trilplaat zendt hierbij golven uit in allerlei richtingen. De golven hebben een gemiddelde voortplantingssnelheid van 2,8 km/s. Op een bepaalde diepte zit een breuk in de bodem waartegen de golven weerkaatsen als tegen een spiegel.



Figuur B.9

Op $t = 0 \text{ s}$ wordt een drukgolf uitgezonden. Geofon B bevindt zich op een afstand van 1,0 km van de trilplaat en registreert na 4,3 s de weerkaatste golf.

- Bereken de diepte waarop de breuk ligt. Door de resultaten van meerdere geofoons te combineren, neemt de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling van de breuk in figuur B.9 toe.
- Geef nog een reden waarom een rij geofoons wordt gebruikt in plaats van slechts één.

Aardbevingen kunnen desastreuze gevolgen hebben. Bij een aardbeving verschuiven delen van de aardkorst ten opzichte van elkaar. Hoe kun je die bewegingen meten en eventueel vooraf voorspellen?



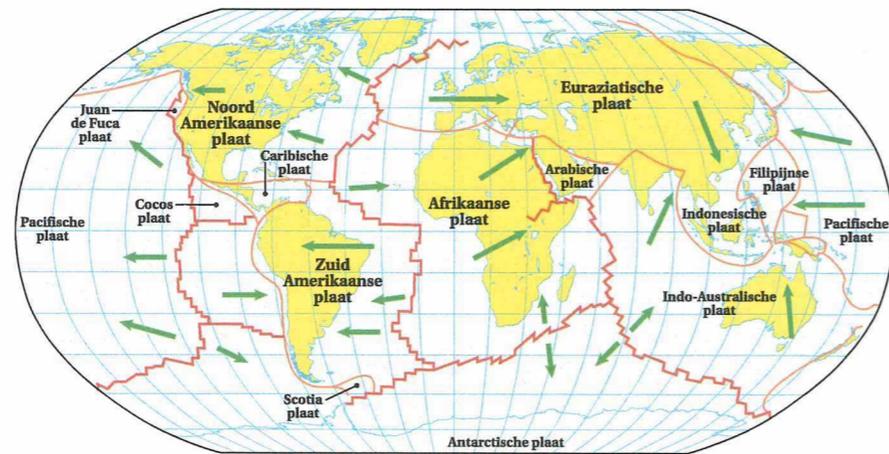
Figuur B.10

B.2 Bewegingen van de aarde

Platen

De aardmantel is vervormbaar en is steeds in beweging. De vaste aardkorst 'drijft' hierbij als het ware op de vervormbare aardmantel. De aardkorst is echter geen schil uit één stuk, maar bestaat uit verschillende **platen**. In figuur B.11 zie je de platen, met in rood de breuklijnen waar de platen tegen elkaar aan liggen. Je ziet bijvoorbeeld dat bij IJsland de Euraziatische plaat en de Noord-Amerikaanse plaat tegen elkaar aan liggen. Op die breuklijnen treedt vaak **vulkanisme** op.

De convectiestromingen in de aardmantel oefenen krachten uit op de platen. Als de krachten op een plaat groot genoeg zijn, komt de plaat met een schok in beweging. De schok veroorzaakt daarbij golven in de omgeving. Die ervaar je als een **aardbeving**. De groene pijlen in figuur B.11 geven aan in welke richting een plaat beweegt.



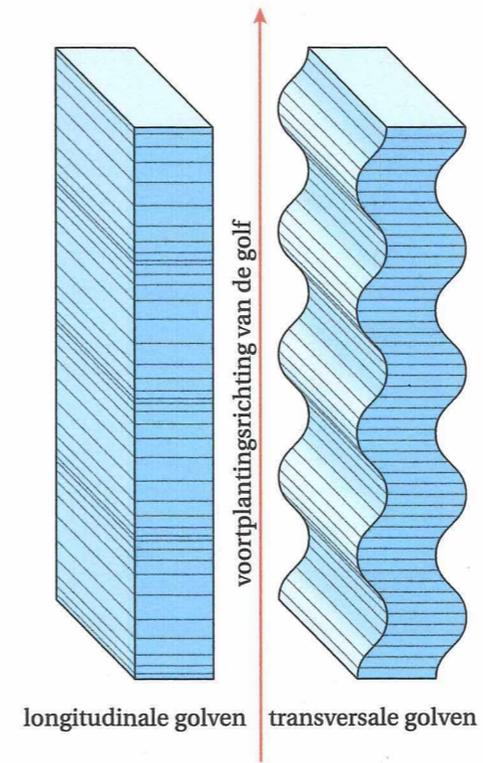
Figuur B.11

Aardbevingen hebben niet altijd te maken met platen. Relatief lichte aardbevingen kunnen ontstaan bij verzakking van de bodem. Die treedt regelmatig op in de provincie Groningen als gevolg van de aardgaswinning.

Aardbevingsgolven

De schokken die ontstaan bij verschuiving van platen en verzakking van de bodem, veroorzaken golven die zich in alle richtingen verspreiden. Daarom heten ze **ruimte-golven**.

Een ruimtegolf in vast materiaal kan longitudinaal of transversaal zijn. Zie figuur B.12.



Figuur B.12

Longitudinale golven zijn drukgolven vergelijkbaar met geluidsgolven. Door de aarde planten zich dan verdichtingen en verdunningen voort. Longitudinale golven kunnen zich zowel door vaste als door vloeibare delen van de aarde voortplanten.

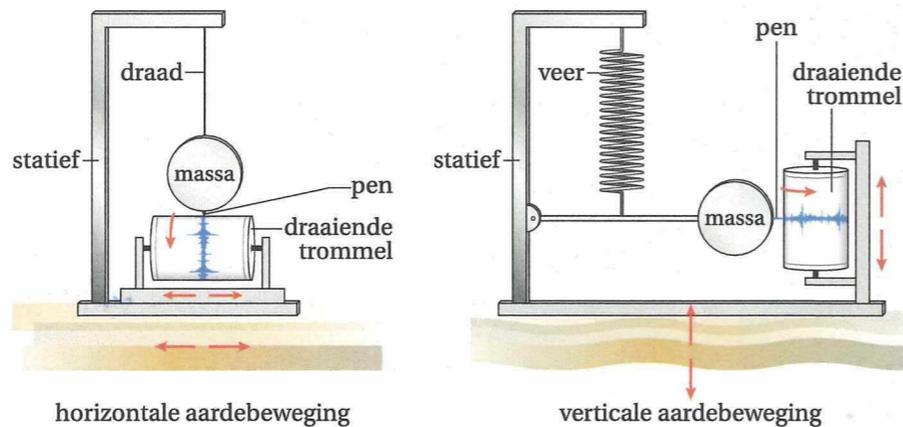
Bij **transversale golven** schuift het materiaal heen en weer, loodrecht op de voortplantingsrichting van de golf. Transversale golven planten zich alleen voort door de vaste delen en niet door de vloeibare delen van de aarde.

De snelheid waarmee een golf zich verplaatst, hangt af van de soort golf en van het materiaal waardoor de golf zich voortplant. Longitudinale golven verplaatsen zich ongeveer anderhalf maal zo snel als transversale golven en worden als eerste waargenomen. Ze heten daarom de **primaire golven** (P-golven). De transversale golven heten de **secundaire golven** (S-golven).

Bij aardbevingsgolven treden verschijnselen op als (totale) weerkaatsing, breking en absorptie. Komt een ruimtegolf aan het aardoppervlak, dan kan hij overgaan in een **oppervlaktegolf**. Oppervlaktegolven hebben meestal een grotere amplitude dan ruimtegolven en zijn dus de golven die de meeste schade aanrichten bij een aardbeving. De voortplantingssnelheid van oppervlaktegolven is kleiner dan die van de ruimtegolven.

Metten van aardbevingsgolven

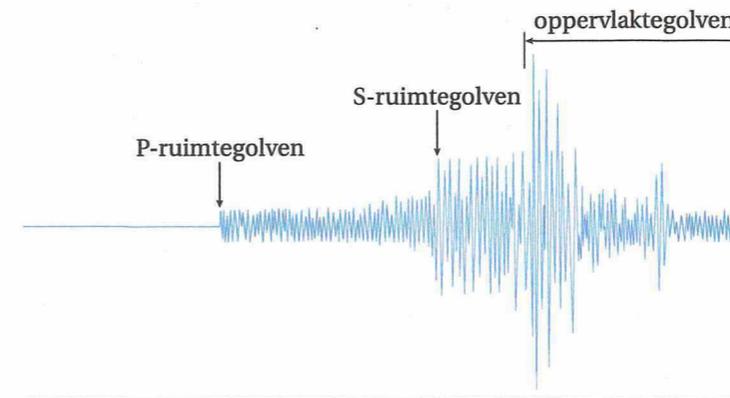
Vanaf een bepaalde sterkte kun je aardbevingsgolven registreren met een **seismograaf**. De aardkorst kan zowel in horizontale als in verticale richting trillen. Voor elke beweging is een bepaald type seismograaf nodig. Zie figuur B.13.



Figuur B.13

Een seismograaf bevat een slinger of een massaveersysteem om de trillingen op een draaiende trommel zichtbaar te maken. De trommel trilt mee met de aarde. Door de grote traagheid van de massa waaraan de pen is bevestigd, trilt de pen niet mee met de aarde. Tijdens een aardbeving beweegt de trommel dus ten opzichte van de pen en zo wordt de trilling geregistreerd op het papier om de trommel.

Figuur B.14. geeft een voorbeeld van een **seismogram**. Je kunt van links naar rechts de verschillende typen golven onderscheiden. De P-ruimtegolven zijn het snelst en die zie je dus het eerst. Dan volgen de S-ruimtegolven en de sterkere oppervlaktegolven.



Figuur B.14

Het **epicentrum** is de plaats aan het aardoppervlak van waaruit de oppervlaktegolven zich lijken te verspreiden. De bron van de aardbeving bevindt zich op een bepaalde diepte loodrecht onder het epicentrum. Deze plaats heet het **hypocentrum**.

Uit het tijdsverschil tussen de P- en de S-golven bereken je de afstand tussen een meetstation en het hypocentrum van de aardbeving. Er geldt bij benadering:

$$s \approx 8 \cdot \Delta t$$

- s is de afstand van het meetstation tot het hypocentrum in km.
- Δt is het tijdsverschil tussen de P- en de S-golf in s.

Om het hypocentrum te kunnen bepalen, zijn de gegevens van meerdere seismogrammen nodig. Als dezelfde aardbeving op vier verschillende plaatsen op aarde is geregistreerd, kun je de locatie van het hypocentrum met een meetonzekerheid van ongeveer 50 km berekenen.

Schaal van Richter

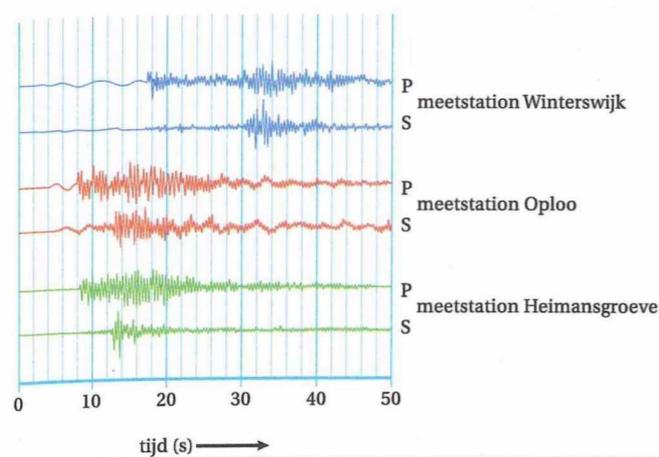
De Amerikaanse seismoloog Charles Richter heeft een schaal ontworpen om de sterkte van aardbevingen onderling te vergelijken. Zie BINAS tabel 30A. De schaal is logaritmisch; dat betekent onder andere dat een aardbeving met sterkte 5 tienmaal sterker is dan een aardbeving met sterkte 4.

Verreweg de meeste aardbevingen hebben een sterkte tot en met 4 op de schaal van Richter. Deze aardbevingen zijn wel voelbaar, maar richten meestal niet meer schade aan dan scheuren in muren. De aardbevingen die het wereldnieuws halen, hebben meestal een sterkte van minimaal 7 op de schaal van Richter. De sterkste aardbeving ooit gemeten vond in 1960 plaats in Chili en had een sterkte van 9,5 op de schaal van Richter.

Opgaven

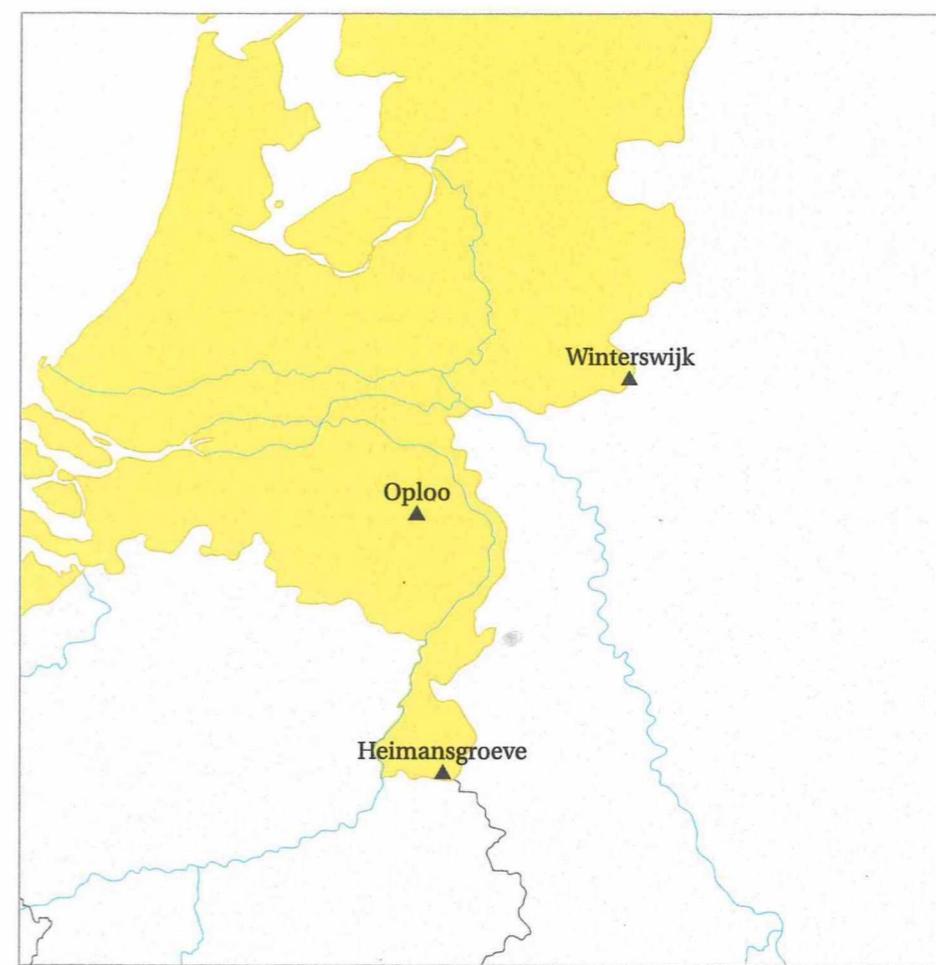
- 5 Bij een aardbeving lopen longitudinale en transversale golven door de aarde.
- Noem drie verschillen tussen longitudinale en transversale golven. De transversale golven hebben in een bepaald gesteente een voortplantingssnelheid van 3,4 km/s. De frequentie van deze golven is 1,2 Hz.
 - Bereken de golflengte van de transversale golven in dit gesteente.
- 6 Bij het opstellen van zijn schaal ging Richter uit van een aardbeving op een afstand van 100 km. Zou zo'n aardbeving een uitwijking van 1 μm op zijn seismograaf veroorzaken, dan gaf hij die aardbeving een sterkte 0. De schaal van Richter is een logaritmische schaal. Een aardbeving heeft een sterkte van 7 op een afstand van 100 km. Bereken de uitwijking op Richters seismograaf.
- 7 Uit het seismogram van één meetstation kun je de afstand vanaf het epicentrum van de aardbeving tot aan dat meetstation bepalen. Je weet dan alleen de afstand, maar niet uit welke richting de golven zijn gekomen.
- Leg uit dat je met één meting kunt vaststellen dat de aardbeving op een bepaalde cirkel rondom het meetstation heeft plaatsgevonden.
 - Leg uit met een schets dat je met de metingen van drie meetstations de plaats van het epicentrum eenduidig kunt vaststellen.

► werkblad 8 In figuur B.15 zie je de registraties van dezelfde aardbeving door drie meetstations.



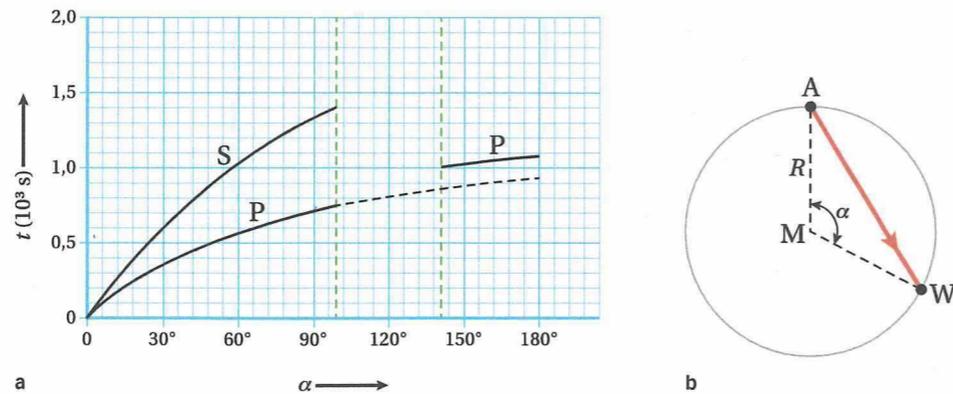
Figuur B.15

- Toon aan dat de afstand van het epicentrum van de aardbeving tot aan het meetstation in Winterswijk ongeveer 100 km was. In figuur B.16 zie je de ligging van de drie meetstations. De schaal van de kaart is 1 : 2 500 000.
- Bepaal de plaats van het epicentrum van de beving.



Figuur B.16

- 9 Een model van de aarde volgt uit onderzoek van aardbevingen. Een groot aantal waarnemingsstations bepaalt hoelang het duurt totdat aardbevingsgolven daar aankomen. In figuur B.17a is de looptijd van de P- en S-golven van een aardbeving weergegeven als functie van hoek α . Hoek α is een maat voor de plaats van een waarnemingsstation W ten opzichte van plaats A. Zie figuur B.17b.

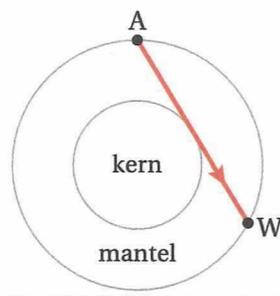


Figuur B.17

Het eenvoudigste model van de aarde is een homogene bol van vast gesteente. In plaats A vindt een aardbeving plaats. Voor een waarnemingsstation W geldt $\alpha = 90^\circ$.

- Toon aan dat het waarnemingsstation op een afstand van $9,0 \cdot 10^6$ m ligt.
- Bepaal met behulp van figuur B.17a de golfsnelheid van de P-golven.

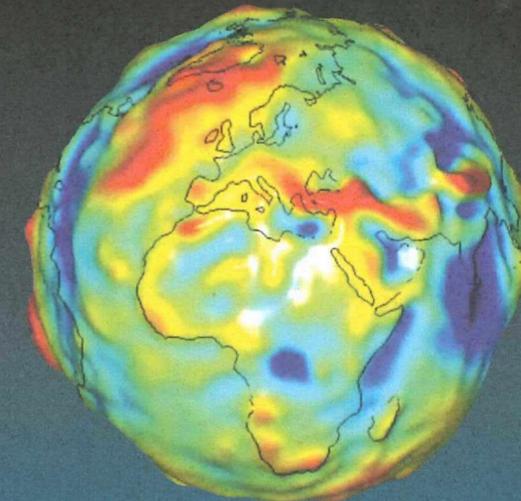
Uit figuur B.17a blijkt dat er geen S-golven aankomen op waarnemingsstations waarvoor de hoek α groter is dan 103° . Dit betekent dat de aarde geen homogene bol kan zijn. Een beter model van de aarde is het kern-mantelmodel uit figuur B.18. In dit model heeft de aarde een homogene, bolvormige kern, met daaromheen een homogene, vaste mantel met andere eigenschappen.



Figuur B.18

- Leg met behulp van figuur B.17 uit of de aardkern in dit kern-mantelmodel een vaste stof of een vloeistof is.
- Bepaal de straal van de aardkern in het kern-mantelmodel van de aarde. Een waarnemingsstation op $\alpha = 180^\circ$ neemt de P-golven waar die dwars door de aarde gaan. Deze golven hebben een langere looptijd dan de looptijd die volgt als je het eerste stuk van de grafiek voor P-golven extrapoleert. Zie figuur B.17a na de tweede streeplijn.
- Is de golfsnelheid van de P-golven in de aardkern groter of kleiner dan de P-golven in de aardmantel? Licht je antwoord toe.

Een vallend voorwerp ondervindt een valversnelling. In de rode gebieden is de valversnelling groter dan verwacht en in de blauwe gebieden juist kleiner. Waardoor komen die verschillen?



Figuur B.19

B.3 Valversnelling

Zwaartekracht en gravitatiekracht

Twee massa's oefenen een kracht op elkaar uit, de **gravitatiekracht**. Hiervoor geldt:

$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

- G is de gravitatieconstante in $\text{N m}^2 \text{kg}^{-2}$.
- m_1 is de massa van voorwerp 1 in kg.
- m_2 is de massa van voorwerp 2 in kg.
- r is de afstand tussen de zwaartepunten van de voorwerpen in m.

Deze formule geldt voor alle massa's, dus ook voor een hemellichaam en een voorwerp op het oppervlak van dat hemellichaam. Dan spreek je niet meer van de gravitatiekracht maar van de **zwaartekracht**. De zwaartekracht F_{zw} is de kracht waarmee een hemellichaam aan voorwerpen trekt. Daarvoor geldt:

$$F_{zw} = m \cdot g$$

- g is de valversnelling in m s^{-2} .
- m is de massa van het voorwerp in kg.

De zwaartekracht is dezelfde kracht als de gravitatiekracht. Voor een massa m aan het oppervlak van een hemellichaam met massa M en straal R geldt dus:

$$F_{zw} = F_g$$

$$m \cdot g = G \cdot \frac{m \cdot M}{R^2}$$

Voor de valversnelling g geldt dus:

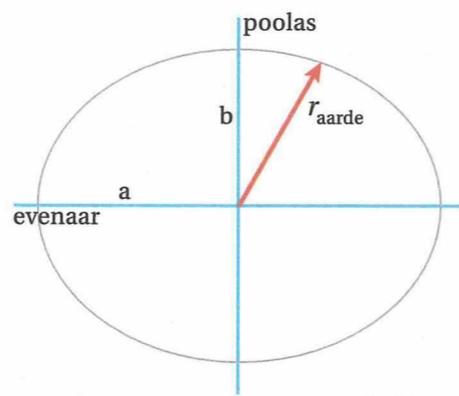
$$g = G \cdot \frac{M}{R^2}$$

- G is de gravitatieconstante in $\text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$.
- R is de straal van het hemellichaam in m.
- M is de massa van het hemellichaam in kg.

De **valversnelling** g hangt dus alleen af van de massa M en de straal R van het hemellichaam.

Vormcorrectie

Op het aardoppervlak geldt $R = R_{\text{aarde}}$ en $M = M_{\text{aarde}}$. Met de formule en de gegevens in BINAS tabel 31 bereken je dan $g = 9,819 \text{ m/s}^2$. Deze waarde is iets groter dan de $9,81 \text{ m/s}^2$ die je gebruikt in Nederland. Dat komt omdat de aarde niet precies bolvormig is. De afstand van het middelpunt van de aarde tot aan de evenaar is ruim 21 km groter dan de afstand van het middelpunt tot de Noordpool. De aarde lijkt daardoor op een ellips met de as in het vlak van de evenaar $a = 6378,137 \text{ km}$ en de poolas $b = 6356,752 \text{ km}$. Zie figuur B.20.



Figuur B.20

Met nauwkeurige waarden voor de lange en de korte as kun je de lokale straal van de aarde berekenen en daarmee de lokale waarde voor g . Deze berekende valversnelling noem je de **lokale valversnelling**. Je vindt dat de valversnelling op de Noordpool 0,53% groter is dan op de evenaar.

Hoogtecorrectie in de lucht

Voor een voorwerp dat zich niet op het oppervlak van de aarde bevindt maar op een hoogte h geldt nog steeds de formule $g = G \cdot \frac{M_{\text{aarde}}}{r^2}$, maar nu met $r = R_{\text{aarde}} + h$. Naarmate je je verder van de aarde verwijdert, neemt r toe en de valversnelling daarmee af.

Je kunt ook de formule voor de **hoogtecorrectie** in de lucht gebruiken. Deze luidt:

$$\Delta g_h = -\frac{2}{R_{\text{aarde}}} \cdot g \cdot h$$

- Δg_h is de hoogtecorrectie op de valversnelling in m s^{-2} .
- g is de lokale valversnelling in m s^{-2} .
- R_{aarde} is de straal van de aarde in m.
- h is de hoogte boven het aardoppervlak in m.

Je vindt dat op een hoogte van 10 km de valversnelling 0,31% kleiner is dan op zeeniveau.

Hoogtecorrectie op een berg

Het maakt voor de valversnelling uit of je op een hoge berg staat of dat je in een vliegtuig op dezelfde hoogte boven het aardoppervlak bevindt. Het gesteente in de berg vergroot namelijk de valversnelling een klein beetje. Deze correctie staat bekend als de **Bouguer correctie**. Er geldt bij benadering:

$$\Delta g_B = \frac{2\pi \cdot \rho \cdot R_{\text{aarde}}^2}{M_{\text{aarde}}} \cdot g \cdot h$$

- Δg_B is de hoogtecorrectie op de valversnelling in m s^{-2} .
- ρ is de dichtheid van de berg in kg m^{-3} .
- g is de lokale valversnelling in m s^{-2} .
- R_{aarde} is de straal van de aarde in m.
- M_{aarde} is de massa van de aarde in kg.
- h is de hoogte van de berg in m.

De hoogste berg op aarde is de Mount Everest met een hoogte van 8848 m. Gebruik je $\rho = \rho_{\text{aarde}}$ dan is de hoogtecorrectie 0,21%.

Dichtheidsverschillen in de aardkorst

Als je op een plaats op aarde de valversnelling meet en deze corrigeert voor Δg_h en voor Δg_B , dan vind je nog steeds afwijkingen met de lokale valversnelling die je berekent met de straal van de aarde op die plaats. In figuur B.19 op pagina 17 zie je die afwijkingen met een kleur aangegeven. Rood betekent een grotere waarde en blauw een kleinere waarde dan je zou verwachten. Je ziet bijvoorbeeld een grote, lokale piek in de Atlantische oceaan en een dal in het midden van Afrika. Deze afwijkingen zijn het gevolg van de dichtheidsverschillen in de aardkorst. De correcties op de valversnelling zijn telkens kleiner dan 1%. Toch zijn ze van belang bij de berekening van onder andere satellietbanen.

Meting van de valversnelling

De valversnelling meet je met een **gravimeter**. Daarvan bestaan twee typen. Een absolute gravimeter meet g met behulp van een vallend voorwerp. Zie opgave 12. Een relatieve gravimeter meet de zwaartekracht door middel van de uitrekking van

een veer waaraan een massa hangt. Je moet die meter eerst ijken op een plaats waar je de zwaartekracht kent. Zie opgave 13.

In BINAS tabel 30B staat voor een aantal plaatsen op aarde, de nauwkeurig gemeten waarde van de valversnelling.

Opgaven

- 10 In 2012 sprong Felix Baumgartner op 39 km hoogte uit een luchtballon.
- Bereken de valversnelling op deze hoogte in twee significante cijfers. Tijdens de val werken er twee krachten op Felix: de luchtweerstandskracht en de zwaartekracht. Zijn snelheid neemt tijdens de val toe en daardoor ook de luchtweerstandskracht. De luchtweerstandskracht wordt uiteindelijk gelijk aan de zwaartekracht. Volgens de eerste wet van Newton is de snelheid dan constant.
 - Leg uit dat de snelheid van Felix toch blijft toenemen ook als de luchtweerstandskracht gelijk blijft aan de zwaartekracht.
- 11 De Kilimanjaro ligt net ten zuiden van de evenaar en is met een hoogte van 5895 m de hoogste berg van Afrika. Neem aan dat de berg geheel uit graniet bestaat.
- Bereken de valversnelling op de top van de berg. Stel dat de Kilimanjaro voor een groot gedeelte uit zand zou bestaan.
 - Is de uitkomst van vraag a dan te groot of te klein? Licht je antwoord toe.

12 In figuur B.21 zie je een dwarsdoorsnede van een gravimeter. De meter bestaat uit twee spiegels: een vaste spiegel en een spiegel die een vrije val maakt. Van de vallende spiegel wordt met behulp van een laserbundel nauwkeurig de plaats en de tijd gemeten.

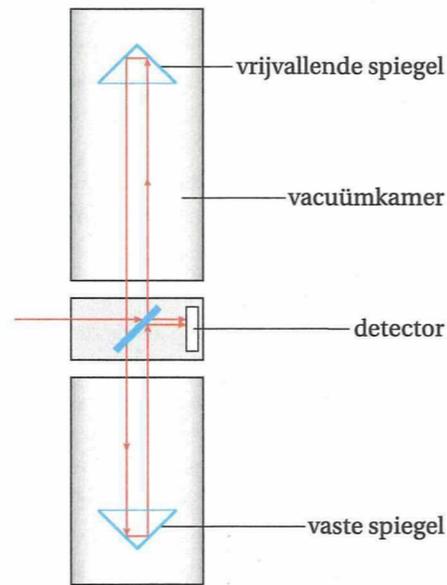
- Leg uit waarom de bovenste spiegel in een vacuümkamer moet vallen. Voor een vrijvallend voorwerp geldt:

$$s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

- s is de valafstand in m.
- g is de valversnelling m/s^2 .
- t is de valtijd s .

Na verwerking van de meetresultaten blijkt dat de vallende spiegel 0,24768 s heeft gedaan over een afstand van 30,00 cm

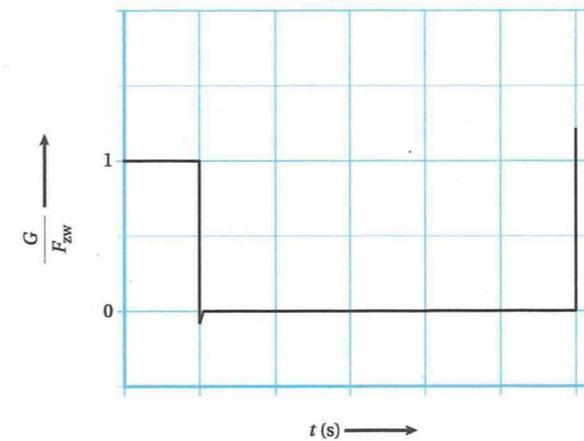
- Toon aan dat de meting niet in Nederland heeft plaatsgevonden.



Figuur B.21

- 13 Een relatieve gravimeter bestaat uit een massa en een veer. De veerconstante van de veer is 39,20 N/m. De massa is 1,000 kg.
- Bereken de uitrekking van de veer bij een meting in Roodeschool. De valversnelling in Roodeschool is niet gelijk aan die in Amsterdam. Je wilt met deze gravimeter het verschil meten.
 - Bereken in hoeveel significante cijfers je de uitrekking van de veer moet bepalen om het verschil in valversnelling te kunnen meten.

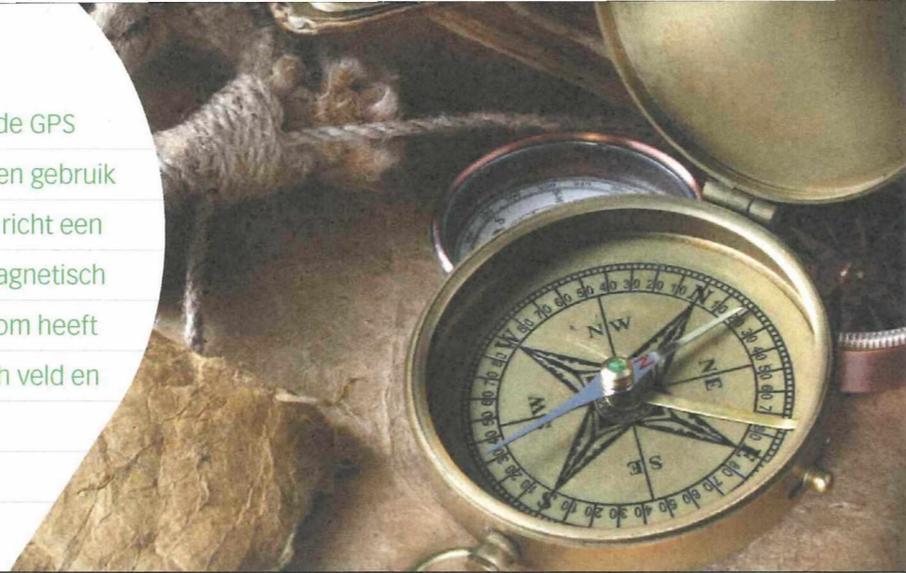
- 14 Wetenschappers onderzoeken soms vloeistofstromen onder bijzondere omstandigheden. Om het effect van de zwaartekracht nagenoeg uit te schakelen voeren zij de experimenten uit in een capsule die een vrije val in een luchtledige buis maakt. De vloeistoffen in de capsule zijn dan gedurende een korte tijd gewichtloos.
- Leg uit wat gewichtloos betekent. Tijdens een experiment wordt een capsule recht omhoog geschoten. Vanaf het hoogste punt valt de capsule dan weer terug naar de bodem. In figuur B.22 zie je van een experiment een diagram met daarin het genormaliseerde gewicht van de capsule $\frac{G}{F_{zw}}$ tegen de tijd.



Figuur B.22

- Zie je in figuur B.22 het verloop van gehele experiment vanaf de lancering tot aan het neerkomen of zie je alleen het gedeelte vanaf het hoogste punt tot aan het neerkomen? Licht je antwoord toe. In de folder van de toren staat: 'Nadat de kleine verstoringen door de lancering zijn uitgedempt, ondervindt de capsule een resterende versnelling van $10^{-6} \cdot g_0$ tijdens de vrije val van 110 m hoogte'.
- Leg uit waarom deze formulering natuurkundig niet juist is.

Voor de introductie van de GPS maakte je om te navigeren gebruik van een kompas. Daarin richt een naaldje zich langs het magnetisch veld van de aarde. Waarom heeft de aarde een magnetisch veld en hoe meet je dit?



Figuur B.23

B.4 Aardmagnetisme

Richting en grootte van het aardmagnetisch veld

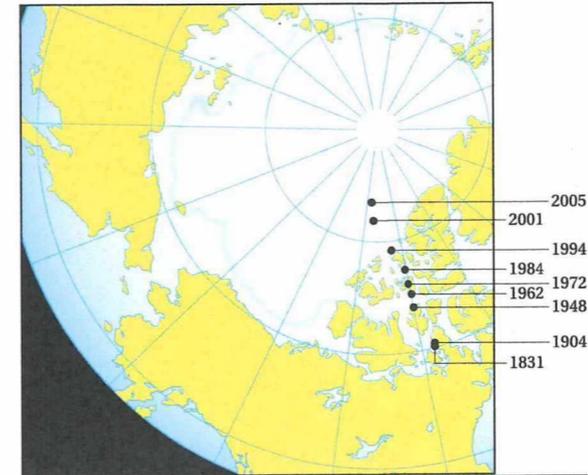
De aarde draait om haar noord-zuid as. De plaatsen waar die as de aarde snijdt, noem je de **geografische Noordpool** en de **geografische Zuidpool**. Een **kompas** zoals in figuur B.23, wijst de richting van de geografische Noordpool aan.

Het kompas bestaat uit een vrij draaibare naaldmagneet die zich richt volgens het magnetisch veld van de aarde. Je noemt het deel van de magneet dat naar het noorden wijst, de noordpool van de magneet. Deze wordt aangetrokken door een magnetische zuidpool. Dit betekent dus dat in het geografische noorden een magnetische zuidpool ligt.

De **magnetische zuidpool** ligt niet precies op de geografische Noordpool, maar richting Noord-Canada. Daarbij komt dat de magnetische zuidpool langzaam van plaats verandert. De stippen in figuur B.24 geven de posities van de magnetische zuidpool in de laatste tweehonderd jaar aan. Met een snelheid van ongeveer 5 km/jaar beweegt de magnetische zuidpool zich nu in de richting van de geografische Noordpool.

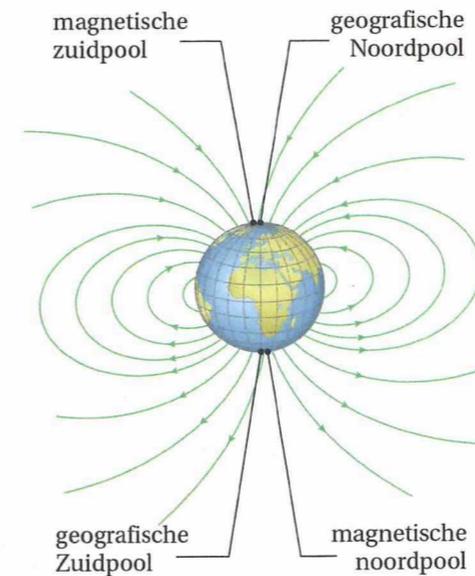
De **magnetische noordpool** heeft niet altijd op het noordelijk halfrond gelegen. Uit onderzoek van gesteenten blijkt dat de magnetische noord- en zuidpool in de afgelopen 40 miljoen jaar ongeveer 70 keer van plaats zijn verwisseld. De laatste keer dat een dergelijk ompoling plaatsvond, was ongeveer 750 000 jaar geleden.

De grootte van het aardmagnetisch veld verschilt van plaats tot plaats. De waarden lopen uiteen van 25 μT op de evenaar tot 65 μT aan de polen. In Nederland is de waarde ongeveer 47 μT . In alle gevallen geldt dat het aardmagnetisch veld zwak is vergeleken met het veld van een gewone staafmagneet.



Figuur B.24

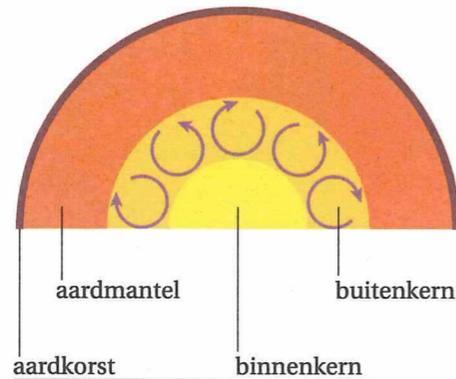
In figuur B.25 zie je het veldlijnenpatroon in de buurt van het aardoppervlak. De magnetische veldlijnen staan dus niet loodrecht op het aardoppervlak. De raaklijn aan de veldlijn in een punt van het aardoppervlak geeft de richting aan waarin een vrij draaibare naaldmagneet wijst. In het horizontale vlak, evenwijdig aan het aardoppervlak, wijst een kompasnaald dus vrijwel richting de geografische Noordpool. Als de kompasnaald ook in het verticale vlak kan draaien, wijst hij schuin de aarde in of uit. In Nederland wijst de naald de aarde in met een hoek van ongeveer 60° met het aardoppervlak. Deze hoek noem je de **inclinatiehoek**.



Figuur B.25

Ontstaan van het aardmagnetisme

Aardmagnetisme ontstaat door een combinatie van effecten. In de vaste binnenkern van de aarde wordt door radioactieve processen warmte ontwikkeld. De binnenkern geeft die warmte af aan de vloeibare buitenkern. Het verwarmde materiaal in de buitenkern beweegt daardoor in de richting van de koudere aardmantel. Het koudere materiaal beweegt andersom. Hierdoor ontstaan convectiecellen met stromend materiaal. Zie figuur B.26. Deze beweging is vergelijkbaar met de convectiestromen in de aardmantel.



Figuur B.26

De buitenkern bestaat voornamelijk uit geïoniseerde ijzer- en nikkelatomen. Dit betekent dat er in een convectiecel geladen deeltjes rondstromen. Bewegende, geladen deeltjes veroorzaken een magnetisch veld. Niet alle convectiecellen zijn identiek, waardoor er een resulterend magnetisch effect ontstaat. Dit levert uiteindelijk het grootste deel van het aardmagnetisch veld op. Ten slotte draagt ook de draaiing van aarde om haar as bij aan het aardmagnetisch veld.

Metingen aan het aardmagnetisch veld

De richting van het aardmagnetisch veld meet je met een **kompas**. Zie figuur B.23 op pagina 22. Tegenwoordig zit in vrijwel elke smartphone een elektronisch kompas dat zonder beweegbare onderdelen werkt.

De grootte van het magnetisch veld meet je met een **magnetometer**. De eenvoudige typen meten alleen de grootte van het veld, terwijl de geavanceerdere typen ook de grootte in een bepaalde richting meten.

Ook vanuit de ruimte wordt het aardmagnetisch veld continu gemeten. Dat gebeurt met speciale satellieten zoals de MagSat.

Bescherming tegen de deeltjes van de zon

Vanaf de zon komen geladen deeltjes met een hoge energie op ons af. Deze deeltjes samen noem je de **zonnwind**. Door die hoge energie is de zonnwind schadelijk voor planten, dieren en mensen. Geladen deeltjes die bewegen in het aard-

magnetisch veld ondervinden een lorentzkracht waardoor ze worden afgebogen in de richting van de polen. Het grootste gedeelte van de zonnwind beweegt daardoor langs de aarde heen.

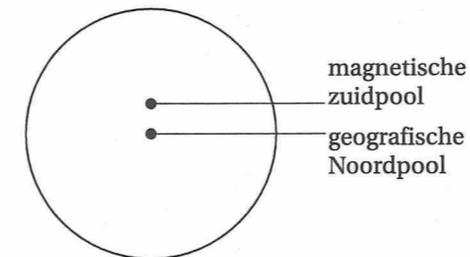
Rond de polen komen de deeltjes toch in de atmosfeer terecht. Ze botsen daar tegen de moleculen in de lucht, waardoor het **noorderlicht** kan ontstaan. Zie figuur B.27.



Figuur B.27

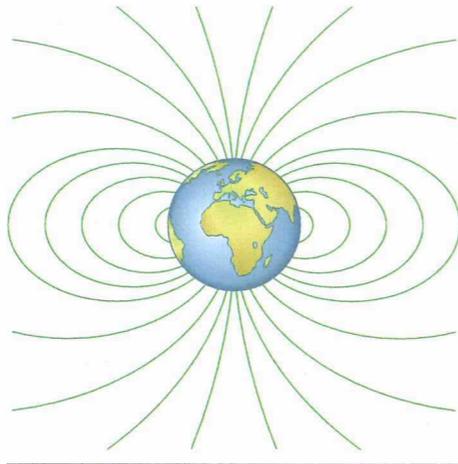
Opgaven

- **werkblad** 15 De magnetische zuidpool ligt niet precies op de geografische Noordpool. Een kompasnaald wijst daardoor niet exact naar de Noordpool. Deze zijdelingse afwijking noem je de declinatie. In Nederland is de declinatie ongeveer 4° . In figuur B.28 zie je een bovenaanzicht van de aarde.
- Geef in figuur B.28 de positie(s) aan waar de declinatie 0° is.
 - Geef in figuur B.28 de positie(s) aan waar de declinatie 90° is.



Figuur B.28

► werkblad 16 In figuur B.29 zie je de veldlijnen van het aardmagnetisch veld.

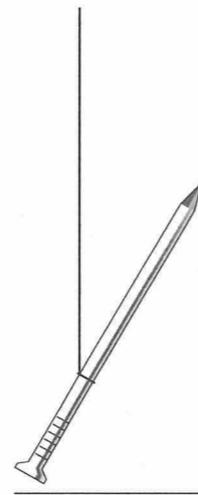


Figuur B.29

- Geef in figuur B.29 met pijlpunten in de veldlijnen de richting van het aardmagnetisch veld aan.
- Draait een kompasnaald om bij het passeren van de evenaar? Leg je antwoord uit.

Ignaz maakt een spijker magnetisch en hangt hem aan zijn zwaartepunt op aan een draad. Zie figuur B.30. De spijker is gericht volgens het aardmagnetisch veld in Nederland.

- Is de kop van de spijker de noordpool of de zuidpool? Licht je antwoord toe.
- Waar op aarde hangt de spijker vrijwel horizontaal? Leg je antwoord uit.
- Waar op aarde hangt de spijker vrijwel verticaal? Leg je antwoord uit.



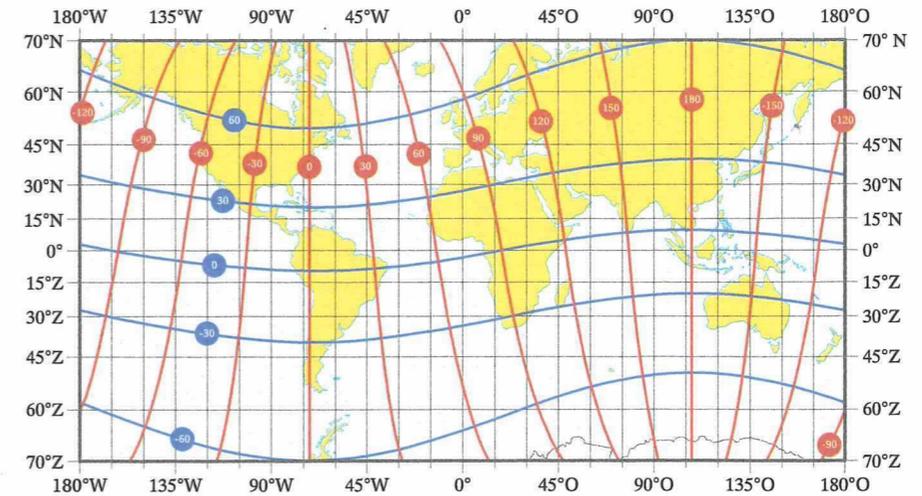
Figuur B.30

17 In Nederland bedraagt de horizontale component van het aardmagnetisch veld $1,9 \cdot 10^{-5}$ T en de verticale component $4,5 \cdot 10^{-5}$ T.

- Bereken voor Nederland de grootte van het aardmagnetische veld.
- Bereken voor Nederland de inclinatiehoek met het aardoppervlak.

18 In figuur B.31 zie je een wereldkaart met in grijs een rechthoekig, geografisch rooster van breedte- en lengtegraden. De horizontale lijnen lopen evenwijdig aan de evenaar. De verticale lijnen noem je meridianen. Meridianen komen bij elkaar op de Noordpool en op de Zuidpool.

- Leg dit uit.

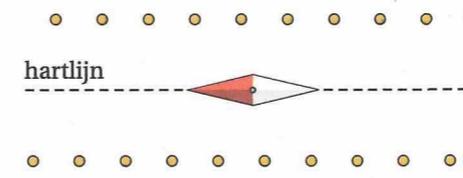


Figuur B.31

Over dit geografische rooster zie je in rood en blauw een geomagnetisch rooster geprojecteerd.

- Leg uit waar de geomagnetische meridianen bij elkaar komen. Je hebt de beschikking over een driedimensionaal kompas dat in alle richtingen kan draaien.
- Leg uit in welke richting de magneetnaald wijst in het snijpunt van de geomagnetische meridianen op het noordelijk halfrond.
- Leg uit in welke richting de magneetnaald wijst in het snijpunt van de geomagnetische evenaar en de geomagnetische 0° meridiaan.

► hulpblad 19 De sterkte en de richting van het aardmagnetisch veld kun je als volgt bepalen. Je gebruikt een spoel waarvan de windingen een plastic plaat doorsnijden. Je zet de plaat met de spoel horizontaal. Binnen de spoel zet je een naaldmagneet die vrij draaibaar is in het horizontale vlak. Daarna draai je de plaat zo, dat de 'hartlijn' van de spoel dezelfde richting heeft als die waarin de naaldmagneet wijst. Zie figuur B.32. De rode punt van de naaldmagneet wijst naar het geografische noorden.



Figuur B.32

Binnen de spoel ontstaat een homogeen magnetisch veld waarvan de grootte recht evenredig is met de stroomsterkte door de spoel. Bij een stroomsterkte van 60 mA is het magnetisch veld binnen de spoel $9,4 \cdot 10^{-6}$ T.

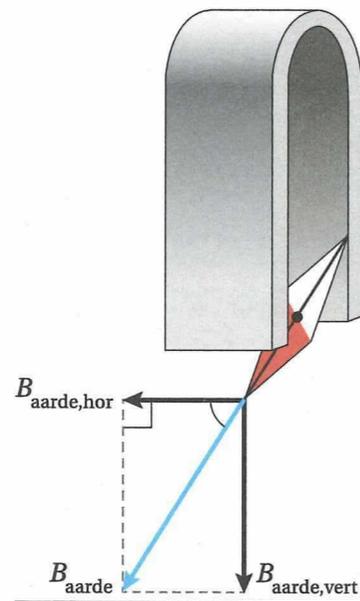
Als de stroomsterkte 115 mA is, blijkt dat de naaldmagneet elke willekeurig stand kan innemen zonder dat die stand verandert.

a Geef hiervoor een verklaring.

Vervolgens bepaal je de richting van het aardmagnetisch veld met een andere opstelling. Daarvoor neem je een naaldmagneet die vrij draaibaar is in een verticaal vlak. Zie figuur B.33. Het verticale vlak waarin deze naaldmagneet draait, kies je evenwijdig aan de hartlijn van de spoel. Dan meet je de inclinatiehoek die de naaldmagneet met de horizontaal maakt. Je vindt daarvoor $67,5^\circ$.

In figuur B.33 is het aardmagnetisch veld B_{aarde} ontbonden in een horizontale component, $B_{\text{aarde,hor}}$ en een verticale component $B_{\text{aarde,vert}}$.

b Bereken de grootte van het aardmagnetisch veld B_{aarde} .



Figuur B.33

B.5 Afsluiting

Samenvatting

De aarde heeft een straal van ongeveer 6400 km. Binnenin bevindt zich de aardkern met een straal van ongeveer 3500 km. Daaromheen zit een mantel met een dikte van ongeveer 2900 km. Aan de buitenkant zit een dunne korst van ongeveer 40 km dik. Het binnenste gedeelte van de aardkern bestaat uit vast metaal en het buitenste gedeelte uit vloeibaar metaal. De aardmantel is vrijwel geheel vast. Door sterke opwarming van binnenuit is het mantelmateriaal plaatselijk vloeibaar. Het kan door scheuren in de aardkorst naar buiten treden, je spreekt dan van vulkanisme.

De aardkorst bestaat uit platen die langzaam ten opzichte van elkaar bewegen. Gaat zo'n beweging schoksgewijs, dan ontstaan aardbevingsgolven die zich in alle richtingen verspreiden. Aan het oppervlak van de aarde ontstaat dan een aardbeving. Op een groot aantal plaatsen staan waarnemingsstations die met seismografen de beweging van de aardkorst meten. Door gegevens van meerdere stations te combineren, wordt de plaats van de aardbeving berekend.

Seismologen bestuderen de aardkorst door in de bodem golven op te wekken. Uit de analyse van de weerkaatste golven trekken zij conclusies over de bodemgesteldheid en de aanwezigheid van olie- en aardgasvelden. De analyse van aardbevingsgolven levert ook informatie op over het binnenste van de aarde.

Twee massa's trekken elkaar aan ten gevolge van de gravitatiekracht. Je ervaart dat op en boven het aardoppervlak als de zwaartekracht. De aarde is echter geen homogene bol. Daarom is de grootte van de zwaartekracht niet overal op aarde gelijk. Er treden verschillen op door de aanwezigheid van bergen en zeeën en door dichtheidsverschillen in de bodem. Ook neemt de zwaartekracht af naarmate je je verder van het aardoppervlak verwijdert.

De aarde heeft een zwak magnetisch veld waarvan al eeuwenlang gebruik wordt gemaakt bij navigatie. Een kompasnaald richt zich namelijk langs het magnetisch veld van de aarde en wijst in de richting van het geografische noorden. Het magnetisch veld van de aarde beschermt ons tegen geladen deeltjes vanuit de ruimte. Deze deeltjes worden door het magnetisch veld afgebogen en vliegen daarvoor grotendeels langs de aarde.

Gegevens die betrekking hebben op dit katern

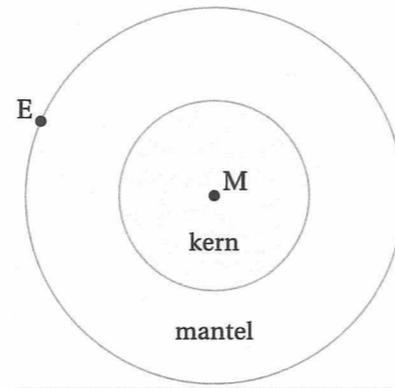
De formules die in dit katern zijn besproken, staan hieronder bij elkaar.

afstand tussen hypocentrum en meetstation	$s \approx 8 \cdot \Delta t$
gravitatiekracht	$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$
zwaartekracht	$F_{zw} = m \cdot g$
hoogtecorrectie in de lucht	$\Delta g_h = -\frac{2}{R_{aarde}} \cdot g \cdot h$
hoogtecorrectie op een berg	$\Delta g_B = \frac{2\pi \cdot \rho \cdot R_{aarde}^2}{M_{aarde}} \cdot g \cdot h$

Een deel van de formules vind je in BINAS tabel 35A Mechanica. In de tabellen 30 en 31 staan veel gegevens die betrekking hebben op dit katern.

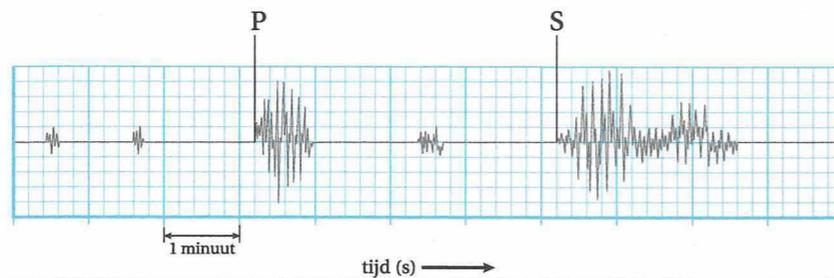
Opgaven

- werkblad 20 In deze opgave vat je de aarde op als een bol die bestaat uit een mantel van gesteenten om een vloeibare kern. Zie figuur B.34. Hierin is M het middelpunt van de aarde en E het epicentrum van een aardbeving.
- hulpblad



Figuur B.34

Figuur B.35 laat een seismogram zien van de trillingen ten gevolge van de P- en S-golven van een aardbeving in Griekenland.



Figuur B.35

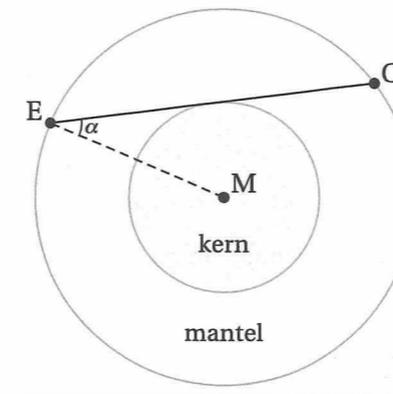
Het seismogram van figuur B.35 is opgenomen in De Bilt. Neem aan dat de golven tussen Griekenland en De Bilt zich rechtlijnig door de mantel hebben voortgeplant. In de mantel hebben de P-golven een voortplantingssnelheid $v_p = 6,2$ km/s, terwijl de S-golven een snelheid $v_s = 3,5$ km/s hebben.

- a Bepaal met behulp van figuur B.35 de afstand tussen De Bilt en het epicentrum in Griekenland.

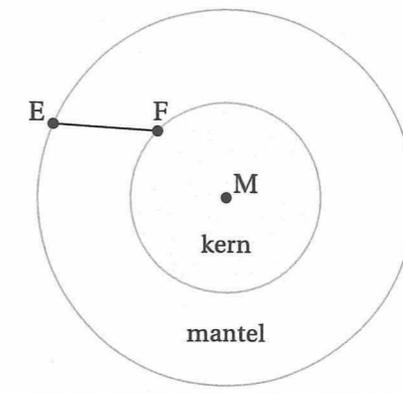
In de mantel planten zich zowel longitudinale als transversale golven voort. Door de kern lopen alleen longitudinale golven.

In figuur B.36 is vanuit het epicentrum E een raaklijn getekend aan de vloeibare kern. De hoek tussen deze raaklijn en de lijn EM noem je α . Hoek α wordt bepaald door de seismogrammen van een groot aantal waarnemingsstations over de hele aarde met elkaar te vergelijken.

- b Leg uit hoe met deze seismogrammen hoek α wordt bepaald.



Figuur B.36



Figuur B.37

Een deel van de P-golven gaat bij F de kern binnen. Zie figuur B.37. De richting van de golven verandert hierbij volgens de brekingswet van Snellius:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{\text{mantel} \rightarrow \text{kern}} = \frac{v_{\text{kern}}}{v_{\text{mantel}}}$$

- i is de hoek van inval in de mantel in graden.
- r is de hoek van breking in de kern in graden.
- v_{kern} is de voortplantingssnelheid in de kern in m/s.
- v_{mantel} is de voortplantingssnelheid in de mantel in m/s.

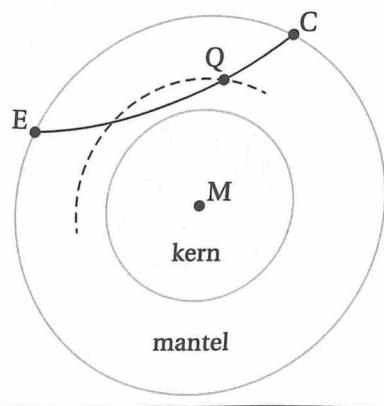
In de mantel vlak bij de kern is de voortplantingssnelheid 1,3 keer zo groot als in de kern. Neem aan dat de voortplantingssnelheid in de kern overal gelijk is.

- c Teken in figuur B.37 hoe de P-golven vanaf F verder gaan tot aan het aardoppervlak.

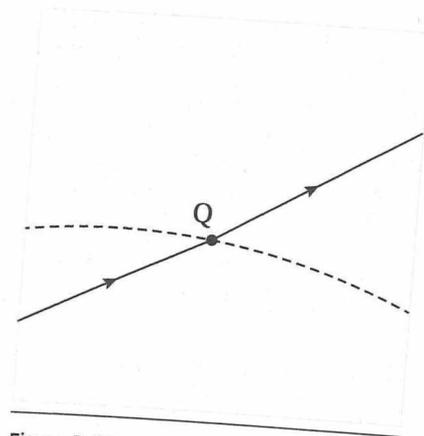
In werkelijkheid volgen de golven in de mantel geen rechte lijn. Ze buigen af naar het oppervlak toe. In figuur B.38 is dit geschetst. Je kunt de mantel opgebouwd denken

uit een zeer groot aantal concentrische lagen. In iedere laag hebben de golven een andere, constante voortplantingssnelheid. Doordat aan ieder grensvlak tussen twee lagen een 'knikje' optreedt als gevolg van breking, ontstaat de gebogen baan. In figuur B.38 is zo'n grensvlak tussen twee lagen met een gestreepte lijn aangegeven. Een uitvergroting van figuur B.38 zie je in figuur B.39.

d Leg uit of de voortplantingssnelheid van de aardbevingsgolven in de mantel van de aarde toe- of afneemt bij toenemende diepte.



Figuur B.38



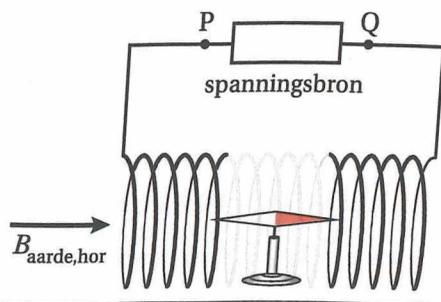
Figuur B.39

► **hulpblad** 21 Een kompasnaald staat horizontaal opgesteld en geeft de richting aan van de horizontale component $B_{\text{aarde,hor}}$ van het aardmagnetisch veld. Annabel geeft de kompasnaald vervolgens een kleine uitwijking uit zijn evenwichtsstand. De punt van de naald trilt harmonisch met een amplitude van 3,0 mm en een trillingstijd van 1,8 s.

a Bereken de snelheid van de punt van de kompasnaald bij het passeren van de evenwichtsstand.

Annabel plaatst vervolgens een spoel evenwijdig aan $B_{\text{aarde,hor}}$ en sluit die aan op een regelbare spanningsbron met polen P en Q. De kompasnaald zet ze midden in de spoel. Zie figuur B.40. Ze stuurt een elektrische stroom door de spoel. De stroom in de spoel is zo gericht dat de richting van het magnetisch veld van de spoel tegen-

b Beredeneer welke van de twee polen de positieve pool is.



Figuur B.40

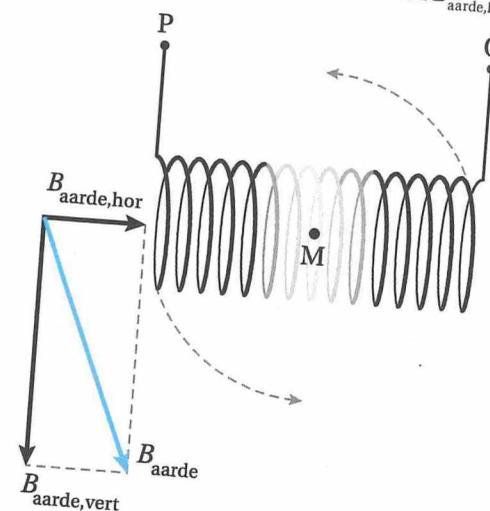
Bij een stroomsterkte van 2,2 mA in de spoel is het magnetisch veld van de spoel even groot als $B_{\text{aarde,hor}}$. Het resulterende magnetisch veld in de spoel is dan nul. De naald gaat dan na een duwtje niet slingeren, maar ronddraaien. De spoel is 25 cm lang en heeft 1600 windingen.

Voor de grootte van het magnetische veld in een spoel geldt:

$$B_{\text{spoel}} = 1,2 \times 10^{-6} \cdot \frac{N \cdot I}{\ell}$$

- N het aantal windingen van de spoel.
- I de stroomsterkte door de spoel in A.
- ℓ de lengte van de spoel in m.

c Toon aan dat de grootte van $B_{\text{aarde,hor}}$ gelijk is aan $1,7 \cdot 10^{-5}$ T.

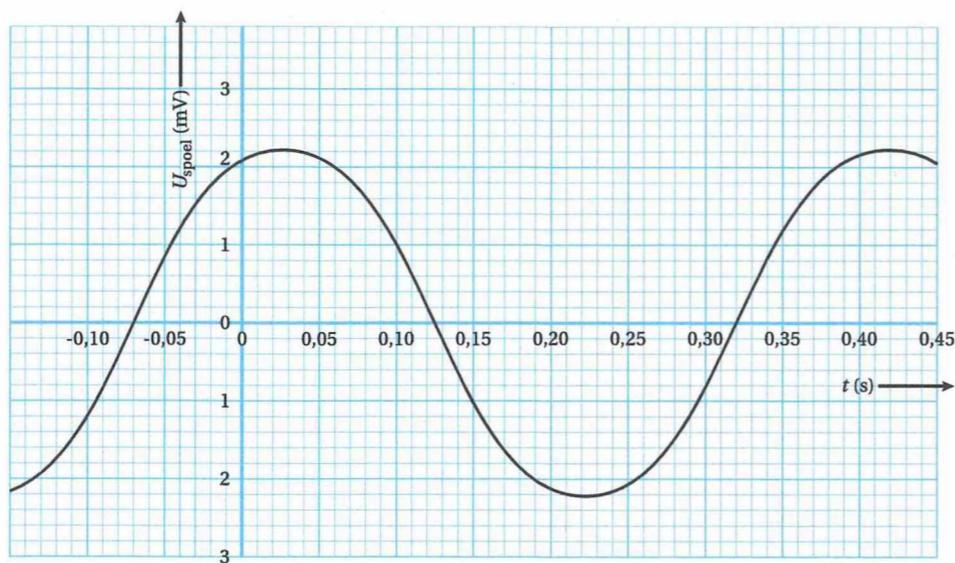


Figuur B.41

Ze verwijdert de spanningsbron en de kompasnaald en verbindt de uiteinden P en Q van de spoel met een oscilloscoop. Ze laat de spoel vervolgens vanuit de getekende stand enkele malen met constante snelheid draaien in een verticaal vlak rond punt M. De draairichting is in figuur B.41 aangegeven.

Tussen de uiteinden P en Q ontstaat tijdens het draaien een inductiespanning U_{spoel} die in figuur B.42 is weergegeven als functie van de tijd t . De inductiespanning is maximaal als de spoel loodrecht op het magnetisch veld van de aarde staat. Op $t = 0$ s passeert de spoel de in figuur B.41 getekende stand.

d Bereken de grootte van het aardmagnetisch veld.

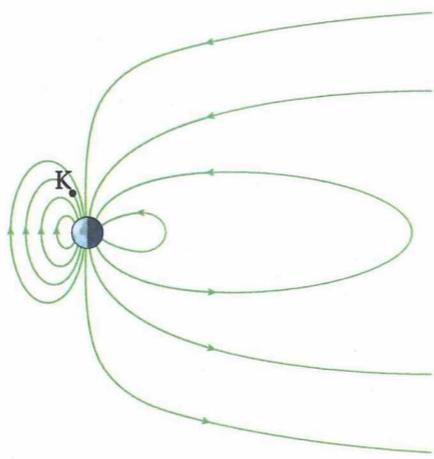


Figuur B.42

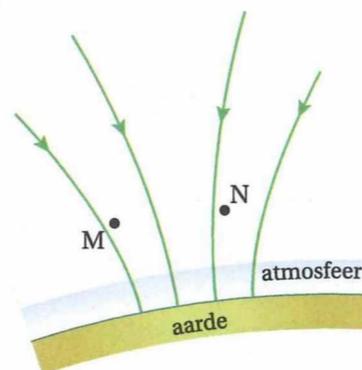
Het magnetisch veld van de aarde strekt zich tot ver in de ruimte uit. Zie figuur B.43. Protonen, afkomstig uit de zon, kunnen soms diep doordringen in dit veld. Hierbij kunnen allerlei lichtverschijnselen ontstaan.

e Hoe noem je zo'n verschijnsel?

Als een proton beweegt in een homogeen magnetisch veld en daarbij een snelheid heeft die niet loodrecht staat op de richting van dit magnetisch veld, beschrijft het proton een spiraalvormige baan.



Figuur B.43



Figuur B.44

In figuur B.44 is een situatie schematisch weergegeven waarbij een proton bij M loodrecht uit het vlak van tekening komt en bij N het vlak van tekening ingaat.

f Leg met behulp van figuur B.44 uit dat dit proton bij M ten gevolge van het magnetisch veld een kracht ondervindt met een component die van de aarde af is gericht.

Register

aarde
 - aardkern 5
 - aardkorst 5
 - aardmantel 5
 - binnenkern 5
 - binnenmantel 5
 - buitenkern 5
 - buitenmantel 5
 - opbouw van de aarde 4
 aardbeving 10
 aardkern 5
 aardkorst 5
 aardmagnetisch veld 6
 aardmagnetisme 24
 aardmantel 5
 binnenkern 5
 binnenmantel 5
 Bouguer correctie 19
 buitenkern 5
 buitenmantel 5
 convectiestroming 6

epicentrum 13
 golf
 - longitudinale golven 11
 - oppervlaktegolf 12
 - primaire golven 12
 - ruimtegolven 11
 - secundaire golven 12
 - transversale golven 11
 gefoon 6
 geografische Noordpool 22
 geografische Zuidpool 22
 gravimeter 19
 gravitatiekracht 17
 hoogtercorrectie 19
 hypocentrum 13
 inclinatiehoek 23
 kompas 22, 24
 lava 5
 lokale versnelling 18
 longitudinale golven 11
 magma 5
 magnetische noordpool 22
 magnetische zuidpool 22

magnetometer 24
 noorderlicht 25
 opbouw van de aarde 4
 oppervlaktegolf 12
 platen 10
 primaire golven 12
 ruimtegolven 11
 schaal van Richter 13
 secundaire golven 12
 seismiek 6
 seismograaf 12
 seismogram 6, 12
 transversale golven 11
 valversnelling 18
 - Bouguer correctie 19
 - hoogtercorrectie 19
 - lokale versnelling 18
 - vormcorrectie 18
 vormcorrectie 18
 vulkanisme 5, 10
 zonnewind 24
 zwaartekracht 17