

Systematische Natuurkunde

■ VWO

Keuzekatern 1 **Geofysica**



LRN·line

ThiemeMeulenhoff

Systematische Natuurkunde

KATERN ■ VWO

Ton van den Broeck
René de Jong
Arjan Keurentjes
John van Polen
Mark Bosman
Maarten Duijnstee

Nicole ten Broeke
Torsten van Goolen
René Hazejager
Kees Hooyman
Koos Kortland
Michel Philippens
Mariska van Rijsbergen
Hein Vink

Eindredactie
Harrie Ottink

Eindredactie Digitaal
Evert-Jan Nijhof



COLOFON

Bureauredactie

Lineke Pijnappels, Tilburg

Beeldresearch

Verbaal Visuele Communicatie BV,
Velp

Technische illustraties

Jeannette Steenmeijer / Verbaal
Visuele Communicatie BV, Velp

Vormgeving basisontwerp

Studio Bassa, Culemborg

Vormgeving en opmaak

Crius Group

Over ThiemeMeulenhoff

ThiemeMeulenhoff ontwikkelt zich van educatieve uitgeverij tot een learning design company. We brengen content, leerontwerp en technologie samen. Met onze groeiende expertise, ervaring en leeroplossingen zijn we een partner voor scholen bij het vernieuwen en verbeteren van onderwijs. Zo kunnen we samen beter recht doen aan de verschillen tussen lerenden en scholen en ervoor zorgen dat leren steeds persoonlijker, effectiever en efficiënter wordt.

Samen leren vernieuwen.

www.thiememeulenhoff.nl

ISBN 978 90 06 84096 4

Negende druk, eerste oplage, 2021

© ThiemeMeulenhoff, Amersfoort, 2021

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16 Auteurswet 1912 j° het Besluit van 23 augustus 1985, Stbl. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie (PRO), Postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp (www.stichting-pro.nl). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet) dient men zich tot de uitgever te wenden. Voor meer informatie over het gebruik van muziek, film en het maken van kopieën in het onderwijs zie www.auteursrechtenonderwijs.nl.

De uitgever heeft ernaar gestreefd de auteursrechten te regelen volgens de wettelijke bepalingen. Degenen die desondanks menen zekere rechten te kunnen doen gelden, kunnen zich alsnog tot de uitgever wenden.

Deze uitgave is volledig CO₂-neutraal geproduceerd.

Het voor deze uitgave gebruikte papier is voorzien van het FSC*-keurmerk.

Dit betekent dat de bosbouw op een verantwoorde wijze heeft plaatsgevonden.

Inhoud

Geofysica	7
1 Inwendige van de aarde	8
2 Bewegingen van de aarde	17
3 De draaiende aarde	25
4 Valversnelling	40
5 Aardmagnetisme	45
6 Afsluiting	51
Leerdoelen	57
Lijst van uitkomsten	59
Register	60

Werken met Systematische Natuurkunde

Alle leerstof die je nodig hebt voor het examen vind je in de leerboeken. Daarnaast gebruik je nog het tabellenboek BINAS.

Wat kom je verder tegen in een leerboek?

Theorie

In de **theorie** hebben belangrijke begrippen een **blauwe kleur**. Achter in dit boek staan deze begrippen bij elkaar in het **register**. Daarmee vind je snel terug waar een begrip besproken is.

Het stralingsvermogen dat per oppervlakte-eenheid wordt ontvangen, noem je de **intensiteit** van de straling. Er geldt:

$$I = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi r^2}$$



- I is de intensiteit van de straling in W m^{-2} .
- P_{bron} is het stralingsvermogen in W.
- r is de afstand tussen de ontvanger en de bron in m.

De gemiddelde intensiteit van de elektromagnetische straling die vanaf de zon de aarde bereikt, heet de **zonneconstante**. De zonneconstante op aarde is gelijk aan $1,368 \cdot 10^3 \text{ W m}^{-2}$. Zie BINAS tabel 32C.

Een **applet** is een nabootsing van een experiment op de computer. Via de methode-site kun je de applet uitvoeren. De opdrachten bij een applet krijg je via je docent.

Halveringstijd

► **applet**
halveringstijd
en activiteit

De tijdsduur waarin de helft van de radioactieve isotopen verval, noem je de **halveringstijd** met symbool $t_{\frac{1}{2}}$. Na 55,6 s is de helft van radon-220 vervallen.

Daarna kunnen de overgebleven radonkernen nog steeds vervallen. Na nog eens 55,6 s is ook van deze kernen de helft vervallen, en dit gaat zo door. In figuur 12.24 zie je de grafiek die het verband geeft tussen het aantal kernen radon-220 en de tijd. Zo'n grafiek noem je een **vervalkromme**.

Staat het icoon **practicum** in de kantlijn, dan is op de docentensite een practicum beschikbaar. Je docent bepaalt op welke manier je een practicum aangeboden krijgt.

► **practicum**
Muizen-
valwagen

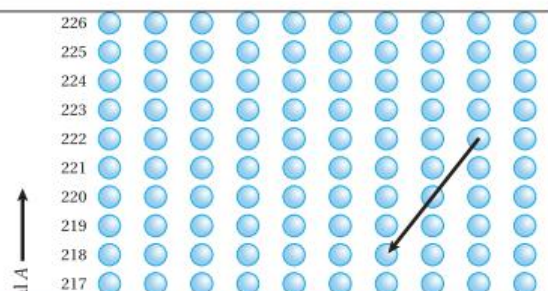
Tegen een ingedrukte spiraalveer is een kogel gelegd. Zie figuur 8.24a. Zodra de veer zich kan ontspannen, werkt er op de kogel een resulterende kracht. Door deze kracht gaat de kogel bewegen. Dus verricht de kracht arbeid. Zie figuur 8.24b.
De energie van een ingedrukte veer noem je **veerenergie**.

Opgaven en uitkomsten

Bij sommige opgaven staat het icoon **tekenblad**. Dan moet er getekend worden in een figuur. Tekenbladen vind je in je eigen digitale omgeving.

► **tekenblad**

33 In de *Radon Health Mine* in de Amerikaanse staat Montana kunnen mensen radontherapie ondergaan. Tien dagen lang verblijven ze enkele uren per dag in een ondergrondse mijntunnel waar de lucht een hoge concentratie aan radioactief radon



Op het **hulpblad** wordt in stappen duidelijk gemaakt hoe je een vraag kunt beantwoorden. Een hulpblad kun je navragen bij je docent.

► **hulpblad**

37 Het is mogelijk om atomen af te remmen met behulp van lasers. Deze techniek wordt gebruikt om extreem lage temperaturen te bereiken.
Een foton met een energie van 1,59 eV passeert een atoom van ^{85}Rb . Als het atoom niet beweegt, is de energie van het foton net te klein om het atoom in aangeslagen toestand te brengen. Als het atoom met een snelheid van $0,500 \text{ m s}^{-1}$ het foton tegemoet komt, wordt het atoom wel aangeslagen. Dit komt door de dopplerverschuiving van licht.
a Leg uit hoe de dopplerverschuiving verklaart dat het atoom aangeslagen raakt, ondanks het feit dat de energie van het foton eigenlijk te klein is.

Achter in dit boek vind je een lijst van **leerdoelen** bij dit katern. Je kunt daarmee controleren of je de stof begrepen hebt. Daarna volgt een lijst met **uitkomsten**. Je kunt daarmee controleren of je een vraag goed hebt beantwoord.

Wil je de **volledige uitwerking** van een vraag inzien, dan krijg je die via je docent.

Lijst van uitkomsten

Hoofdstuk 11

- | | |
|---------------------|--|
| 1 c 210 K | 25 b $1,5 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1}$ |
| 2 b 8,7 jaar | d 14 miljard jaar |
| c links | 26 a $3 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ |
| d 25 | d $6,0 \cdot 10^9$ jaar |
| e $0,153 R_{\odot}$ | e $2,9 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ |
| 3 b 46% | 27 b nee |
| c 53 | c 2,5 m |
| 4 d ja | f $3 \cdot 10^4 \text{ m s}^{-1}$ |

Afsluiting

De **Afsluiting** is de laatste paragraaf van elk hoofdstuk.

De Afsluiting begint met een **samenvatting** van de theorie.

11.5 Afsluiting

Samenvatting

De straling afkomstig van de zon en andere sterren behoort tot het elektromagnetisch spectrum. Naast zichtbaar licht worden onder andere uv-straling, infraroodstraling en röntgenstraling uitgezonden. Alle vormen van elektromagnetische straling planten zich voort met de lichtsnelheid.

Verder vind je in de Afsluiting alle **formules** die in het hoofdstuk zijn besproken.

Je ziet een overzicht van de **BINAS-tabellen** die van belang zijn bij de theorie van het hoofdstuk.

Gegevens die betrekking hebben op dit hoofdstuk

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

lichtsnelheid	$c = f \cdot \lambda$
wet van Wien	$\lambda_{\max} = \frac{k_w}{T}$
wet van Stefan-Boltzmann	$P_{\text{bron}} = \sigma \cdot A \cdot T^4$

De opgaven in de afsluiting gaan over meerdere hoofdstukken en zijn op examenniveau.

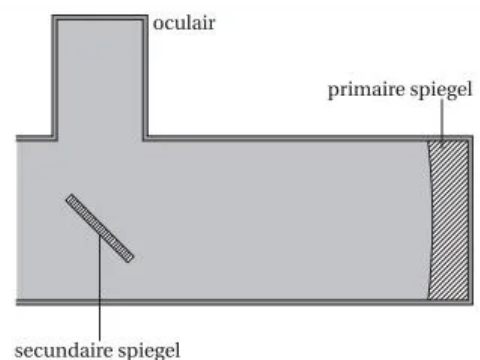
Opgaven

- **tekenblad** 27 Edwin Hubble maakte voor zijn ontdekkingen gebruik van de Hooker Telescope van het Mount Wilson Observatory in Los Angeles. Toentertijd was dit de grootste reflectietelecoop ter wereld. Zie figuur 11.36.

- Leg uit waarom de primaire spiegel zo groot mogelijk moet zijn.
- Leg uit of de secundaire spiegel ook zo groot mogelijk moet zijn.

De resolutie is de kleinste hoek α tussen twee sterren die door de telescoop nog als afzonderlijke sterren waargenomen kunnen worden.

Voor de resolutie een van reflectietelecoop geldt:



Figuur 11.36



Geofysica

Je ziet de aarde gefotografeerd vanuit de ruimte. Foto's geven informatie over het oppervlak van de aarde.

In dit katern maak je ook kennis met enkele meetmethoden die informatie over het binnenste van de aarde geven.

Je leest over de opbouw van de aarde, de beweging van de aardkorst, de beweging van de aarde zelf, de grootte van de valversnelling en het aardmagnetisch veld.

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?

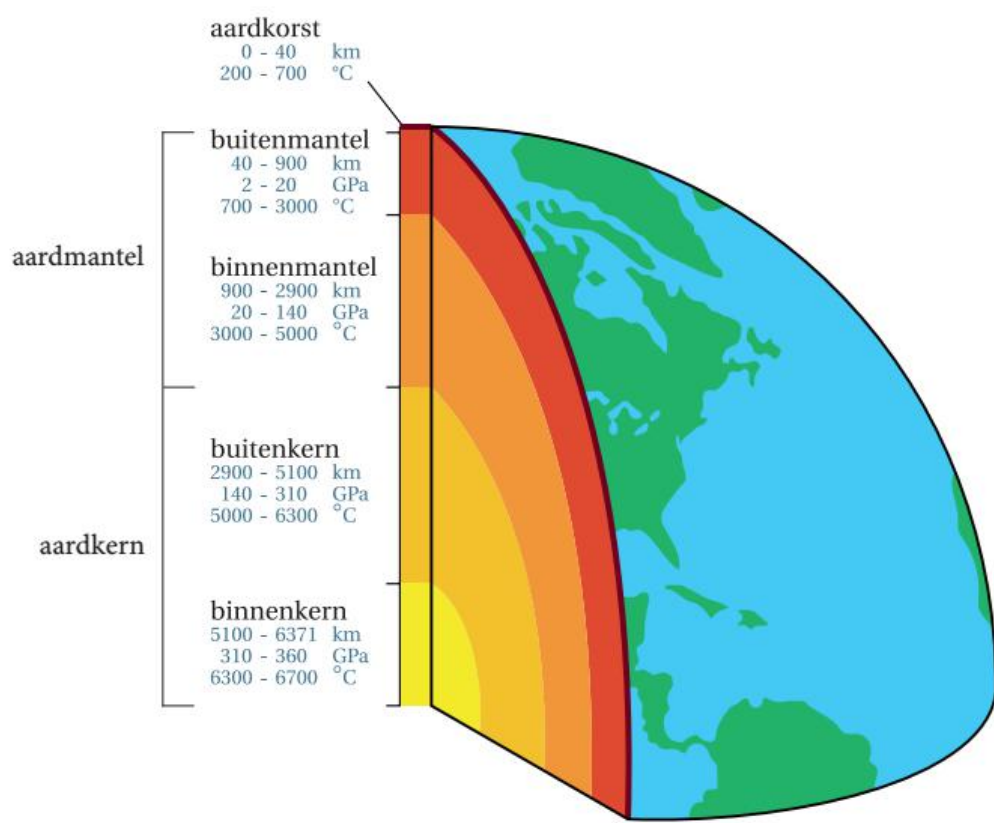


Figuur 1

1 Inwendige van de aarde

Opbouw van de aarde

De aarde is opgebouwd uit vijf lagen. Zie figuur 2. De buitenste laag is de vaste **aardkorst**. Daaronder bevindt zich de **aardmantel** met 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 2

Figuur 2 is 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. Hij bevat 33% van de totale massa tegen 17% van het totale volume van de aarde.

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

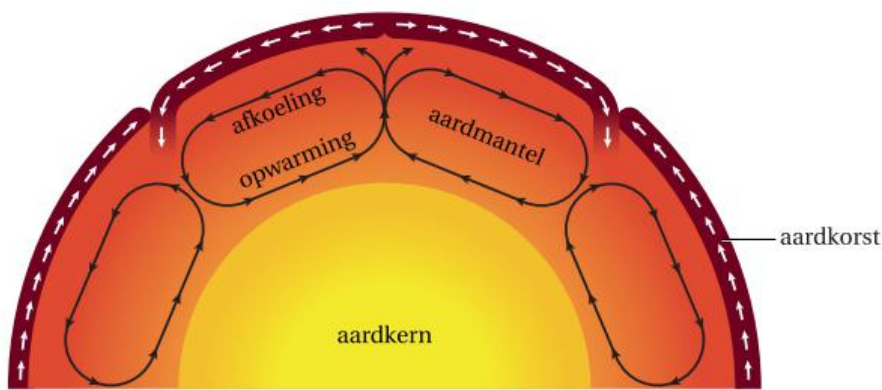
De temperatuur in de aardmantel varieert tussen 700 en de 5000 °C. Bij deze temperaturen verwacht je dat een groot deel van het mantelmateriaal vloeibaar is. Door het gewicht van de aardlagen erboven is de druk echter zo hoog dat het materiaal vast blijft. Wel is het een beetje vervormbaar, zoals asfalt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

De aardkern bestaat voornamelijk uit ijzer en nikkel. De **buitenkeren** is vloeibaar met temperaturen tussen 5000 en 6300 °C. De temperatuur in de **binnenkern** is zo'n 1000 °C hoger. Toch is de binnenkern vast 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 3. De snelheid waarmee het gesteente in de aardmantel beweegt, is maar enkele centimeters per jaar.



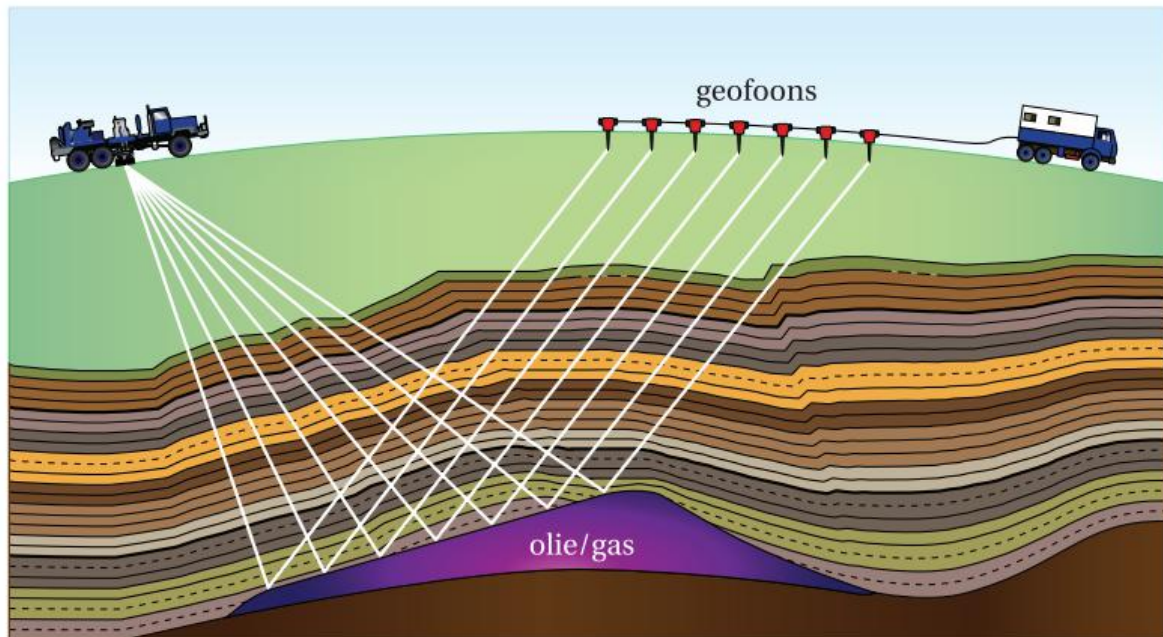
Figuur 3

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 5.

Seismiek

In de aardkorst bevinden zich aardolie, aardgas en andere delfstoffen. Om deze op te sporen wordt de samenstelling van de aardkorst van bovenaf onderzocht.

Een veelgebruikte techniek om informatie te verkrijgen over diepere lagen in de aardkorst is **seismiek**. Deze techniek is vergelijkbaar met echoscopie om bij een zwangerschap een beeld van een foetus te krijgen. In figuur 4 zie je een tekening van de opstelling.



Figuur 4

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

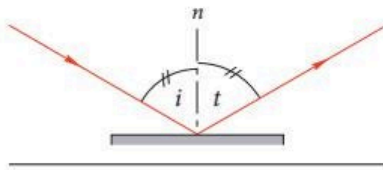
De uitgezonden drukgolven passeren een aantal aardlagen. Hierbij kan weerkaatsing, breking en absorptie optreden. De opgevangen golven geven daardoor informatie over de structuur van de aardlagen.

Weerkaatsing vindt plaats volgens de terugkaatsingswet:

$$\angle i = \angle t$$

- $\angle i$ is de hoek van inval in graden.
- $\angle t$ is de hoek van terugkaatsing in graden.

Een hoek is de hoek tussen een golfstraal en de normaal. De normaal in een punt is een denkbeeldige lijn loodrecht op het oppervlak. Zie figuur 5.



Figuur 5

Als in twee aardlagen de voortplantingssnelheden niet gelijk zijn aan elkaar, dan verandert de richting van de golven: er treedt **breking** op. De verhouding tussen de twee golfsnelheden noem je de **brekingsindex** $n_{1 \rightarrow 2}$ voor de overgang tussen laag 1 en laag 2.

De richting van de golven verandert hierbij volgens de **brekingswet van Huygens**. Deze formule is een aanvulling op de brekingswet van Snellius. Er geldt:

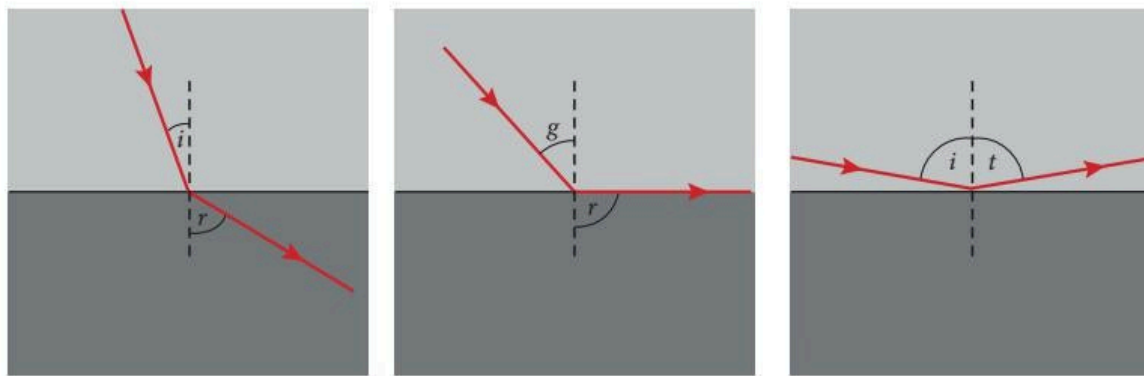
$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{v_1}{v_2} = n_{1 \rightarrow 2}$$

- i is de hoek van inval in laag 1 in graden.
- r is de hoek van breking in laag 2 in graden.
- v_1 is de voortplantingssnelheid in laag 1 in m s^{-1} .
- v_2 is de voortplantingssnelheid in laag 2 in m s^{-1} .
- $n_{1 \rightarrow 2}$ is de brekingsindex voor de overgang van laag 1 naar laag 2.

De voortplantingssnelheden voor geluid vind je in BINAS tabel 15.

Als de brekingsindex groter is dan 1, is de hoek van inval groter dan de hoek van breking. De golf breekt naar de normaal toe.

Is de brekingsindex kleiner dan 1, dan is de breking van de normaal af. Als de hoek van breking gelijk is aan 90° , is de maximale hoek van inval bereikt. Deze hoek heet de grenshoek g . Wordt de hoek van inval nog groter, dan vindt totale terugkaatsing plaats. Zie figuur 6.



Figuur 6

Voorbeeld

Bij seismisch onderzoek vallen geluidsgolven op de grenslaag tussen steen en water. Een van de geluidsgolven passeert de grenslaag.

a Leg uit of de breking naar de normaal toe of van de normaal af is.

De golf valt vervolgens op de grenslaag tussen water en steen en wordt volledig teruggekaatst. Neem aan dat de temperatuur 293 K is.

b Bereken de minimale hoek van inval op deze grenslaag.

Uitwerking

$$a \quad \frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{v_{\text{steen}}}{v_{\text{water}}} = n_{\text{steen} \rightarrow \text{water}} \quad \text{met } v_{\text{steen}} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1} \text{ en } v_{\text{water}} = 1,484 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1}$$

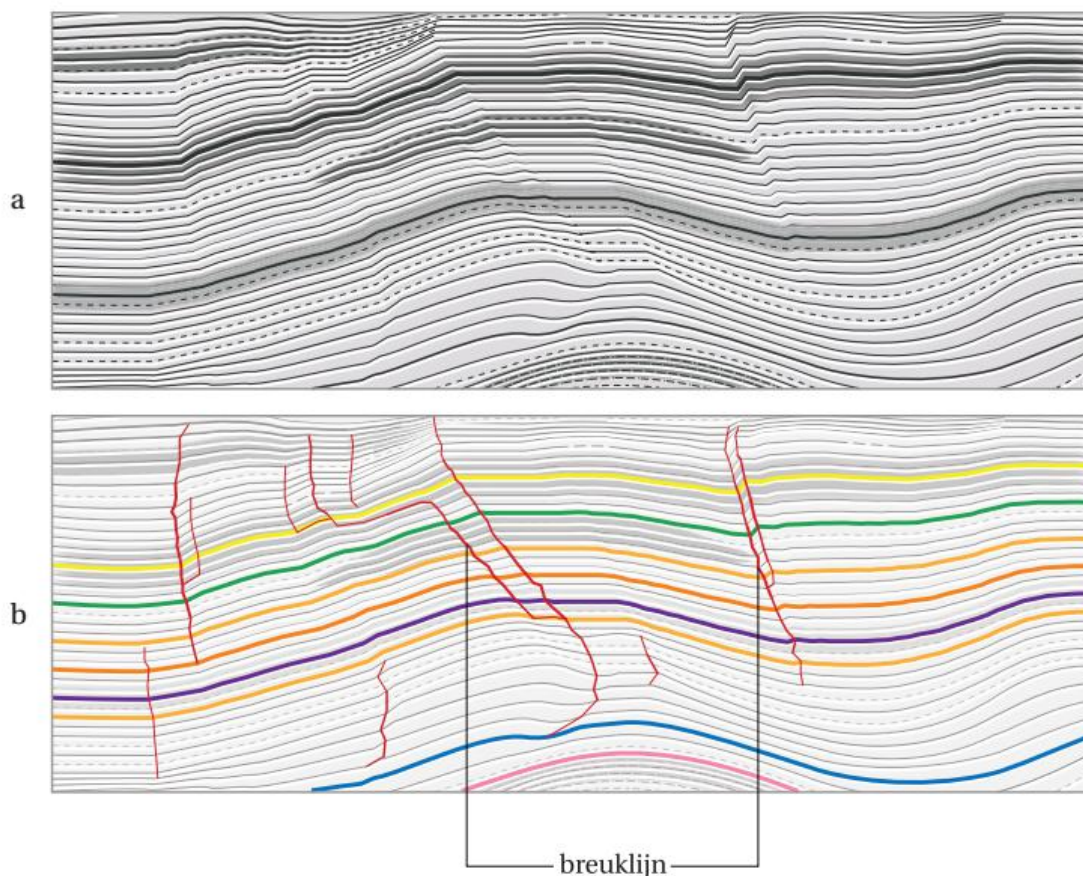
Hieruit volgt dat de brekingsindex groter is dan 1. Dus de breking is naar de normaal toe.

$$b \quad \frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{v_{\text{water}}}{v_{\text{steen}}} = \frac{1,484 \cdot 10^3}{3,6 \cdot 10^3} \quad \text{met } \sin(r) = \sin(90^\circ) = 1$$

$$\sin(i) = 24,3^\circ$$

Afgerond: $i = 24^\circ$.

Uit de opgevangen drukgolf berekent een computer een **seismogram**. Zie figuur 7a. Hieruit volgt een verdeling van de verschillende aardlagen en de aanwezigheid van breuklijnen. Zie figuur 7b. Op grond hiervan doen seismologen voorspellingen over de aanwezigheid van olie of gas.



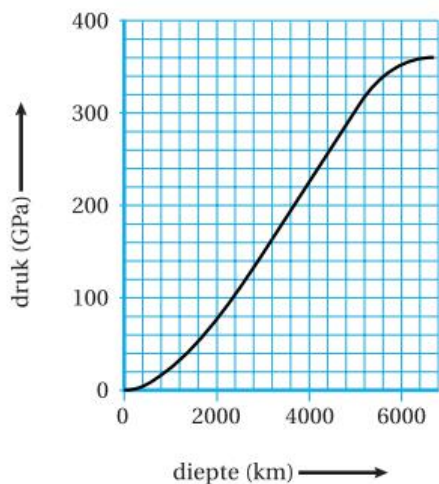
Figuur 7

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.

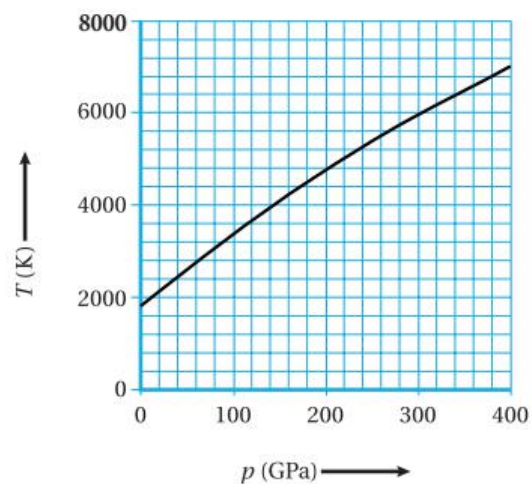
Informatie over nog diepere structuren in de aarde wordt verkregen door analyse van aardbevingen. Daarover lees je meer in de volgende paragraaf.

Opgaven

- **tekenblad** 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 8 zie je een grafiek van de druk in het inwendige van de aarde als functie van de diepte.
 - Geef in figuur 8 de grenzen aan van de aardmantel en van de aardkern.



Figuur 8



Figuur 9

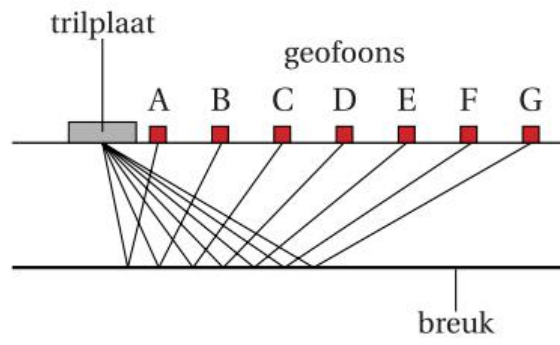
Boven het aardoppervlak is het smeltpunt van ijzer bij een druk van $p = p_0$ gelijk aan 1811 K. Het smeltpunt van ijzer neemt min of meer evenredig toe met de druk, zoals je in figuur 9 ziet.

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 9 aan dat het ijzer in de buitenkern zich in de vloeibare fase bevindt.
- 2 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 $5,513 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$. Volgens BINAS tabel 8 zijn de dichtheden van ijzer en nikkel minstens 50% groter.
 - Leg uit waarom de gemiddelde dichtheid van de aarde veel lager is dan die van de kern.

- **hulpblad** 3 In figuur 10 zie je een schematische tekening van een seismografisch bodemonderzoek.

Een trilplaat zendt hierbij golven uit in allerlei richtingen. De golven hebben een gemiddelde voortplantingssnelheid van $2,8 \text{ km s}^{-1}$. Op een bepaalde diepte zit een breuk in de bodem waartegen de golven weerkaatsen als tegen een spiegel.



Figuur 10

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

- a 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 10 toe.

- b Geef nog een reden waarom een rij geofoons wordt gebruikt in plaats van slechts één.

- **tekenblad** 4 In figuur 11 is een regenboog te zien. Een regenboog ontstaat als er regen en zonlicht aanwezig is. In figuur 12 is een straal zonlicht getekend die op een bolvormige regendruppel valt. Bij de overgang van lucht naar water wordt het licht gebroken. Er vindt kleurschifting plaats doordat de brekingsindices voor kleuren licht verschillen.



Figuur 11

De hoek van breking voor rood licht bij punt A is gelijk aan 43° .

- a Toon aan dat de breking van rood licht overeenkomt met de brekingsindex in BINAS tabel 18.

Aan de rechterkant van de regendruppel is in punt B de hoek van inval voor licht gelijk aan de hoek van breking in punt A.

- b Toon dit aan.

In punt B wordt een deel van het licht weerkaatst. Het andere deel verlaat de druppel. Hiervoor zijn in figuur 12 drie mogelijke lichtstralen getekend.

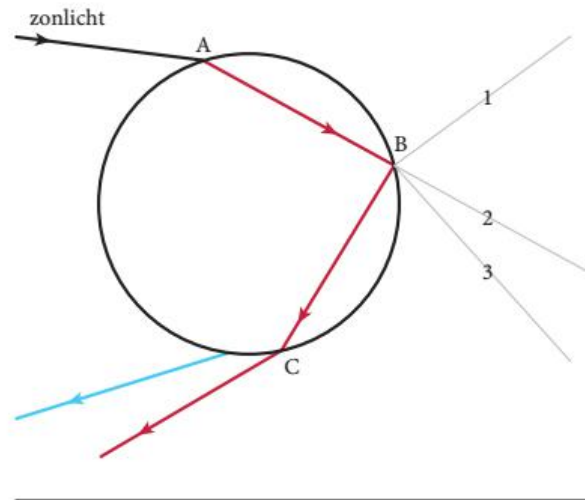
- c Beredeneer welke lichtstraal de juiste is.

De blauwe lichtstraal verlaat de druppel links van de rode, zoals je kunt zien in figuur 12.

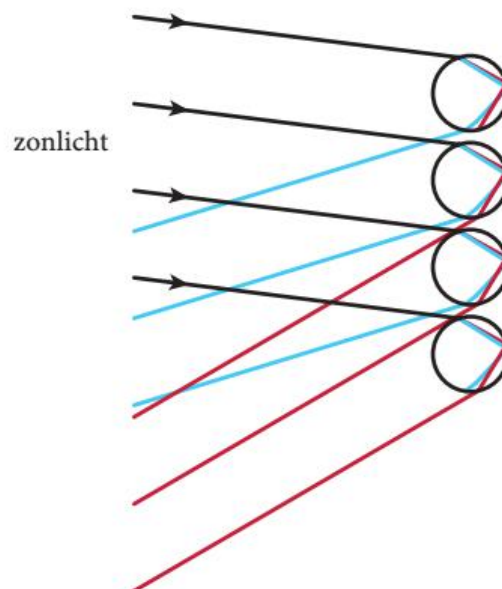
- d Schets in figuur 12 het verloop voor de blauwe lichtstraal binnen de druppel. Licht je antwoord toe.

In figuur 12 komt de blauwe lichtstraal links van de rode en voor een waarnemer dus boven de rode. In de regenboog van figuur 11 zie je dat rood het hoogst boven de horizon staat. Dat komt doordat je niet naar één druppel kijkt, maar naar een groot aantal tegelijk. Zie figuur 13.

- e Leg met behulp van figuur 12 en 13 uit dat je toch rood licht boven blauw licht waarneemt bij een regenboog.

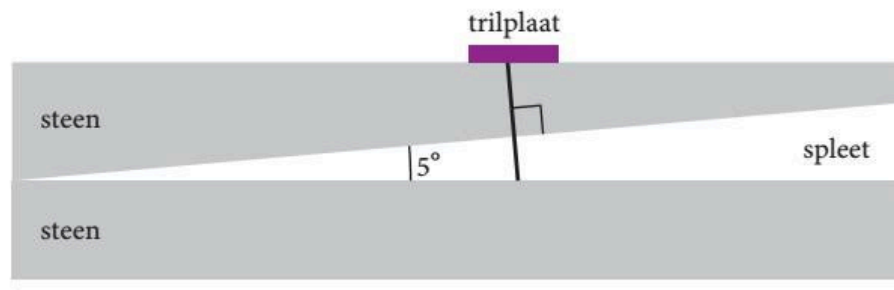


Figuur 12



Figuur 13

- 5 In een stenen ondergrond zit een spleet. De onderkant van deze spleet loopt evenwijdig aan de laag waarop de trilplaat staat. De bovenkant van de spleet maakt een hoek van $5,0^\circ$ met de onderkant. Zie figuur 14.



Figuur 14

In figuur 14 valt geluid langs de lijn loodrecht op de bovenkant van de spleet. De spleet is gevuld met lucht van 20°C .

Als geluid een overgang tussen twee stoffen bereikt, gebeuren er twee dingen: een gedeelte van het geluid weerkaatst op de overgang, de rest van het geluid passeert de overgang.

Door de loodrechte inval gaat het grootste gedeelte van het geluid in een rechte lijn verder en bereikt de bodem van de spleet. Bij de overgang van lucht naar steen vindt breking plaats volgens de brekingswet van Huygens.

- a Bereken de hoek van breking voor de situatie in figuur 14.

Ook op de overgang van lucht naar steen weerkaatst een klein gedeelte van het geluid. Het weerkaatste geluid bereikt de bovenkant van de spleet onder een hoek van 10° .

- b Toon dat aan.

- c Toon aan dat het geluid dat de bovenkant van de spleet bereikt, totaal wordt weerkaatst.

Stel dat de spleet gevuld is met petroleum. De geluidssnelheid in petroleum is gelijk aan $1,3\text{ km s}^{-1}$. Het geluid dat dan de bovenkant van de spleet bereikt wordt nu wel gebroken.

- d Bereken de hoek van breking.

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?



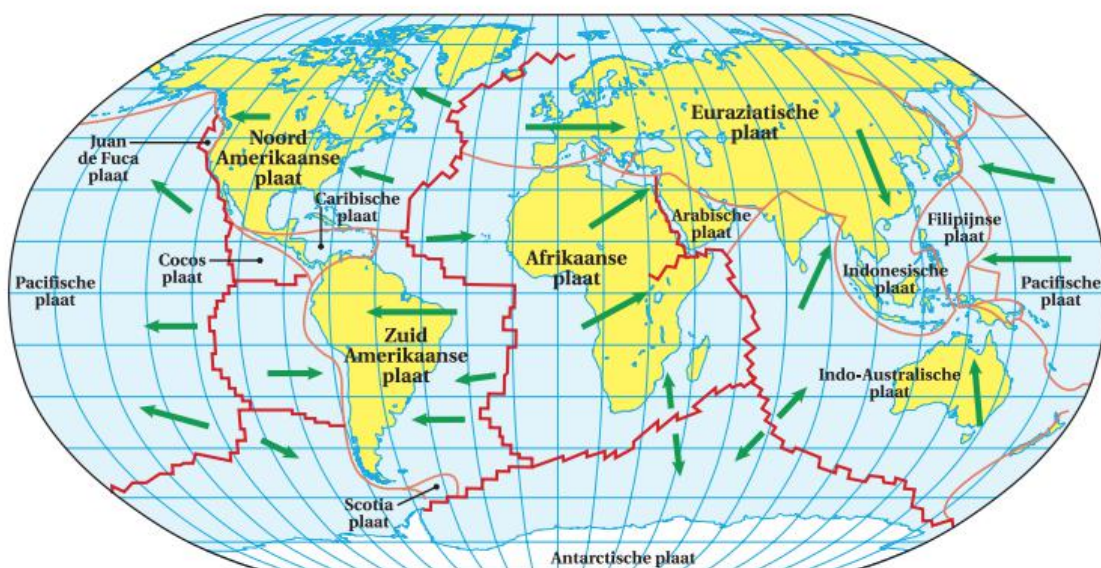
Figuur 15

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 16 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 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 16 geven aan in welke richting een plaat beweegt.



Figuur 16

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

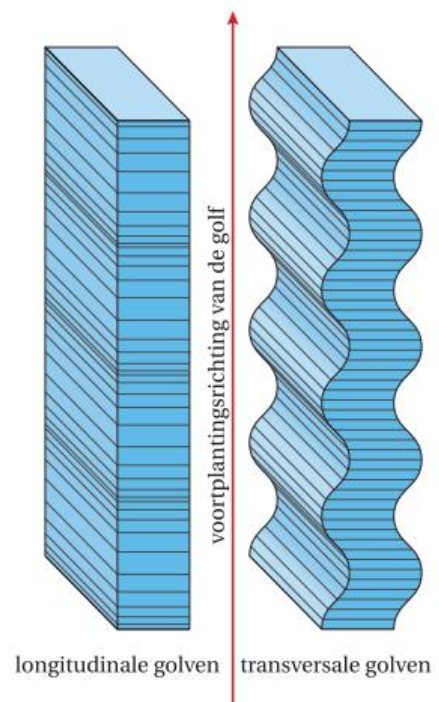
De schokken die ontstaan bij verschuiving van platen en verzakking van de bodem, veroorzaken golven die zich in alle richtingen verspreiden. Daarom heten ze **ruimtegolven**. Een ruimtegolf in vast materiaal kan longitudinaal of transversaal zijn. Zie figuur 17.

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 **primaire golven** (P-golven). De transversale golven heten **secundaire golven** (S-golven).

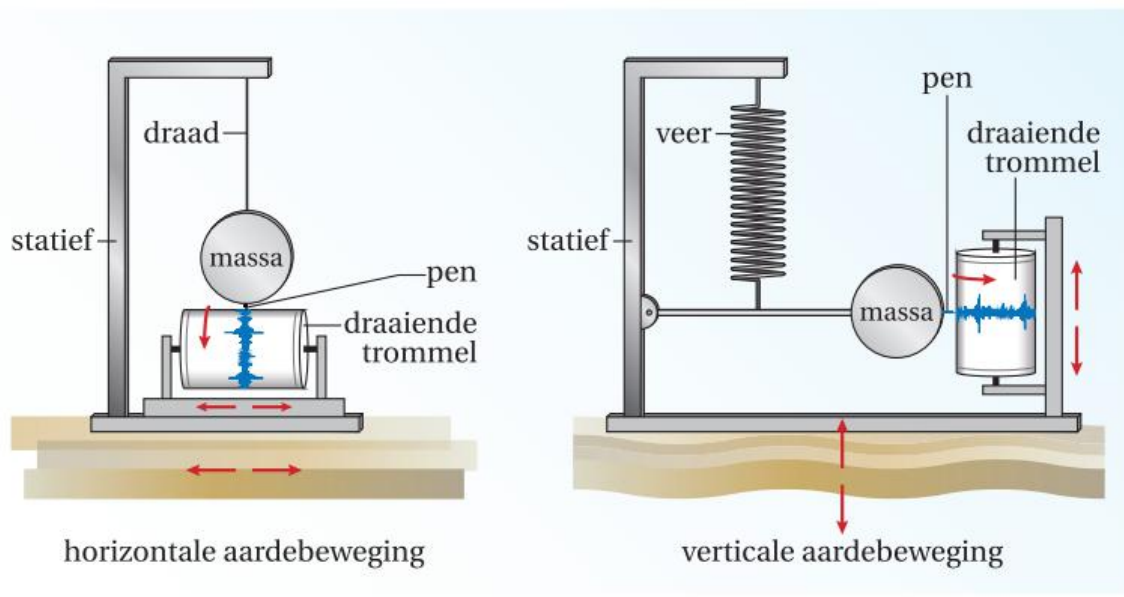
Bij aardbevingsgolven treden verschijnselen op als (totale) weerkaatsing, breking en absorptie. Komt een ruimtegolf aan het aardoppervlak, dan kan hij overgaan in een **oppervlaktegolf**. Oppervlaktegolven hebben meestal een grotere amplitude dan ruimtegolven en zijn dus de golven die de meeste schade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



Figuur 17

Meten van aardbevingsgolven

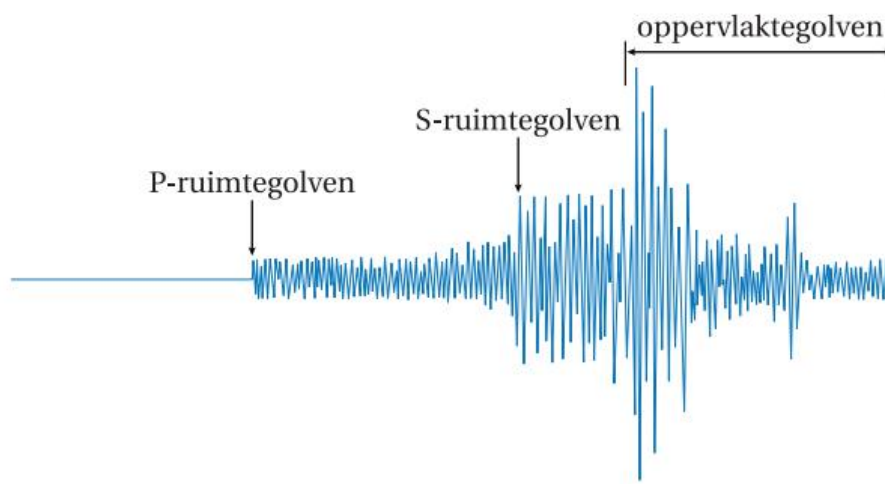
Vanaf een bepaalde sterkte kun je aardbevingsgolven registreren met een **seismograaf**. De aardkorst kan zowel in horizontale als in verticale richting trillen. Voor elke beweging is een bepaald type seismograaf nodig. Zie figuur 18.



Figuur 18

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 19 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 19

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

Rond 1935 ontwikkelde de Amerikaan Charles Richter een methode om de zwaarte van een aardbeving aan te geven. Hij ging uit van een aardbeving die op 100 km afstand van het epicentrum een amplitude van 1 mm gaf op een speciale seismograaf. Bevindt de seismograaf zich dichterbij of verder van het epicentrum, dan is de amplitude op de seismograaf natuurlijk anders. Richter legde met metingen het verband vast tussen de amplitude A_0 op de speciale seismograaf en de afstand D tot het epicentrum de aardbeving. Hiermee kon Richter een willekeurige aardbeving vergelijken met zijn 'standaardbeving'. Richter voerde als maat voor de zwaarte van de aardbeving de **magnitude** M in. Er geldt:

$$M = \log \frac{A}{A_0(D)} = \log A - \log A_0(D)$$

- M is de magnitude volgens de schaal van Richter.
- A is de gemeten amplitude op de seismograaf in mm.
- A_0 is de gemeten amplitude op de seismograaf in mm bij Richters standaardbeving.
- D is de afstand tot het epicentrum in km.

Vanwege $A_0(D)$ is deze schaal lastig te gebruiken. Er geldt $A_0(100) = 0,001$, maar verder hangt A_0 op een ingewikkelde manier af van D . Richter gebruikte hiervoor tabellen. Later zijn er andere manieren ontwikkeld om A_0 te berekenen. Deze komen in opgave 8 aan de orde.

Een aardbeving die precies even sterk is als Richters standaardbeving heeft een magnitude van 0. De schaal van Richter is een logaritmische schaal: neemt de magnitude met 1 toe, dan geeft de seismograaf een 10 keer zo grote uitwijking. In BINAS tabel 30A vind je gegevens die horen bij een sterkte op de schaal van Richter. Wordt die uitwijking groter, dan worden niet alleen de aardschokken steviger, maar wordt ook het gebied waarin de aardbeving schade aanricht steeds groter. Neemt de magnitude van de beving toe met 2, dan is de amplitude een factor 100 groter. De totale energie die vrijkomt bij de beving is dan 1000 keer zo groot. Aardbevingen met een magnitude tot 4 komen vaak voor, maar richten weinig schade aan. Aardbevingen met een magnitude boven de 6 kunnen grote schade aanrichten als ze plaatsvinden in de buurt van bewoond gebied. De krachtigste aardbeving ooit gemeten vond in 1960 plaats in Chili en had een magnitude van 9,5. Seismologen denken dat een beving die ontstaat door verschuiving van aardplaten niet veel zwaarder kan worden dan 10 op de schaal van Richter.

De schaal van Richter wordt door seismologen niet veel meer gebruikt. Ze gebruiken andere, meer geavanceerde maten om de sterkte van een aardbeving aan te geven. Vanwege de bekendheid wordt in nieuwsberichten vaak nog wel de schaal van Richter gebruikt.

Opgaven

- 6 Bij een aardbeving lopen longitudinale en transversale golven door de aarde.
 - a Noem drie verschillen tussen longitudinale en transversale golven.
De transversale S-golven hebben in een bepaald gesteente een voortplantingssnelheid van $3,4 \text{ km s}^{-1}$. De frequentie van deze golven is $1,2 \text{ Hz}$.
 - b Bereken de golflengte van de transversale golven in dit gesteente.
De longitudinale P-golven hebben een hogere snelheid van $6,0 \text{ km s}^{-1}$.
Uit voortplantingssnelheden volgt de vuistregel $s \approx 8 \cdot \Delta t$. Hierin is Δt het tijdverschil tussen het tijdstip t_p waarop de P-golven arriveren, en t_s het tijdstip waarop de S-golven arriveren.
 - c Laat dat zien.
- 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 de richting de golven zijn gekomen.
 - a Leg uit dat je met één meting kunt vaststellen dat de aardbeving op een bepaalde cirkel rondom het meetstation heeft plaatsgevonden.
 - b Leg uit met een schets dat je met de metingen van drie meetstations de plaats van het epicentrum eenduidig kunt vaststellen.

- 8 Richter stelde tabellen op om de magnitude te bepalen. Later werden er benaderingen ontwikkeld voor berekeningen volgens de schaal van Richter. Zo worden de volgende formules gebruikt:

$$M = \log A + 1,6 \cdot \log D - 0,15 \text{ voor } D \leq 200$$

$$M = \log A + 3,0 \cdot \log D - 3,38 \text{ voor } D > 200$$

- M is de magnitude volgens de schaal van Richter.
- A is de gemeten amplitude op de seismograaf in mm.
- D is de afstand tot het epicentrum in km.

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 mm op zijn seismograaf veroorzaken, dan gaf hij die aardbeving een sterkte 0.

- a Laat zien dat de bovenstaande formules hetzelfde resultaat geven.

De ene formule geldt voor afstanden tot 200 km, de andere voor grotere afstanden

- b Controleer dat beide formules hetzelfde resultaat geven voor $D = 200$ km.

Richters methode is eigenlijk niet geschikt voor hele zware bevingen.

- c Bereken hoe groot de uitwijking van Richters seismograaf zou zijn voor een beving met magnitude 8, gemeten op een afstand van 100 km.

Volgens BINAS tabel 30A is de energie van een aardbeving 10^3 keer zo groot als de magnitude twee punten hoger is op de schaal van Richter.

- d Leg uit dat bij 1 punt omhoog op de schaal van Richter de energie van de beving 31,6 keer zo groot wordt.

- 9 Tijdens een optreden van de band Rage Against the Machine op het Pinkpopfestival in 1994 sprongen vele mensen op de maat op en neer op de muziek. Het KNMI meldde dat hierdoor op de festivallocatie een aardbeving ontstond met een magnitude van 1 op de schaal van Richter.

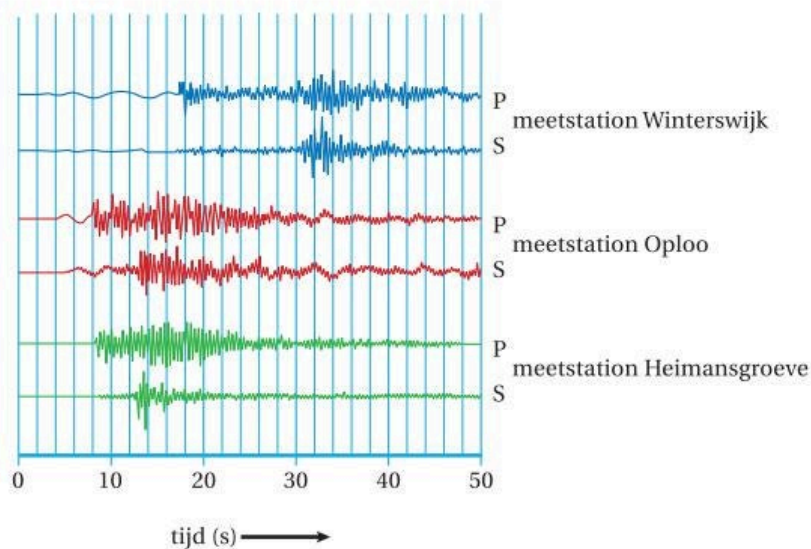
- a Toon dit aan met een berekening waarbij je het volgende mag aannemen:

- Er zijn 4000 springende festivalgangers.
- Een gemiddelde festivalganger heeft een massa van 75 kg en springt 50 cm omhoog.
- Het tempo van de muziek geeft 90 sprongen per minuut aan.
- Alle zwaarte-energie wordt door de bodem geabsorbeerd.

Soms trilt de aarde ten gevolge van een buitenaardse oorzaak. Er is bewijs dat de aarde 65 miljoen jaar geleden is geraakt door een planetoïde. Bij deze inslag kwam een geschatte hoeveelheid energie vrij van 100 teraton TNT. De inslag leidde tot de dood van een groot deel van het leven op aarde, waaronder alle dinosauriërs. In BINAS tabel 6 vind je gegevens over de hoeveelheid energie die vrijkomt bij de explosie van 1 ton TNT.

- b Laat met een berekening zien waar de aardbeving veroorzaakt door deze inslag past op de schaal van Richter.

► **tekenblad 10** In figuur 20 zie je de registraties van dezelfde aardbeving door drie meetstations.



Figuur 20

- a Toon aan dat de afstand van het epicentrum van de aardbeving tot aan het meetstation in Winterswijk ongeveer 100 km was.

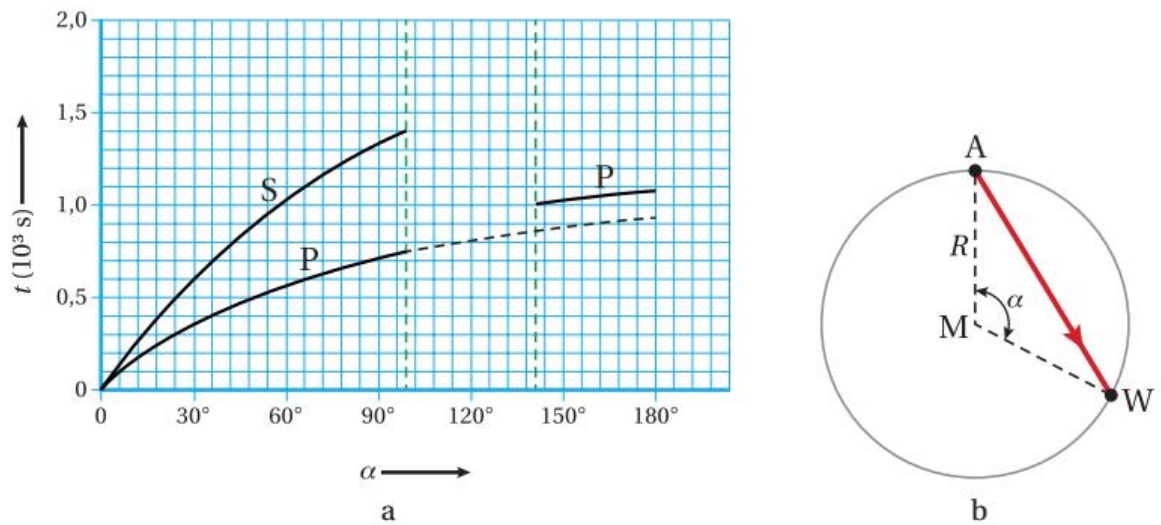
In figuur 21 zie je de ligging van de drie meetstations. De schaal van de kaart is 1 : 2 500 000.

- b Bepaal de plaats van het epicentrum van de beving.



Figuur 21

- 11 Een model van de aarde volgt uit onderzoek van aardbevingen. In figuur 22a zie je de looptijd van de P- en S-golven van een aardbeving als functie van hoek α . Hoek α is een maat voor de plaats van een waarnemingsstation W ten opzichte van plaats A van een aarbeving. Zie figuur 22b.



Figuur 22

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 $\alpha = 90^\circ$.

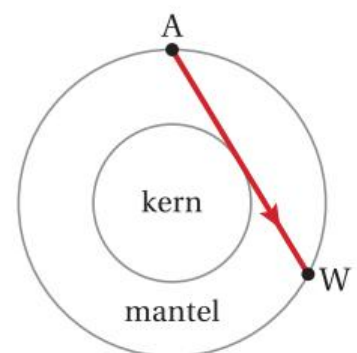
- Toon aan dat het waarnemingsstation op een afstand van $9,0 \cdot 10^6$ m ligt.
- Bepaal met behulp van figuur 22a de golfsnelheid van de P-golven.

Uit figuur 22a 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 23. In dit model heeft de aarde een homogene, bolvormige kern, met daaromheen een homogene, vaste mantel met andere eigenschappen.

- Leg met behulp van figuur 22 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 22a na de tweede streep.

- Is de golfsnelheid van de P-golven in de aardkern groter of kleiner dan de P-golven in de aardmantel? Licht je antwoord toe.



Figuur 23

Vanuit de ruimte ziet een orkaan er spectaculair uit. Hoe ontstaat wind en waarom gaat deze in spiraalvorm draaien?



Figuur 24

3 De draaiende aarde

Hoeksnelheid en baansnelheid

De aarde draait om zijn as. Een punt van het aardoppervlak draait dan rond met een baansnelheid $v = \frac{2\pi r}{T}$. In deze uitdrukking is r de afstand van het punt tot aan de aardas. Als gevolg hiervan staan de noord- en zuidpool stil, terwijl de punten op de evenaar een baansnelheid hebben van bijna $1,7 \cdot 10^3 \text{ km h}^{-1}$. De **baansnelheid** van Nederland is iets meer dan $1 \cdot 10^3 \text{ km h}^{-1}$.

De baansnelheden verschillen, maar alle punten leggen tijdens een omwenteling van de aarde wel steeds dezelfde hoek af. Als de aarde één keer om zijn as is gedraaid, heeft elk punt een hoek van 360° oftewel $2\pi \text{ rad}$ afgelegd. De tijdsduur daarvoor is de omlooptijd T . Voor de **hoeksnelheid** ω geldt dus:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

- ω is de hoeksnelheid in rad s^{-1} .
- T is de omlooptijd in s.

Voorbeeld

De aarde draait in 24 uur een keer om zijn as.

- a Bereken de baansnelheid van een punt op de evenaar in km h^{-1} .
- b Bereken de hoeksnelheid van een punt op de evenaar.

Uitwerking

a $v = \frac{2\pi r}{T}$

$r = 6378 \text{ km}$

Zie BINAS tabel 31.

$T = 24 \text{ h}$

$v = 1,66 \cdot 10^3 \text{ km h}^{-1}$

Afgerond: $1,7 \cdot 10^3 \text{ km h}^{-1}$.

b $\omega = \frac{2\pi}{T}$ met $T = 24 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$

$\omega = \frac{2\pi}{86\,400} = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$

Afgerond: $7,3 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$.

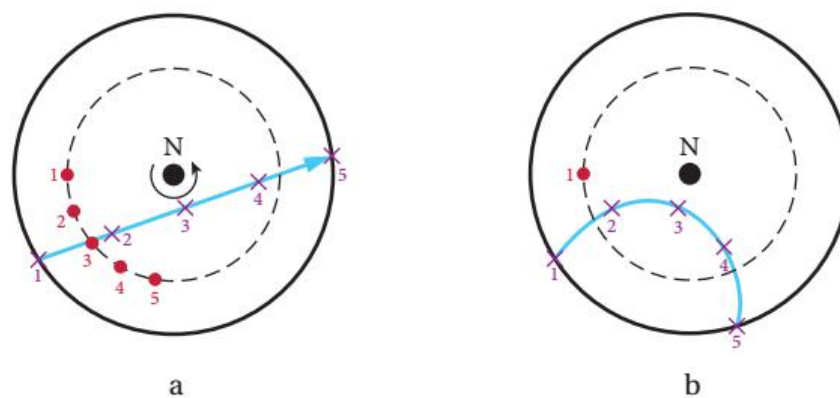
Opmerking

Uit de formules voor de baansnelheid en de hoeksnelheid volgt dat je de baansnelheid ook kunt berekenen met $v = \omega \cdot r$.

Waarnemingen in een draaiend systeem

Alle voorwerpen op aarde draaien met de aarde mee. Een waarnemer op aarde, bijvoorbeeld in Nederland, neemt verschijnselen anders waar dan een waarnemer in de ruimte.

Een meteor beweegt op grote hoogte langs de aarde. De waarnemer in de ruimte kijkt in de richting van de noordpool naar de aarde. Figuur 25a is een bovenaanzicht van de aarde met de noordpool in het midden. De waarnemer in de ruimte ziet het blauwe spoor van de meteor in een rechte lijn en tegelijkertijd het rode spoor van de waarnemer in Nederland, die meedraait met de aarde terwijl de meteor overtrekt. De waarnemer in de ruimte ziet de aarde dus onder het spoor van de meteor rechtsom draaien.



Figuur 25

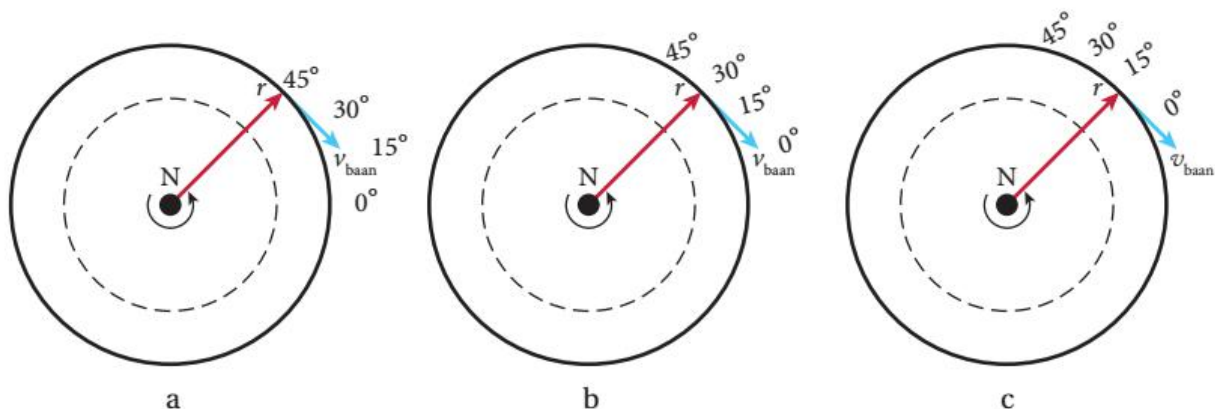
Een waarnemer in Nederland neemt niet waar dat hij beweegt. In figuur 25b is de relatieve beweging van de meteor ten opzichte van de waarnemer in Nederland getekend. Door de combinatie van beweging van de draaiende aarde en de beweging

van de meteor ziet hij de meteor een draai naar rechts maken. Maar deze beweging is het gevolg van het feit dat hij zelf meedraait met de aarde. Het lijkt dus of de meteor een versnelling naar rechts ondervindt, in plaats van de eenparige rechte beweging die je in figuur 25a ziet.

Wil je de beweging van een voorwerp door een waarnemer op de draaiende aarde beschrijven, dan moet je eerst meer weten over het gedrag van vectoren in een draaiend systeem.

Plaats en snelheid in een draaiend systeem

Een vector heeft grootte en richting. Dat geldt onder andere voor plaats, snelheid, versnelling en kracht. Figuur 26 is een bovenaanzicht van de aarde met de noordpool in het midden. In figuur 26 bevindt een voorwerp zich in een punt in de buurt van het aardoppervlak. De plaats geef je weer met de plaatsvector $\vec{r}$. Dit is de rode pijl met lengte r die aangrijpt in het middelpunt van de cirkel loodrecht op de draaias. In figuur 26a wijst de vector in de richting van 45° . Als de aarde draait rondom de oorsprong én de vector blijft op zijn plaats, dan draait de vector ten opzichte van de aarde. In figuur 26b is de aarde 15° gedraaid tegen de klok in. In figuur 26c is de aarde weer 15° verder gedraaid. Door het draaien wijst de rode vector naar een steeds kleinere hoek. Ten opzichte van de aarde is de vector dus met de klok mee gedraaid: tegengesteld aan de draairichting van de aarde.



Figuur 26

Gezien vanuit de draaiende aarde heeft de punt van de vector een baansnelheid met grootte $v_{\text{baan}} = \frac{2\pi r}{T} = \omega \cdot r$. Zie de blauwe pijl in figuur 26. De richting van die baansnelheid is tegengesteld aan de draairichting van de aarde in het vlak loodrecht op de draaias, en loodrecht op $\vec{r}$. Daarom geldt voor de snelheid $\vec{v}_{\text{baan}}$ ten gevolge van de draaiende aarde: $\vec{v}_{\text{baan}} = -\omega \cdot \vec{r}_N$. Hierbij is $\vec{r}_N$ een vector met dezelfde lengte als $\vec{r}$, maar over 90° gedraaid. Het minteken geeft aan dat de richting tegengesteld is aan de draairichting van de aarde.

Beweeg je in een niet-draaiend systeem, dan bereken je de snelheid door te differentiëren of de afgeleide nemen: $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$.

In een systeem dat draait met hoeksnelheid ω zijn er twee bijdragen aan de waargenomen snelheid. Een bijdrage doordat het voorwerp zelf beweegt in het draaiend systeem en een bijdrage die ontstaat doordat de waarnemer in het systeem zelf draait. Er geldt:

$$D_{\omega}(\vec{r}) = \frac{d\vec{r}}{dt} - \omega \cdot \vec{r}_N \text{ oftewel } \vec{v}_{\omega} = \vec{v} + \vec{v}_{\text{baan}}$$

- $D_{\omega}(\vec{r}) = \vec{v}_{\omega}$ is de waargenomen snelheid van een voorwerp in een draaiend systeem in m s^{-1} .
- $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$ is de snelheid waarmee het voorwerp zelf beweegt in m s^{-1} .
- ω is de hoeksnelheid van het draaiend systeem in rad s^{-1} .
- $\vec{r}_N$ is de vector met dezelfde lengte als $\vec{r}$, maar over 90° gedraaid in m.
- $\vec{v}_{\text{baan}}$ is de baansnelheid van de waarnemer in m s^{-1} .

Opmerkingen

- 1 Als het systeem niet draait, is $\omega = 0$ en geldt $D_{\omega=0}(\vec{r}) = \frac{d\vec{r}}{dt} - 0 \cdot \vec{r}_N = \vec{v}$, de gewone uitdrukking voor snelheid als de afgeleide van de plaats.
- 2 Elke vector $\vec{x}$ in het vlak loodrecht op de draaias krijgt in een draaiend systeem een extra bijdrage loodrecht op de richting van de vector.

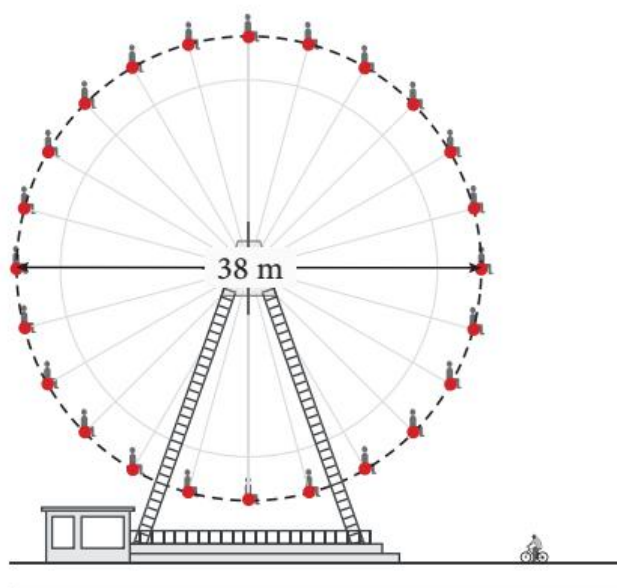
Er geldt: $D_{\omega}(\vec{x}) = \vec{x}_{\omega} = \frac{d\vec{x}}{dt} - \omega \cdot \vec{x}_N$

Voorbeeld

Een reuzenrad staat op een kermisterrein vlak bij een straat. Zie figuur 27.

Hannah zit in een gondel van het reuzenrad met een baansnelheid van 15 m s^{-1} .

- a Bereken de hoeksnelheid van het reuzenrad.

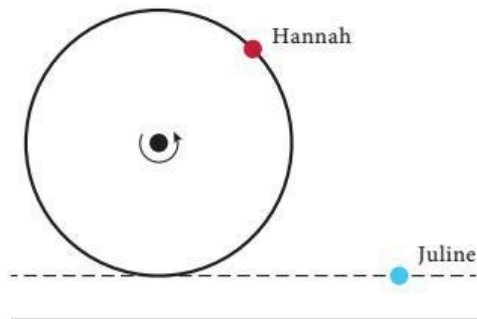


Figuur 27

Juline fietst langs het reuzenrad met een constante snelheid van 15 m s^{-1} .

Figuur 28a toont de posities van Hannah en Juline op het moment dat ze elkaar zien.

- Teken in figuur 28a met een pijl van 2 cm de snelheid van Juline.
- Construeer in figuur 28a de snelheid van Juline, zoals die door Hannah wordt waargenomen.



Figuur 28a

Uitwerking

- Voor de baansnelheid geldt $v = \omega \cdot r$.

$$v = v_{\text{baan, Hannah}} = 15 \text{ m s}^{-1}$$

$$r = \frac{1}{2}d \text{ met } d = 38 \text{ m}$$

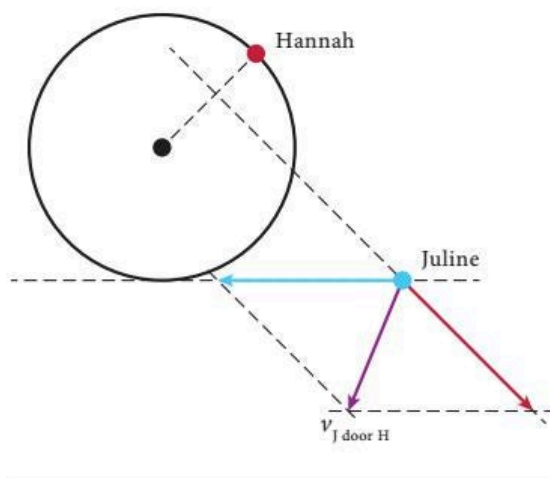
$$r = 19 \text{ m}$$

$$15 = \omega \cdot 19$$

$$\omega = 0,418 \text{ rad s}^{-1}$$

Afgerond: $0,42 \text{ rad s}^{-1}$.

- Zie de blauwe pijl in figuur 28b.
- Zie figuur 28b. De snelheid die Hannah waarneemt is de resultante van de snelheid van Juline en de baansnelheid van Hannah in tegengestelde richting. De baansnelheid van Hannah staat loodrecht op de straal van de cirkelbaan. Dit is in figuur 28b de rode pijl. De resultante construeer je met een parallellogramconstructie.



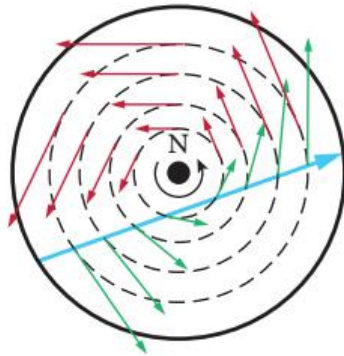
Figuur 28b

Versnelling in een draaiend systeem

De versnelling geeft aan hoe de snelheid verandert in de tijd. In een draaiend systeem draagt de draaiing bij aan de waargenomen versnelling.

De meteor beweegt met constante snelheid over het noordelijk halfrond van de aarde volgens de blauwe pijl in figuur 29.

De draaisnelheid van een aantal mensen op aarde is met rode pijlen aangegeven. Deze snelheid is groter naarmate de mensen zich verder van de draaias bevinden.



Figuur 29

Gezien vanuit de meteor komen in het begin van de beweging de mensen links van meteor met grote snelheid naar de meteor toe. Ook de richting waarin de mensen naar de meteor toe komen verandert steeds. Dat zie je aan de groene pijlen in figuur 29. De snelheid neemt af totdat de afstand van de meteor tot de draaias minimaal is. Hierna bewegen, gezien vanuit de meteor, de mensen op aarde naar links, met een steeds grotere snelheid als de meteor passeert. Ook dan wijzigt de richting waarin de mensen naar links bewegen.

Gezien vanuit de mensen op het draaiende aardoppervlak geldt het tegenovergestelde effect. Het lijkt dan of de meteor een afbuiging naar rechts ondervindt. Het maakt niet uit hoe je de blauwe pijl tekent: er is altijd een vergelijkbare beschrijving voor de waarneming van de beweging gezien vanuit de meteor of vanuit de mensen op aarde.

De versnelling in een stilstaand systeem is de afgeleide van de snelheid: $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$. In een draaiend systeem moet je ook nog rekening houden met de bijdrage van de hoeksnelheid. Er geldt:

$$\vec{a}_\omega = D_\omega(\vec{v}_\omega)$$

$$\vec{a}_\omega = D_\omega(\vec{v} - \omega \cdot \vec{r}_N)$$

$$\vec{a}_\omega = D_\omega(\vec{v}) - \omega \cdot D_\omega(\vec{r}_N)$$

$$\vec{a}_\omega = \left(\frac{d\vec{v}}{dt} - \omega \cdot \vec{v}_N \right) - \omega \cdot \left(\frac{d\vec{r}_N}{dt} - \omega \cdot \vec{r}_{NN} \right)$$

$$\vec{a}_\omega = (\vec{a} - \omega \cdot \vec{v}_N) - \omega \cdot (\vec{v}_N - \omega \cdot \vec{r}_{NN})$$

$$\vec{a}_\omega = \vec{a} - 2\omega \cdot \vec{v}_N - \omega^2 \cdot \vec{r}$$

In de laatste stap maak je gebruik van het feit dat $\vec{r}_{NN} = -\vec{r}$. Immers, als je een vector twee keer over 90° draait, krijg je de tegenovergestelde vector.

Er zijn dus twee extra bijdragen aan de versnelling:

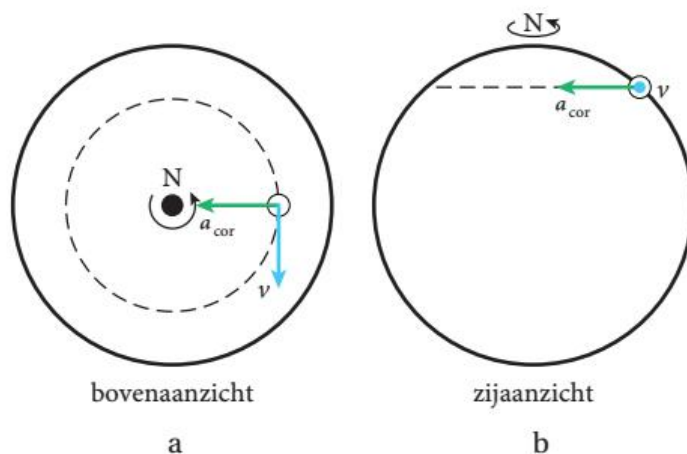
- 1 De term $-2\omega \cdot \vec{v}_N$ heet de **coriolisversnelling**. Deze leidt tot het **corioliseffect**.
- 2 De term $-\omega^2 \cdot \vec{r}$ heet de **middelpuntvliedende versnelling**. Deze leidt tot het **middelpuntvliedend effect**.

Coriolisversnelling

De richting van de coriolisversnelling a_{cor} ligt in het vlak loodrecht op de draaias en staat loodrecht op de snelheid van het voorwerp. De richting is tegengesteld aan de draairichting. Bij het bepalen van de snelheid v_N gaat het om de relatieve snelheid. Als je over straat fietst, dan draai je mee met de aarde. En ten opzichte van de aarde is je fietssnelheid dus de relatieve snelheid.

Beweeg je met fietssnelheid v in een vlak loodrecht op de draaias, dan is $v_N = v$.

De richting van a_{cor} is dan in dit vlak loodrecht op je snelheid. Is de beweging met de draairichting mee, dan is a_{cor} van de aardas af gericht, en anders naar de aardas toe. Zie figuur 30.



Figuur 30

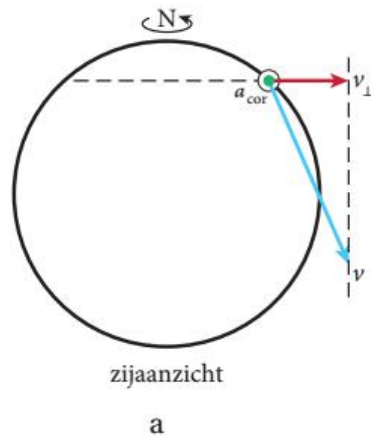
In figuur 30a bevinden de vectoren zich in het vlak van de tekening. Dat geldt ook voor a_{cor} in figuur 30b. De pijl voor de snelheid v komt in figuur b naar je toe, het papier (of het scherm) uit. Je ziet een dikke blauwe stip met bijschrift v .

In tekeningen zoals figuur 30 maak je gebruik van de volgende afspraken:

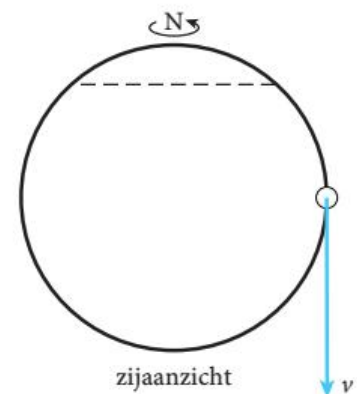
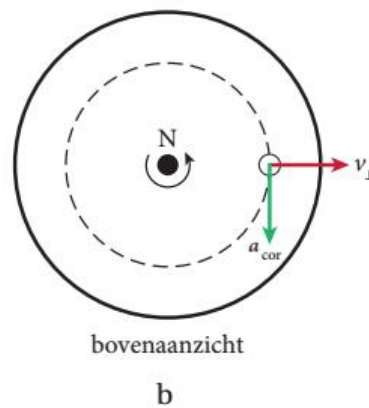
- De richting loodrecht het papier in geef je aan met een kruisje.
- De richting loodrecht het papier uit geef je aan met een dikke stip.

Ligt de richting van je fietssnelheid niet in het vlak, dan is v_N gelijk aan $v_{\perp}$, de component van je fietssnelheid in het draaivlak. Zie figuur 31a. De richting van a_{cor} langs het aardoppervlak is in deze figuur het papier uit. Daarom zie je een dikke groene stip. Vergelijk figuur 31 met figuur 30.

Steek je de evenaar over, dan is de component van v gelijk aan 0 en is er geen coriolisversnelling door je fietssnelheid v . Zie figuur 32.



Figuur 31



Figuur 32

Voor de grootte van de coriolisversnelling op aarde geldt dus:

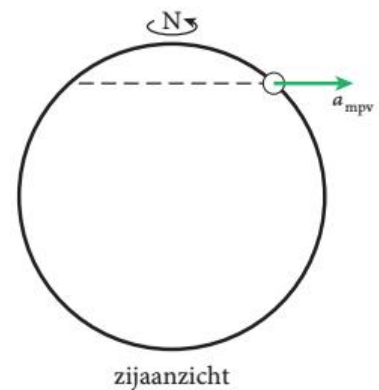
$$a_{\text{cor}} = 2\omega \cdot v_{\perp} \text{ of } a_{\text{cor}} = 2\omega \cdot v$$

- a_{cor} is de coriolisversnelling op aarde in m s^{-2} .
- ω is de hoeksnelheid van de aarde, $7,27 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$.
- $v_{\perp}$ is de component van de snelheid van het voorwerp in het vlak loodrecht op de draaias in m s^{-1} .
- v is de snelheid van het voorwerp in het vlak loodrecht op de draaias in m s^{-1} .

De richting van de coriolisversnelling is loodrecht op de snelheid in het draaivlak.

Middelpuntvliedende versnelling

De richting van de middelpuntvliedende versnelling ligt op de straal van het vlak loodrecht op de draaias en is naar buiten gericht. Zie figuur 33. Het maakt daarbij niet uit in welke richting een voorwerp beweegt.

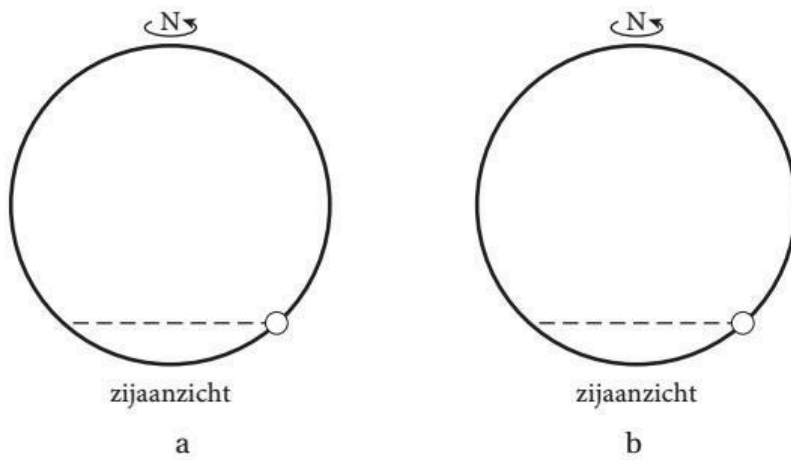


Figuur 33

Voorbeeld

In figuur 34 zie je een zijaanzicht van de aarde. In figuur 34a beweegt een bolvormig voorwerp richting de zuidpool.

- a Geef in figuur 34a de richtingen aan van v , van $v_{\perp}$ en van a_{cor} .



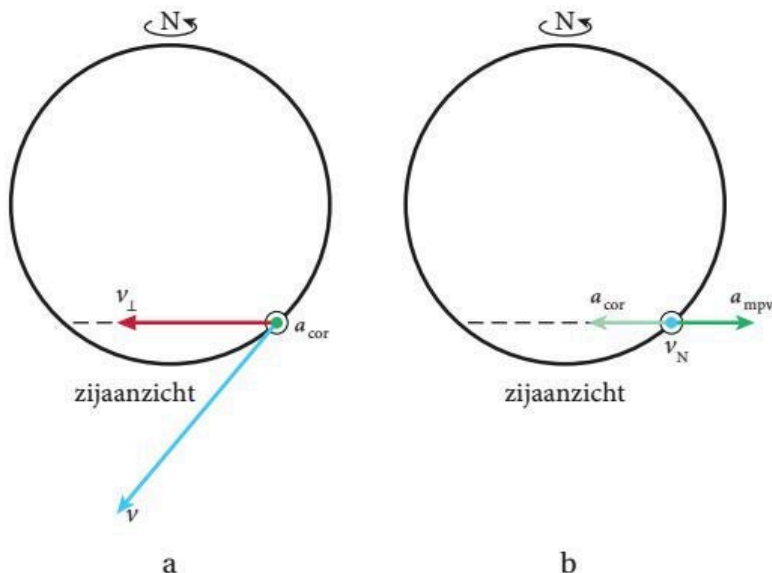
Figuur 34

In figuur 34b beweegt het voorwerp van oost naar west in plaats van richting de zuidpool.

- b Geef in figuur 34b de richtingen aan van v , van v_N , van a_{cor} en a_{mpv} .

Uitwerking

- a Zie figuur 35a.
b Zie figuur 35b.



Figuur 35

Voor de grootte van de middelpuntvliedende versnelling op aarde geldt:

$$a_{\text{mpv}} = \omega^2 \cdot r$$

- a_{mpv} is de middelpuntvliedende versnelling op aarde in m s^{-2} .
- ω is de hoeksnelheid van de aarde, $7,27 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$.
- r is de afstand tot de draaias van het voorwerp in het vlak loodrecht op de draaias.

De richting van de middelpuntvliedende versnelling is van de aarde af gericht en ligt in het verlengde van de straal van het vlak loodrecht op de draaias.

Ook als een voorwerp stilstaat op aarde en dus meedraait met de aarde is er een middelpuntvliedende versnelling.

Aan de evenaar is de middelpuntvliedende versnelling maximaal en bij de polen gelijk aan nul.

Corioliseffect en luchtstromen

Het corioliseffect wordt soms corioliskracht genoemd, maar dit is niet correct. Het is een schijnkracht. Er is namelijk geen voorwerp dat deze kracht uitoefent, en er is dus geen sprake van een wisselwerking.

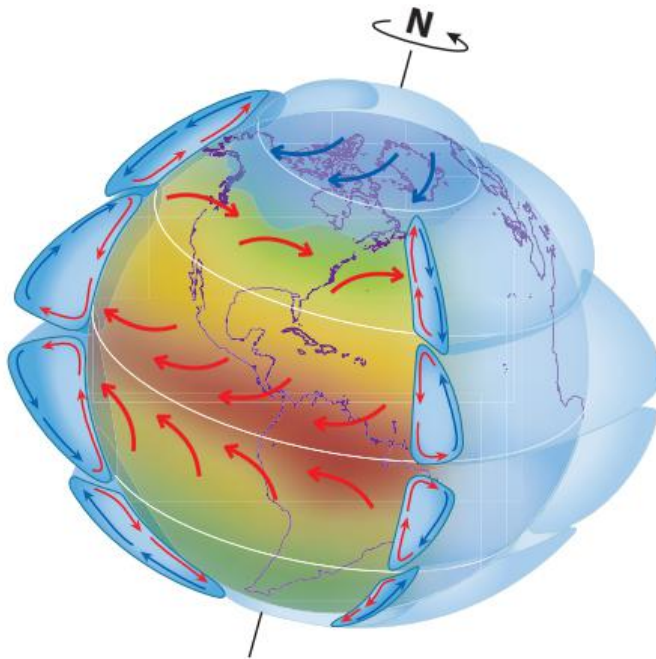
Door de kleine waarde van ω is het corioliseffect vaak erg klein. Voor voorwerpen die over grote afstanden reizen, en dus lang onderweg zijn, bouwt de voortdurende coriolisversnelling onderweg wel op tot een steeds groter effect. Dit is bijvoorbeeld het geval bij luchtstromen op aarde.

Rond de evenaar wordt lucht sterk verwarmd, waardoor er stijgende luchtstromen ontstaan. Hierdoor gaat op de aarde de lucht ten noorden en ten zuiden van de evenaar naar de evenaar toe stromen. Deze luchtstroom heet de **passaat**. Op het noordelijk halfrond waait de passaat van noord naar zuid, maar daarbij krijgt hij een afwijking naar rechts. De passaat op het noordelijk halfrond komt daardoor uit het noordoosten. Op het zuidelijk halfrond waait de passaat uit het zuiden, met een afwijking naar links. Zie figuur 36.

Rond de pool speelt een vergelijkbaar effect. Afkoeling zorgt voor dalende lucht boven de pool, waardoor lucht van de pool af stroomt. Het corioliseffect geeft weer een afbuiging aan de luchtstroom, waardoor rond de noordpool uiteindelijk een oostenwind waait. Zie figuur 36.

Op de gematigde breedten draait de wind als een tandwiel tussen de luchtstromen rond de pool en de evenaar in. De wind stroomt hier juist van zuid naar noord, maar het corioliseffect zorgt voor een afwijking naar rechts. Hierdoor is zuidwest de dominante windrichting in Nederland.

Het corioliseffect heeft ook invloed op de windrichting rondom hoge- en lagedrukgebieden. Dit komt aan de orde in opgave 16.



Figuur 36

Middelpuntvliedend effect

De middelpuntvliedende versnelling is $a_{\text{mpv}} = \omega^2 \cdot r$.

Met $v = \omega \cdot r$ leid je af dat ook geldt $a_{\text{mpv}} = \frac{v^2}{r}$.

De middelpuntvliedende versnelling heeft dus dezelfde grootte als de middelpuntzoekende versnelling. De middelpuntzoekende versnelling is de versnelling die nodig is om een voorwerp een eenparige cirkelbeweging te laten maken. Deze versnelling is naar het middelpunt toe gericht. Daarvoor is een middelpuntzoekende kracht nodig. Is die kracht te klein, dan vliegen voorwerpen uit de bocht. Voor een waarnemer die meedraait in een cirkelbeweging lijkt het alsof voorwerpen die uit de bocht vliegen een naar buiten gerichte versnelling ondergaan. Maar dit effect ontstaat dus doordat de waarnemer zelf draait. Dit effect wordt wel eens middelpuntvliedende kracht genoemd. Het middelpuntvliedend effect is echter weer een schijnkracht, want er is geen voorwerp dat deze kracht uitoefent.

De middelpuntvliedende versnelling is van de aardas af gericht. Hierdoor beweegt materie van de aardas af. Omdat de aarde grotendeels uit de vervormbare aardmantel bestaat, is een deel van de aardmassa door het draaien verplaatst richting de evenaar, van de pool af. Hierdoor is de aarde niet bolvormig, maar een beetje afgeplat.

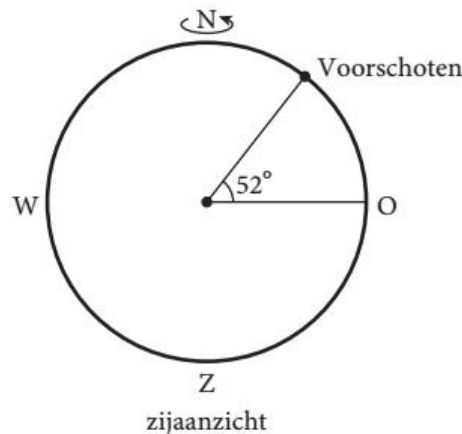
Door deze afplatting zijn voorwerpen op de pool ietsje dichterbij het centrum van de aarde, en is de valversnelling aan de pool ietsje groter dan aan de evenaar. Dat zorgt er weer voor dat de aarde aan de pool iets harder wordt samengedrukt dan aan de evenaar, wat de afplatting verder versterkt. In de volgende paragraaf lees je meer over variaties in de valversnelling op aarde.

Opgaven

- **tekenblad** 12 Arjan woont in Voorschoten. Voorschoten ligt in de buurt van Leiden op ongeveer 52° noorderbreedte. Zie figuur 37.

a Bereken de baansnelheid van Arjan.

De coriolisversnelling van bewegende voorwerpen is afhankelijk van de richting waarin het voorwerp beweegt. Arjan rijdt in een auto met een snelheid van 30 m s^{-1} naar het zuiden. Elise rijdt met een snelheid van 30 m s^{-1} naar het oosten.



Figuur 37

b Leg uit dat de coriolisversnelling op de auto van Arjan kleiner is dan de coriolisversnelling op de auto van Elise.

De coriolisversnelling op de auto van Arjan is langs het aardoppervlak gericht. De coriolisversnelling op de auto van Elise kun je ontbinden in een component langs het aardoppervlak en een component loodrecht op het aardoppervlak.

c Ga na of de loodrechte component omhoog of omlaag is gericht.

Voor de component van de coriolisversnelling langs het aardoppervlak geldt in beide gevallen $a_{\text{cor}} = 2\omega \cdot v \cdot \sin(B)$. Hierin is B de breedtegraad.

d Toon dit aan voor zowel Arjan als Elise.

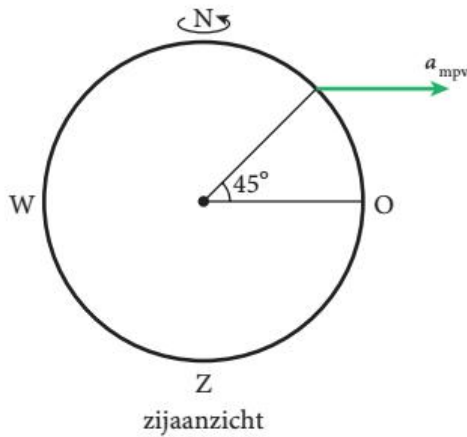
e Bereken voor Arjan de component van de coriolisversnelling langs het aardoppervlak.

- **tekenblad** 13 Op voorwerpen op aarde werkt een middelpuntvliedende versnelling.

a Bereken de middelpuntvliedende versnelling aan de evenaar.

Aan de evenaar wijst de middelpuntvliedende versnelling van het middelpunt van de aarde af. Voor een plaats op 45° noorderbreedte is de grootte en de richting van de middelpuntvliedende versnelling gegeven in figuur 38. Deze versnelling kun je ontbinden in een component loodrecht op het aardoppervlak en een component evenwijdig aan het aardoppervlak.

b Laat zien dat de component evenwijdig aan het aardoppervlak ongeveer 0,17% van de valversnelling bedraagt.



Figuur 38

Je zou nu kunnen denken dat voorwerpen op het noordelijk halfrond niet loodrecht naar de grond vallen, maar een klein stukje naar het zuiden in de richting van de component evenwijdig aan het aardoppervlak. De aarde zelf is echter vervormbaar. Het aardoppervlak staat daarom niet loodrecht op de verbindinglijn met het middelpunt van de aarde. De hoek tussen de raaklijn aan de aarde en die verbindinglijn is daardoor iets groter dan 90° . Richting de evenaar neemt het hellingspercentage van de raaklijn gemiddeld toe in de ordegrrootte van 0,1%.

- c Schat op basis van deze gegevens de ordegrrootte van het verschil tussen de afstand van het middelpunt van de aarde tot de pool, en de afstand van het middelpunt van de aarde tot de evenaar.

- 14 Door het corioliseffect krijgen bewegende voorwerpen op de draaiende aarde een zijwaartse versnelling langs het aardoppervlak.

- a Beredeneer waar die zijwaartse versnelling het grootst zal zijn:

- tussen 0° en 30° noorderbreedte,
- tussen 30° en 60° noorderbreedte,
- tussen 60° en 90° noorderbreedte.

Door het corioliseffect lijkt de richting van de snelheid te veranderen. Volgens de formule geldt voor de coriolisversnelling $a_{\text{cor}} = 2\omega \cdot v \cdot \sin(B)$.

Met $\omega = \frac{2\pi}{T}$ volgt hieruit:

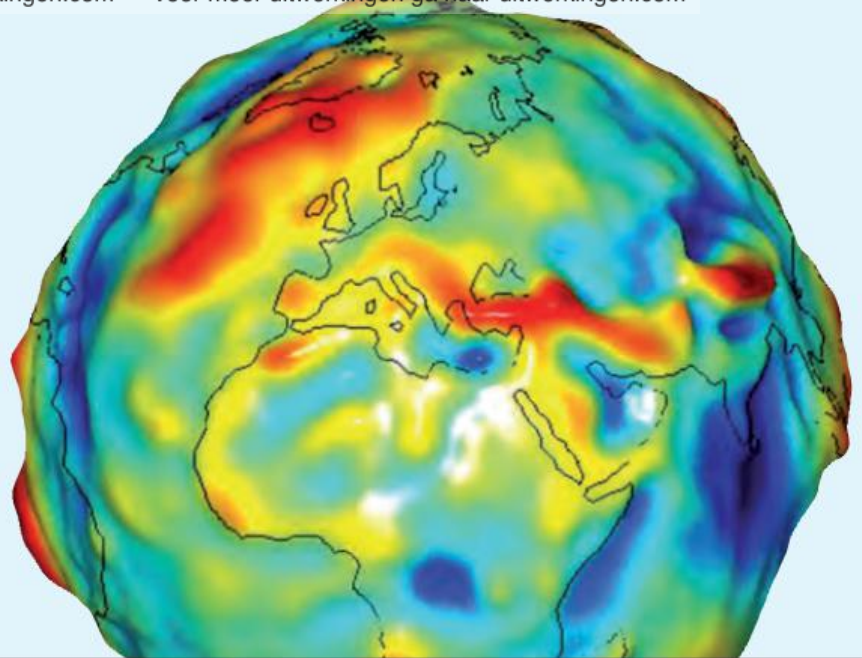
$$a_{\text{cor}} = \frac{4\pi v}{T} \cdot \sin(B)$$

- a_{cor} is de coriolisversnelling in m s^{-2} .
- v is de snelheid van het bewegende voorwerp in m s^{-1} .
- T is de rotatietijd van de aarde in s.
- B is de breedtegraad van de plaats op aarde in graden.

Het water in een leeglopende badkuip gaat rond de afvoer draaien. Friso beweert dat dit komt door het corioliseffect. Nederland ligt op 53° noorderbreedte.

- b Maak een schatting van de zijwaartse snelheidscomponent die het water krijgt door het corioliseffect. Ga uit van een watersnelheid van $1,0 \text{ m s}^{-1}$.

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 40

4 Valversnelling

Zwaartekracht en gravitatiekracht

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

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

- F_g is de gravitatiekracht in N.
- G is de gravitatieconstante in $\text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$.
- 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:

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

- F_{zw} is de zwaartekracht in N.
- 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 valversnelling in m s^{-2} .
- G is de gravitatieconstante in $\text{N m}^2 \text{kg}^{-2}$.
- M is de massa van het hemellichaam in kg .
- R is de straal van het hemellichaam in m .

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

Vormcorrectie

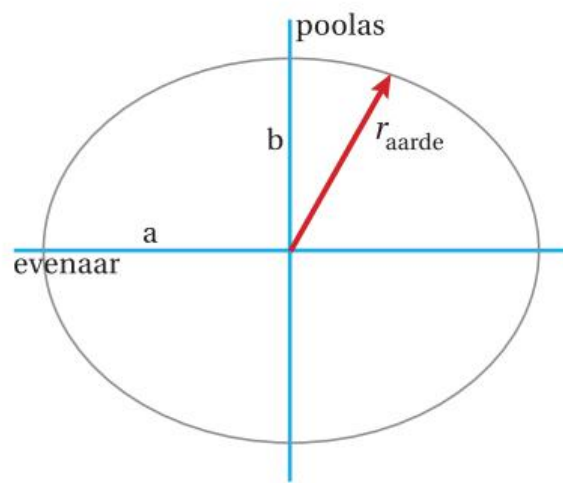
Als je uitgaat van een niet draaiende bol, dan geldt aan het aardoppervlak $R = R_{\text{aarde}}$ en $M = M_{\text{aarde}}$. Met de formule voor de valversnelling en gegevens in BINAS tabel 31, waarbij je voor R de gemiddelde waarde 6371 km neemt, bereken je $g = 9,819 \text{ m s}^{-2}$. Deze waarde is iets groter dan de $9,81 \text{ m s}^{-2}$ die je gebruikt in Nederland.

De aarde draait echter wel. Een bewoner aan de evenaar heeft een middelpuntzoekende versnelling nodig om in zijn baan te blijven, een poolbewoner niet. De berekening in vraag 13a laat zien dat het verschil $0,034 \text{ m s}^{-2}$ is. De valversnelling aan de evenaar is echter $0,052 \text{ m s}^{-2}$ kleiner dan aan de pool. Dat komt doordat de aarde, mede door het draaien, 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 41.

Door het draaien en de afwijking van de bolvorm is de valversnelling op iedere breedte anders. Deze valversnelling noem je de **lokale valversnelling**.



Figuur 41

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 $r = R_{\text{aarde}} + h$.

Ben je verder van de aarde af, dan neemt r toe en de valversnelling daardoor af.

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

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

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

De verhouding tussen de straal van de aarde en de hoogte boven de aarde bepaalt de hoogtecorrectie op de valversnelling. De vuistregel is dat elke 10 km hoogtetoename de valversnelling 0,31% kleiner wordt.

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 **hoogtecorrectie op een berg** staat bekend als de **Bouguercorrectie**. Er geldt bij benadering:

$$\Delta g_B = 2\pi\rho \cdot G \cdot h$$

- Δg_B is de hoogtecorrectie op de valversnelling in ms^{-2} .
- ρ is de dichtheid van de berg in kg m^{-3} .
- G is de gravitatieconstante in $\text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$.
- 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 40 op pagina 40 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.

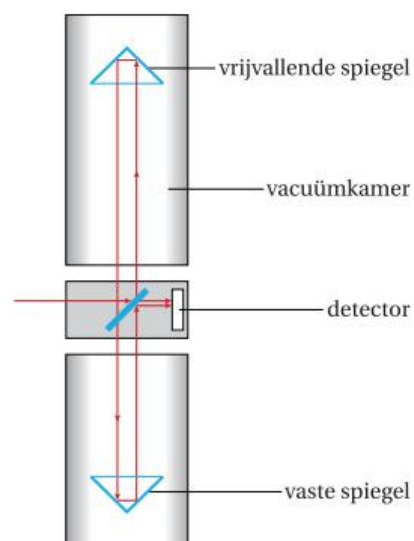
Een absolute gravimeter meet g met behulp van een vallend voorwerp. Die komt in opgave 19 aan de orde.

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 20.

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

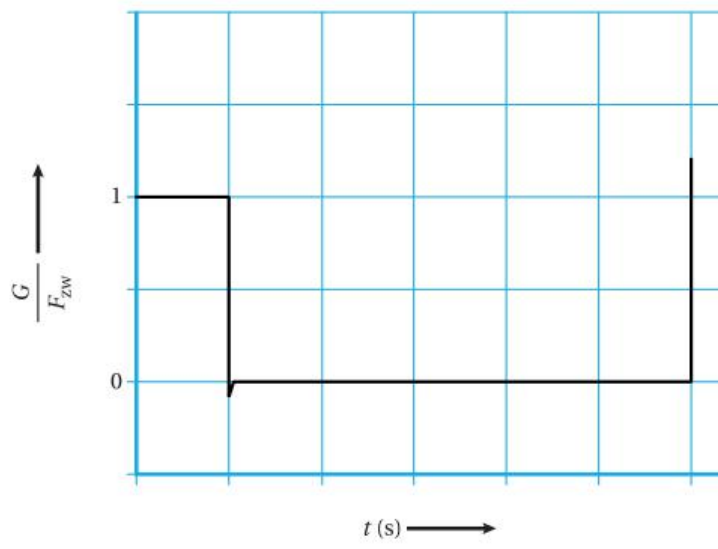
Opgaven

- 17 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 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 steeds blijft toenemen.
- 18 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.
- 19 In figuur 42 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. 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 42

- 20 Een relatieve gravimeter bestaat uit een massa en een veer. De veerconstante van de veer is $39,20 \text{ N m}^{-1}$. De massa is $1,000 \text{ kg}$.
- 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.
- 21 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 43 zie je van een experiment een diagram met daarin het genormaliseerde gewicht van de capsule $\frac{G}{F_{zw}}$ tegen de tijd.



Figuur 43

- Zie je in figuur 43 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.

Op zee zien alle richtingen er hetzelfde uit. Om het noorden te vinden maken zeelui 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 44

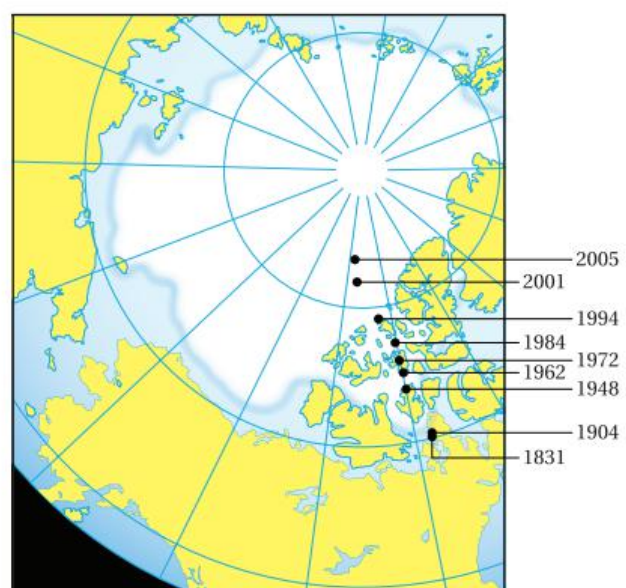
5 Aardmagnetisme

Richting en grootte van het aardmagnetisch veld

De aarde draait om zijn noord-zuidas. De plaatsen waar die as de aarde snijdt, noem je de **geografische noordpool** en de **geografische zuidpool**. Een **kompas** zoals in figuur 44, 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 45 geven de posities van de magnetische zuidpool in de laatste tweehonderd jaar aan. Met een snelheid van ongeveer 5 km per jaar beweegt de magnetische zuidpool zich nu in de richting van de geografische noordpool.

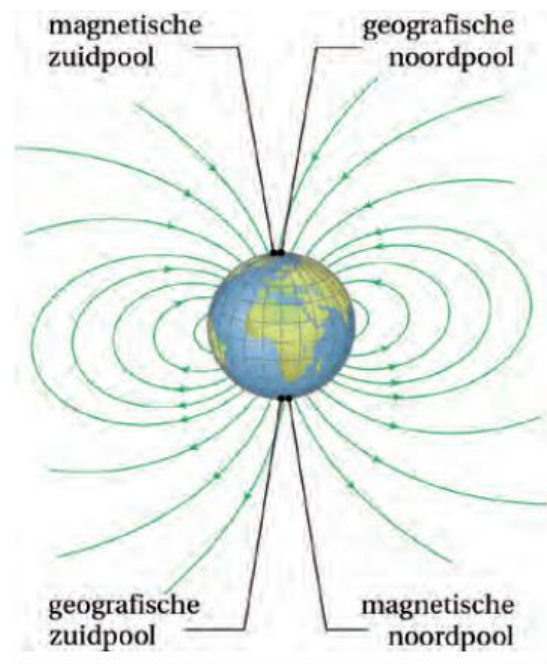


Figuur 45

De **magnetische zuidpool** 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.

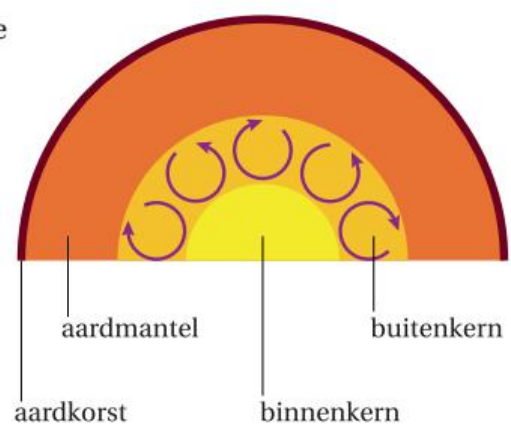
In figuur 46 zie je het veldlijnenpatroon in de buurt van het aardoppervlak. De magnetische veldlijnen staan dus niet loodrecht op het aardoppervlak. De raaklijn aan de veldlijn in een punt van het aardoppervlak geeft de richting aan waarin een vrij draaibare naaldmagneet wijst. In het horizontale vlak, 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 46

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 47. Deze beweging is vergelijkbaar met de convectiestromen in de aardmantel.



Figuur 47

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 zijn as bij aan het aardmagnetisch veld.

Metingen aan het aardmagnetisch veld

De richting van het aardmagnetisch veld meet je met een **kompas**. 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 deeltjes van de zon

Vanaf de zon komen geladen deeltjes met een hoge energie op ons af. Deze deeltjes samen noem je de **zonnewind**. Door die hoge energie is de zonnewind schadelijk voor planten, dieren en mensen. Geladen deeltjes die in het aardmagnetisch veld bewegen, ondervinden een lorentzkracht waardoor ze worden afgebogen in de richting van de polen. Het grootste gedeelte van de zonnewind beweegt daardoor langs de aarde heen.

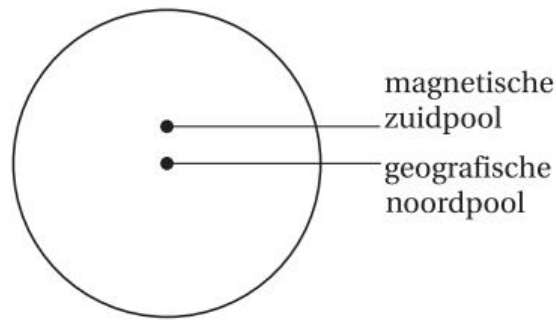
Rond de polen komen de deeltjes toch in de atmosfeer terecht. Ze botsen daar tegen de moleculen in de lucht, waardoor het **noorderlicht** kan ontstaan. Zie figuur 48.



Figuur 48

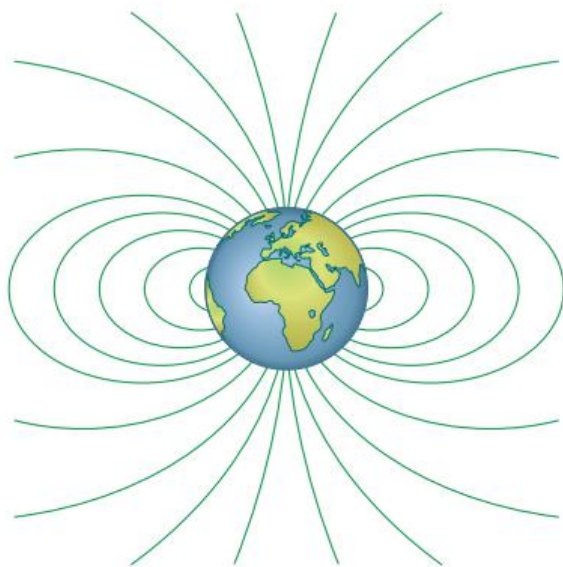
Opgaven

- **tekenblad** 22 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 49 zie je een bovenaanzicht van de aarde.
- Geef in figuur 49 de positie(s) aan waar de declinatie 0° is.
 - Geef in figuur 49 de positie(s) aan waar de declinatie 90° is.

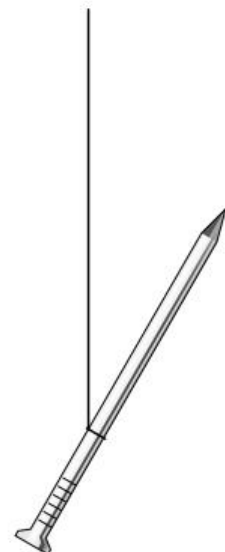


Figuur 49

- **tekenblad** 23 In figuur 50 zie je de veldlijnen van het aardmagnetisch veld.



Figuur 50



Figuur 51

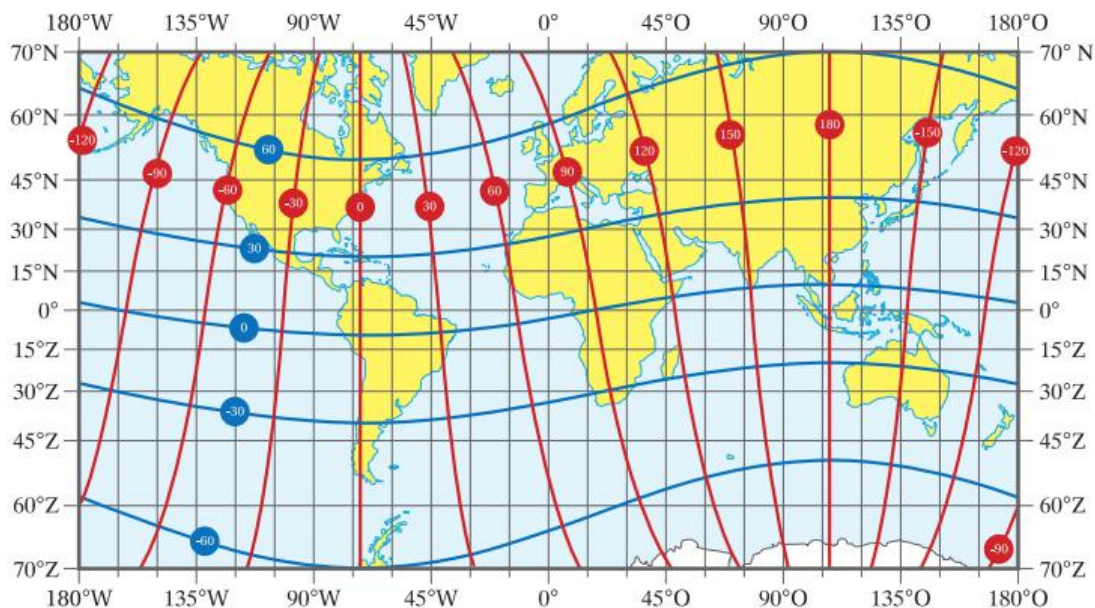
- Geef in figuur 50 met pijlpunten de richting van het aardmagnetisch veld aan.
- Draait een kompasnaald om bij het passeren van de evenaar? Leg je antwoord uit. Ignaz maakt een spijker magnetisch en hangt hem aan zijn zwaartepunt op. Wat Ignaz ook probeert, de spijker neemt steeds de stand van figuur 51 in. 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.

24 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.

25 In figuur 52 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 in de noordpool en in de zuidpool.

- Leg dit uit.



Figuur 52

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

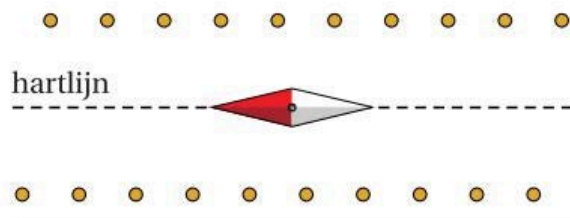
- Leg uit waar de geomagnetische meridianen bij elkaar komen.

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

26 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 53. De rode punt van de naaldmagneet wijst naar het geografische noorden.



Figuur 53

Vervolgens sluit je de spoel aan op een variabele spanningsbron. 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.

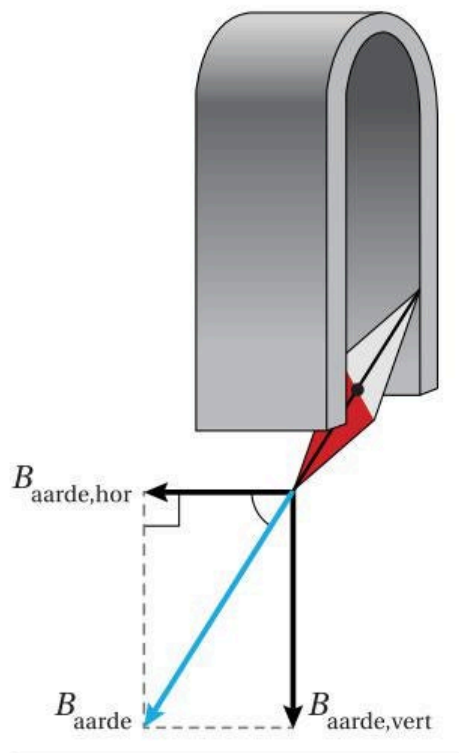
Als de stroomsterkte 115 mA is, blijkt dat de naaldmagneet elke willekeurig stand kan innemen zonder dat die stand verandert.

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 54. 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 54 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 54

6 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.

De aarde draait in 24 uur om zijn as. Omdat de grootte van de draaicirkel afhangt van de breedte waarop je je bevindt, hebben niet alle aardbewoners dezelfde baansnelheid. Ze leggen wel in 24 uur een rondje van 2π radialen af, en hebben daardoor dezelfde hoeksnelheid.

Waarnemers op aarde draaien met de aarde mee. Als een waarnemer op de draaiende aarde een bewegend voorwerp bestudeert, ziet hij versnellingen ten gevolge van zijn eigen draaibeweging. Dit komt doordat een voorwerp gaat naar een plek waar de draaisnelheid van de aarde een andere grootte en/of richting heeft. Daardoor lijken bewegende voorwerpen een zijwaartse versnelling te krijgen. Dit heet het corioliseffect. Op het noordelijk halfrond krijgen bewegende voorwerpen een afwijking naar rechts, op het zuidelijk halfrond naar links.

Alle voorwerpen, ook als ze niet bewegen, ondervinden volgens waarnemers op de draaiende aarde een middelpuntvliedend effect. Dit komt doordat er een middelpuntzoekende kracht nodig is om ze met de aarde mee te laten draaien, maar een meedraaiende waarnemer interpreteert een gebrek aan middelpuntzoekende versnelling als een effect in tegenovergestelde richting.

Het corioliseffect beïnvloedt de verplaatsingen van lucht en water over het aardoppervlak. Door het middelpuntvliedende effect verplaatst massa zich van de pool richting de evenaar. Daardoor heeft de aarde de vorm van een afgeplatte bol.

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 verwijdt.

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 daardoor grotendeels langs de aarde.

Gegevens die betrekking hebben op dit katern

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

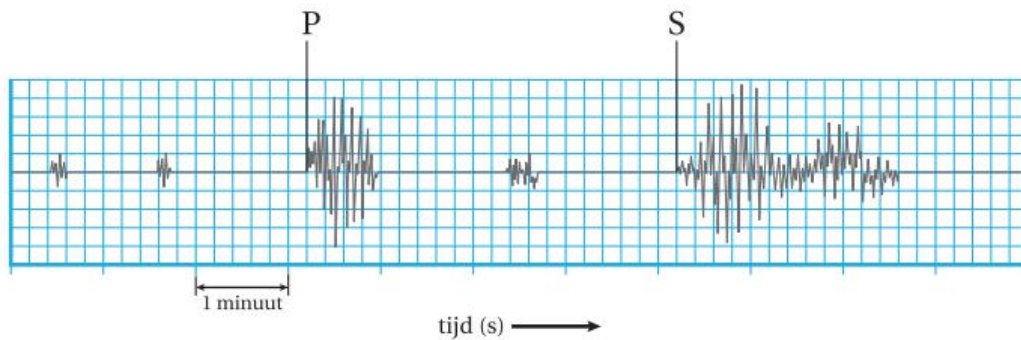
terugkaatsingswet	$\angle i = \angle t$
brekingswet van Huygens	$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{v_1}{v_2} = n_{1 \rightarrow 2}$
magnitudeschaal van Richter	$M = \log \frac{A}{A_0(D)}$ $M = \log A - \log A_0(D)$
afstand tussen hypocentrum en meetstation	$s \approx 8 \cdot \Delta t$
hoeksnelheid	$\omega = \frac{2\pi}{T}$
baansnelheid	$v = \frac{2\pi r}{T}$ en $v = \omega \cdot r$
coriolisversnelling	$a_{\text{cor}} = 2\omega \cdot v_{\perp}$
middelpuntvliedende versnelling	$a_{\text{mpv}} = \omega \cdot r^2$
gravitatiekracht	$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$
zwaartekracht	$F_{\text{zw}} = m \cdot g$
hoogtecorrectie in de lucht	$\Delta g_h = -2g \cdot \frac{h}{R_{\text{aarde}}}$
hoogtecorrectie op een berg	$\Delta g_B = 2\pi\rho \cdot G \cdot h$

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

- **tekenblad** 27 Figuur 55 laat een seismogram zien van de trillingen ten gevolge van de P- en S-golven van een aardbeving in Griekenland.
- **hulpblad**

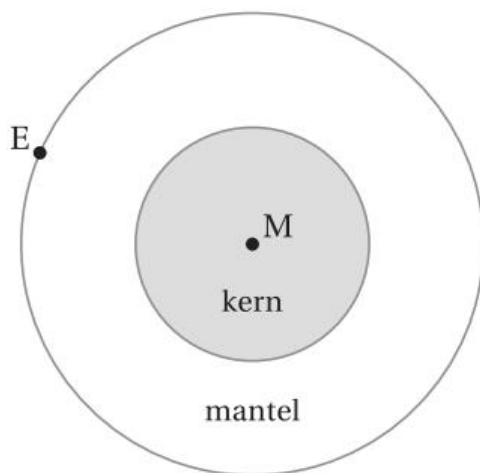


Figuur 55

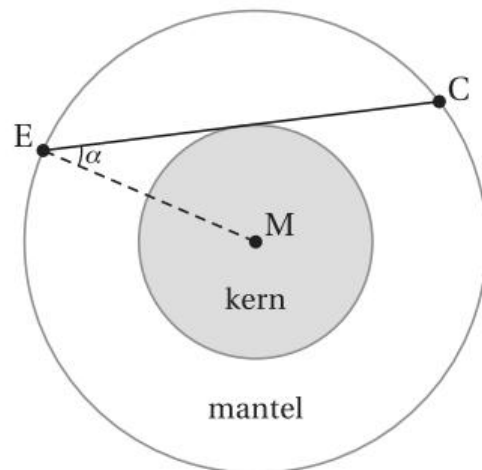
Het seismogram van figuur 55 is opgenomen in De Bilt. Neem aan dat de golven tussen Griekenland en De Bilt zich rechtlijnig door de mantel hebben voortgeplant. In de mantel hebben de P-golven een voortplantingssnelheid $v_p = 6,2 \text{ km s}^{-1}$, terwijl de S-golven een snelheid $v_s = 3,5 \text{ km s}^{-1}$ hebben.

- a Bepaal met behulp van figuur 55 de afstand tussen De Bilt en het epicentrum in Griekenland.

In deze opgave vat je de aarde op als een bol die bestaat uit een mantel van gesteenten om een vloeibare kern. Zie figuur 56. Hierin is M het middelpunt van de aarde en E het epicentrum van een aardbeving.



Figuur 56



Figuur 57

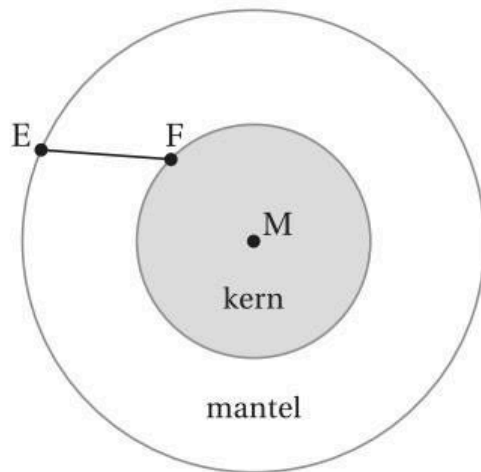
In de mantel planten zich zowel longitudinale als transversale golven voort. Door de kern lopen alleen longitudinale golven. In figuur 57 is vanuit het epicentrum E een raaklijn getekend aan de vloeibare kern. De hoek tussen deze raaklijn en de lijn EM noem je α . Hoek α wordt bepaald door de seismogrammen van een groot aantal waarnemingsstations over de hele aarde met elkaar te vergelijken.

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

Een deel van de P-golven gaat bij F de kern binnen. Zie figuur 58. De richting van de golven verandert hierbij volgens de brekingswet van Huygens.

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.

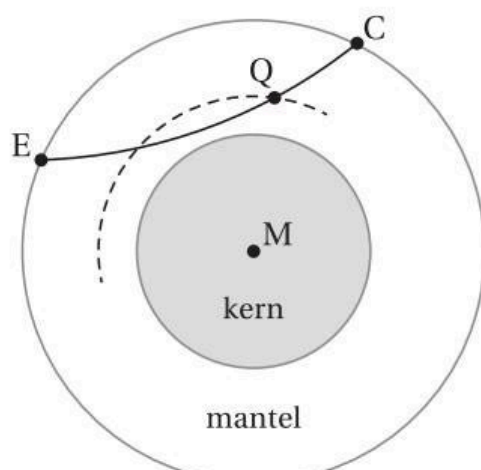
c Teken in figuur 58 hoe de P-golven vanaf F verder gaan tot aan het aardoppervlak.



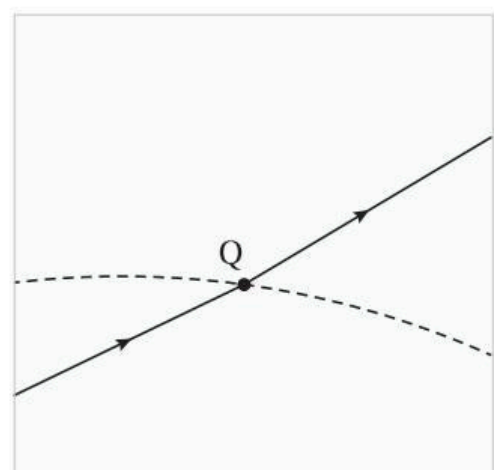
Figuur 58

In werkelijkheid volgen de golven in de mantel geen rechte lijn. Ze buigen af naar het oppervlak toe. In figuur 59 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 59 is zo'n grensvlak tussen twee lagen met een gestreepte lijn aangegeven. Een uitvergroting van figuur 59 zie je in figuur 60.

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



Figuur 59



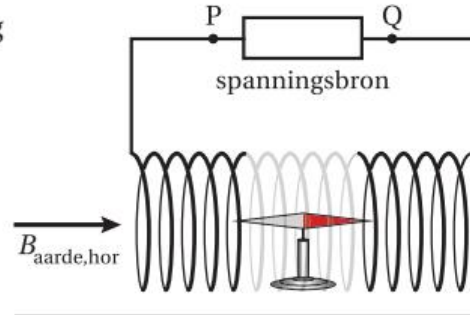
Figuur 60

► hulpblad

- 28 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 61. Ze stuurt een elektrische stroom door de spoel. De stroom in de spoel is zó gericht dat de richting van het magnetisch veld van de spoel tegengesteld is aan de richting van $B_{\text{aarde,hor}}$.



Figuur 61

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

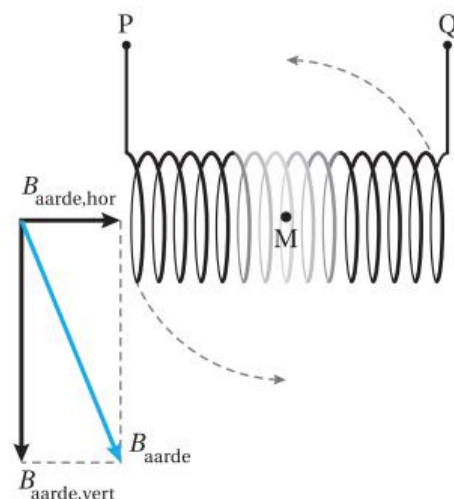
$$B_{\text{spoel}} = 1,2 \times 10^{-6} \cdot \frac{N \cdot I}{\ell}$$

- B_{spoel} is de magnetische inductie in T.
 - 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.

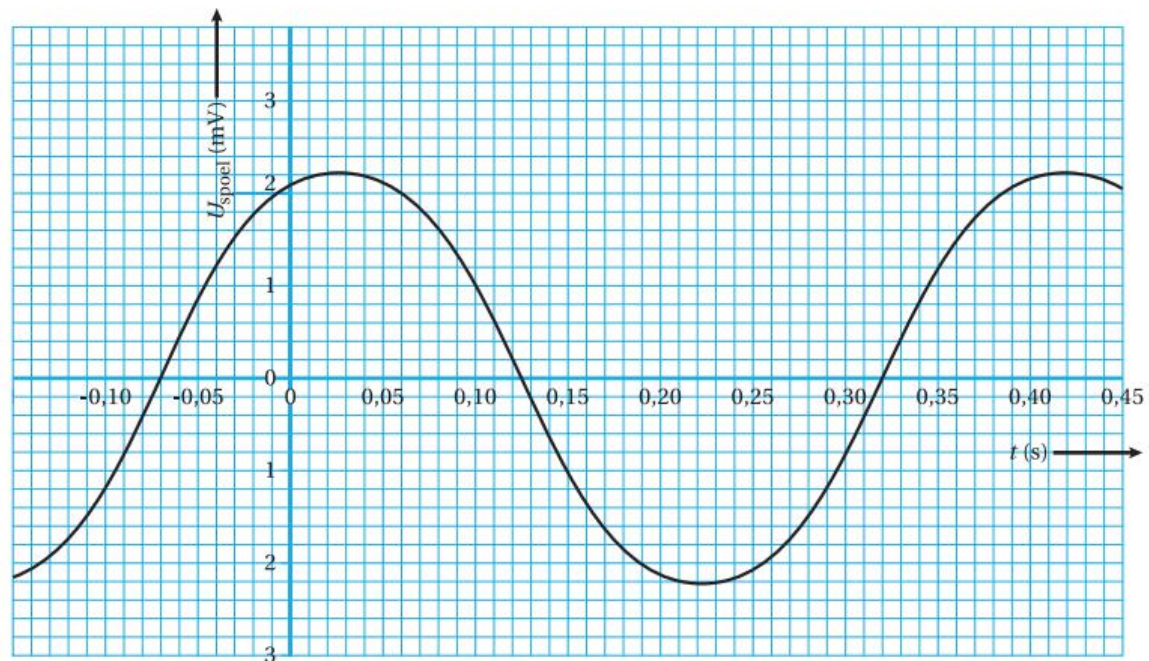
Ze verwijdert de spanningsbron en de kompasnaald en verbindt de uiteinden P en Q van de spoel met een oscilloscoop. Ze laat de spoel vervolgens vanuit de getekende stand enkele malen met constante snelheid draaien in een verticaal vlak rond punt M. De draairichting is in figuur 62 aangegeven. Tussen de uiteinden P en Q ontstaat tijdens het draaien een inductiespanning U_{spoel} die in figuur 63 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 62 getekende stand.

- d Bereken de grootte van het aardmagnetisch veld.



Figuur 62

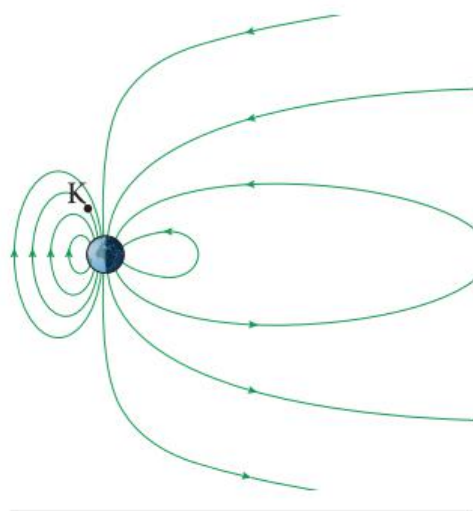


Figuur 63

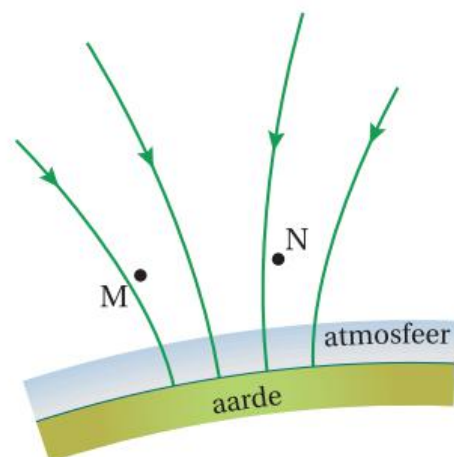
Het magnetisch veld van de aarde strekt zich tot ver in de ruimte uit. Zie figuur 64. Protonen, afkomstig uit de zon, kunnen soms diep doordringen in dit veld. Hierbij kunnen allerlei lichtverschijnselen ontstaan.

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 64



Figuur 65

In figuur 65 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 65 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.

Leerdoelen

Hierna vind je een overzicht van de leerdoelen per paragraaf. Ga voor jezelf na of je de leerdoelen beheerst. Geef aan met welke leerdoelen je nog moeite hebt en wat je hiermee gaat doen.

Paragraaf 1 Inwendige van de aarde

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: aardkorst, aardmantel, buitenmantel, magma, vulkanisme, binnenmantel, aardkern, buitenkern, binnenkern, convectiestromingen, aardmagnetisch veld, seismiek, reflectie, breking, absorptie, geofon, seismogram	☐	
beschrijven hoe het inwendige van de aarde opgebouwd is uit vijf lagen	☐	
beschrijven hoe warmtetransport vanuit de aardkern zorgt voor convectiestromingen in de aardmantel	☐	
beschrijven hoe met seismiek informatie over diepere lagen in de aarde wordt verzameld	☐	
berekeningen maken en beredeneren met de formule van Huygens: $\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{v_1}{v_2} = n_{1 \rightarrow 2}$	☐	

Paragraaf 2 Bewegingen van de aarde

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: platen, aardbeving, ruimtegolven, primaire golven (P-golven), secundaire golven (S-golven), oppervlaktegolven, seismograaf, epicentrum, hypocentrum, schaal van Richter	☐	
beschrijven hoe aardbevingsgolven ontstaan	☐	
beschrijven hoe aardbevingsgolven zich voortplanten in de aarde	☐	
beschrijven hoe aardbevingsgolven worden geregistreerd	☐	
aangeven dat de schaal van Richter een logaritmische schaal is	☐	
berekeningen maken en beredeneren met de vuistregel voor het bepalen van de afstand tot het epicentrum en met de formule voor magnitude: $M = \log \frac{A}{A_0(D)}$, $M = \log A - \log A_0(D)$, $s \approx 8 \cdot \Delta t$	☐	

Paragraaf 3 De draaiende aarde

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: hoeksnelheid, baansnelheid, coriolisversnelling, middelpuntvliedende versnelling, corioliseffect, middelpuntvliedend effect, passaat	☐	
beschrijven dat in een draaiend systeem drie factoren bijdragen aan de versnelling	☐	
beschrijven hoe luchtstromen afwijken richting de evenaar en vanuit de polen	☐	
beschrijven hoe het middelpuntvliedend effect zorgt voor afplatting van de aarde	☐	
berekeningen maken en beredeneren met de formules voor de hoeksnelheid, baansnelheid, coriolisversnelling, middelpuntvliedende versnelling: $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $v = \frac{2\pi r}{T}$, $v = \omega \cdot r$, $a_{\text{cor}} = 2\omega \cdot v_{\perp}$, $a_{\text{mpv}} = \omega \cdot r^2$	☐	

Paragraaf 4 Valversnelling

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: gravitatiekracht, zwaartekracht, (lokale) valversnelling, vormcorrectie, hoogtecorrectie, Bouguercorrectie, gravimeter	☐	
berekeningen maken en beredeneren met de formules voor de gravitatiekracht, zwaartekracht, hoogtecorrectie in de lucht, hoogtecorrectie op een berg: $F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$, $F_{\text{zw}} = m \cdot g$, $\Delta g_h = -2g \cdot \frac{h}{R_{\text{aarde}}}$, $\Delta g_B = 2\pi\rho \cdot G \cdot h$	☐	

Paragraaf 5 Aardmagnetisme

Ik kan		Acties
de volgende begrippen beschrijven en toepassen: geografische noord- en zuidpool, kompas, magnetische noord- en zuidpool, inclinatiehoek, magnetometer, zonnewind, noorderlicht	☐	
beschrijven wat het verschil is tussen de geografische noord- en zuidpool respectievelijk de magnetische noord- en zuidpool	☐	
beschrijven hoe aardmagnetisme ontstaat	☐	
beschrijven hoe het magnetisch veld van de aarde bescherming biedt tegen de zonnewind	☐	

