

Hoe meet je de beweging van de aarde?

Dagelijks vinden er in de wereld aardbevingen plaats. De meeste voel je niet of nauwelijks, andere hebben verstrekkende gevolgen. Aardbevingen voorspellen kan helaas (nog) niet, wel leveren ze waardevolle informatie over wat er diep onder onze voeten in de aarde gebeurt. Seismologen zoals Hanneke Paulssen maken dankbaar gebruik van de informatie die de aarde ons geeft.



Hanneke Paulssen is onderzoeker en docent aan de faculteit aardwetenschappen van de Universiteit Utrecht. In de botanische tuin aan de overkant van de straat meet een seismometer 24/7 de bewegingen van de aarde. De uiterst gevoelige apparatuur registreert bevingen van over de hele wereld. Tijdens ons gesprek zijn deze zichtbaar als golvende lijntjes op Paulssens beeldscherm. Door de metingen van meerdere stations te combineren, kun je veel leren over het binnenste van de aarde.

De schaal van ...

Hoe leg je de kracht van een aardbeving vast? In de loop der tijden zijn er verschillende schalen ontwikkeld om aardbevingen te beschrijven.

Schaal van Mercalli

“Een van de eerste schalen stamt uit Italië”, vertelt Paulssen, “een gebied waar de aarde vaak beweegt. Rond 1900 ontwikkelde de Italiaan Giuseppe Mercalli een schaal om de sterkte van een aardbeving uit te drukken. Hij deed dit aan de hand van de hoeveelheid schade die een beving aanricht. De schaal van Mercalli wordt aangeduid met Romeinse cijfers en loopt van I (niet voelbaar, alleen door seismografen geregistreerd) tot XII (algehele verwoesting). De kracht van een beving bepaalde hij aan de hand van de veroorzaakte schade en ooggetuigenverslagen.”

Schaal van Richter

Zo'n dertig jaar later ontwikkelde Charles Richter een meer wiskundige beschrijving voor de kracht van een aardbeving. Als inwoner van Californië werd ook hij regelmatig met bevingen geconfronteerd. Aan de hand van seismografische metingen stelde hij de volgende formule op:

$$M = \log(A) - \log(f_c)$$

waarin M de magnitude van de aardbeving is, A de amplitude van de beving en f_c een correctiefunctie.

De plaats binnen in de aarde waar de beving ontstaat heet het *hypocentrum*, de plaats daar recht boven op het aardoppervlak wordt het *epicentrum* genoemd. A is de amplitude in het epicentrum van de beving. Hier beweegt de bodem het sterkst. Hoe verder je van het epicentrum afzit, hoe kleiner de amplitude van de beweging. Een meetstation op enige afstand zal dus een veel kleinere amplitude meten. Ook de samenstelling van de bodem speelt een rol. In een zachte bodem neemt de amplitude sneller af dan in een harde bodem. Richter verwerkte de invloed van deze factoren in een correctiefunctie f_c . De parameters in deze functie hangen af van de lokale samenstelling van de bodem en variëren per locatie en seismometer.

Richter gebruikt een logaritmische schaal: één schaalcijfer hoger betekent een tien keer zwaardere beving. De schaal van Richter is niet begrensd, maar alle tot nu toe gemeten aardbevingen passen op een 10-puntsschaal. Zeer kleine aardbevingen kunnen ook een negatieve magnitude hebben. De zwaarst bekende aardbeving vond in 1960 plaats in Chili en had een kracht van 9,5.

Momentmagnitudeschaal

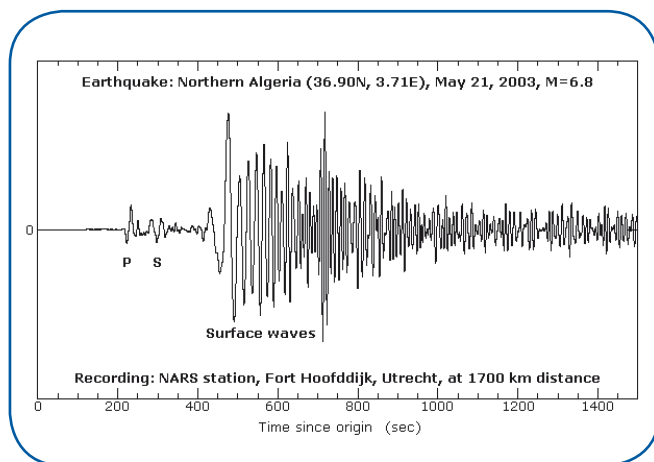
“De schaal van Richter is een empirische schaal”, licht Paulssen toe. “Met zijn formule beschreef hij zo nauwkeurig mogelijk de beschikbare meetgegevens. Tegenwoordig gebruiken seismologen de *momentmagnitudeschaal*. Deze is gebaseerd op de processen die in de aarde plaatsvinden. Het seismisch moment reken je uit met:

$$M_0 = \mu D S.$$

In deze formule is μ de shear modulus, dit is een soort wrijvingscoëfficiënt, D is de oppervlakte van het breukvlak dat zich verplaatst en S is de afstand waarover de verplaatsing plaatsvindt. Voor het nieuws over aardbevingen rekenen we het seismisch moment om in een magnitude die overeenkomt met de schaal van Richter. Mensen zijn nu eenmaal beter bekend met deze schaal.”

Kostbare seconden

Als breukvlakken in de aardkorst langs elkaar heen schuren, ontstaan er verschillende soorten golven. Er zijn longitudinale golven die zich gedragen zoals de golfbeweging van een veer die je indrukt en weer loslaat. Deze golven worden P-golven genoemd, ze planten zich het snelst voort door de aarde en worden als eerste (primair) gesignaleerd. De P-golven worden gevolgd door S-golven (secundair). Dit zijn transversale golven die zich voortplanten zoals wanneer je een touw op en neer beweegt. Na de directe S-golven is er een chaos van andere golfbewegingen. Dit zijn de reflecties van de P- en S-golven tegen allerlei overgangen in het binnenste van de aarde en golven die zich langs het aardoppervlakte voortplanten. Deze oppervlaktegolven hebben een grotere amplitude omdat ze hun energie nog maar in twee dimensies kwijt kunnen.



Het in Utrecht gemeten golfpatroon van de aardbeving in Algerije op 21 mei 2003. De P- en S-golven die het eerst aankomen, zijn duidelijk te zien.

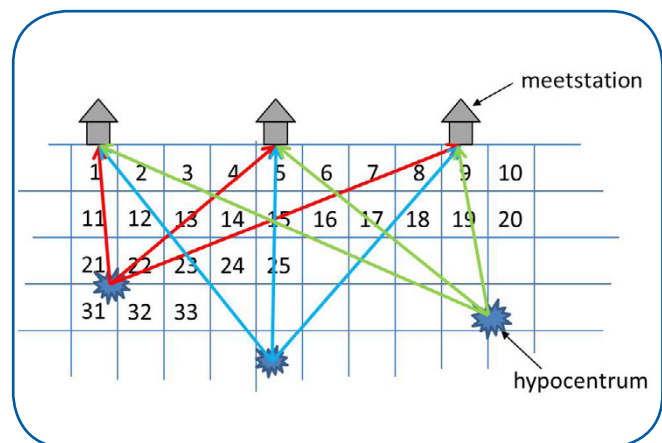
(bron: <http://www.geo.uu.nl/Research/Seismology/>)

“Het snelheidsverschil tussen de verschillende soorten golven kun je op meerdere manieren benutten”, legt Paulssen uit. “In California vinden bevingen plaats op een diepte van 10 tot 11 kilometer. Op een afstand van enkele tientallen kilometers komen de P-golven dan zo'n 10 seconden eerder aan dan de oppervlaktegolven met een veel grotere groundbeweging. Dit zijn kostbare seconden die benut kunnen worden om ergere schade te voorkomen, bijvoorbeeld door de aanvoer van elektriciteit stil te leggen zodat er geen brand door kortsluiting kan ontstaan.”

Het verschil in snelheid wordt ook gebruikt om de plaats van een beving vast te stellen. Op basis van P- en S-golven kun je bepalen hoe ver de beving heeft plaatsgevonden, net zoals je uit het tijdsverschil tussen een bliksemflits en de donder kunt schatten hoe ver een onweersbui zit. “Bij één meetpunt weet je op welke cirkel het centrum van een beving ligt, bij twee meetpunten kun je dit inperken tot twee mogelijke punten en bij drie meetpunten is er theoretisch nog één mogelijke plaats. In de praktijk geldt: hoe meer meetpunten, hoe nauwkeuriger de plaats.”

Signalen uit de aarde

De kakofonie van golfbewegingen die samen met de P- en S-golven wordt geregistreerd, zit bomvol informatie en geeft ons de mogelijkheid om de aarde tot grote dieptes te bestuderen. De Universiteit Utrecht bezit hiervoor een aantal seismometers. Een deel daarvan staat verspreid in Nederland opgesteld, een ander deel staat op dit moment in Botswana. “Botswana ligt op een *kraton*,” legt Paulssen uit. “Dit is een zeer oud stuk oercontinent waar we graag meer over willen weten. We doen dit met behulp van *seismische tomografie*. Hierbij deel je de ondergrond op in kleine gebiedjes. In de verschillende aardlagen planten golven zich met verschillende snelheden voort en bij de overgang tussen twee lagen buigen golven af volgens de wet van Snellius. Per gebiedje beschrijf je dit gedrag met behulp van wiskundige formules. In de aarde vinden voortdurend, op steeds andere plekken, aardbevingen plaats. Die meten we met meerdere meetstations. Zo krijgen we een matrix van metingen. We vergelijken de gemeten aankomsttijden van de golven met de voorspelde tijden en waar nodig stellen we de parameters in onze vergelijkingen bij. Zo krijgen we een steeds nauwkeuriger beeld van deze zeer oude bodemstructuur.”



Seismische tomografie waarbij de golven van aardbevingen met verschillende hypocentra door verschillende meetstations worden opgevangen.

“Het is de uitdaging om goede onderzoeksvragen te stellen.”

Hoewel het niet mogelijk is om aardbevingen te voorspellen, maakt seismologie het wel mogelijk om steeds beter te begrijpen wat er in onze aardbodem gebeurt. Wiskunde vormt hierbij een belangrijke basis maar ook wetenschappelijke creativiteit. “Het is de uitdaging om goede onderzoeksvragen te stellen die je verder brengen”, aldus Paulssen. “Niet te grote stappen, maar ook niet te klein, en ze moeten (wiskundig) oplosbaar zijn.”

Je kunt de registraties van het meetstation in Utrecht real-time volgen op http://www.geo.uu.nl/Research/Seismology/rt_seismogram_small.html
Je kunt daar ook eerder geregistreerde meetgegevens opvragen, waaronder een voorbeeld met toelichting (annotated example).

De site van het seismologisch instituut van het KNMI, <http://www.knmi.nl/seismologie> biedt uitgebreide informatie over aardbevingen en seismologie, inclusief de uitleg van veelgebruikte begrippen.

Er is veel oefenmateriaal beschikbaar rondom het thema aardbevingen. Een paar voorbeelden:

Hoofdstuk 3 van de NLT-module ‘De bewegende aarde’ gaat uitgebreid in op oorzaken en registratie van aardbevingen. In opdracht 3.1 (pagina 46) kunnen leerlingen aan de hand van metingen en een stappenplan zelf de locatie van een aardbeving in Nederland berekenen. U vindt de module op <http://www.betasteunpunt-utrecht.nl/index.php?pid=34&ct=1>

Het examen wiskunde B havo 1994 bevat een opgave over aardbevingen. U vindt een aangepaste versie op: http://www.mathunited.nl/view?comp=hb-e5&subcomp=hb-e56&variant=m4a_view&repo=m4a&item=exam

Het pilotexamen wiskunde A havo 2011 bevat een opgave over verzekeren: <http://www.havovwo.nl/havo/hwa/bestanden/hwapi11iex.pdf>

De universiteit Twente ontwikkelde de Wiskunde D modules Golven en tsunami's (<http://info.math4all.nl/Documenten/WiW-GolvenTsunami-11ntxt.pdf>) en Wave en golven (<http://www.beta-oost.nl/file/download/416442>)

Op de site van Math4all vindt u lesmateriaal en opgaven op verschillende niveau's over logaritmische schalen: <http://www.math4all.nl/zoeken?zoekwoord=logaritmische+schaal>