



# Gigantische aardshokken en een symfonie van de aarde

## De seismische partituur

**D**e *pizzicato*-noten roepen een fijne winterregen op... Bij elke aanraking trilt de snaar van de viool vrij volgens de haar eigen frequenties. De trillingen hangen af van de lengte, de samenstelling en de spanning van de snaar. Terwijl de violist zijn instrument stemt door aan de schroeven te draaien, verandert hij de spanning van de snaren. Terwijl hij speelt verandert hij hun lengte door zijn vingers te bewegen. Daardoor ontstaan verschillende frequenties, anders gezegd verschillende noten.

Een muziekliefhebber die vanuit zijn luie stoel naar een concert van Vivaldi luistert kan gemakkelijk de hoge klanken onderscheiden die door de fijne snaren worden voortgebracht, evenals de lagere tonen, afkomstig van de dickere snaren. Ons oor kan dus niet alleen het talent van de musici naar waarde schatten, maar ook de kwaliteit van de snaren. Door alleen maar te luisteren naar het geluid komt men meer te weten over de samenstelling, spanning en omvang van de snaar.

Net zoals de snaren van een viool kan elk lichaam "galmen" volgens eigen frequenties. Het kan gaan om een klok, een gebouw, een brug of zelfs... de aarde. Onze planeet kan inderdaad vrij trillen volgens frequenties, die bepaald worden door haar vorm, samenstelling en fysieke eigenschappen. Door deze trillingen waar te nemen kunnen we dus het inwendige van de aarde onderzoeken. Door haar grote omvang produceert de aarde echter geluiden die zo laag zijn dat ze niet door het menselijk oor kunnen worden waargenomen. Om een idee te geven vergelijken we de "aardse" frequenties met die van een "do 256 hertz" in het midden van een pianoklavier. Om de laagste geluiden van onze planeet te reproduceren (minder dan een duizendste hertz) zou men deze frequentie 18 keer door twee moeten delen of, in muzikale termen uitgedrukt, 18 octaven moeten laten zakken<sup>1</sup>. Een klavier van een piano telt in totaal slechts acht octaven... Nog een ander voorbeeld is een gitaar, waarvan de snaren tientallen kilometers lang zouden moeten zijn om zulke lage frequenties te doen ontstaan, als het al mogelijk zou zijn een snaar over een dergelijke grote afstand te spannen!

<sup>1</sup> Een octaaf verhogen komt overeen met het verdubbelen van de frequentie.

Maar welke muzikant kan melodieën spelen, die honderdduizend keer lager zijn dan die van een contrabas en die in een concertzaal zo groot als de aarde worden "gehoord"? Een krachtige aardshok! Alleen die kan onze planeet voldoende krachtig aanslaan, zodat de aarde in haar geheel galmt en vrij trilt volgens perioden die liggen tussen 54 minuten en enkele seconden en dat dagen- of zelfs wekenlang.

## De eigentrillingen van de aarde

De eigentrillingen van de aarde werden al voorspeld op het eind van de 19de eeuw, maar ze konden pas waargenomen worden bij de grote aardbeving van Chili in 1960. Door de enorme technologische vooruitgang kon men bij verschillende bevingen met een magnitude groter dan 6,5 in detail deze aardse klanken bestuderen. Dat leverde heel veel informatie op over het inwendige van de aarde. Zo kon men in 1971 dankzij het onderzoek van deze trillingen aantonen dat de binnenkern van de aarde zich in een vaste toestand bevindt.

## Het station van Membach

### Aardbevingen en stuwdammen

Ongeveer veertig jaar geleden besloot men de stuwdam van de Gileppe, gebouwd onder Leopold II, te verhogen. Aangezien er in wetenschappelijke publicaties veel sprake was van de invloed van grote waterreservoirs op het ontstaan van aardbevingen, bouwde het ministerie van Openbare Werken een geofysisch waarnemingsstation in Membach, gelegen tussen de stuwdammen van de Gileppe en van Eupen. Het station bestaat uit twee kamers, die bereikbaar zijn via een 130 meter lange gang. Het geheel werd tussen 1975 en 1977 gegraven in de rotsen onder het plateau van de Hoge Venen.

### Een uitzonderlijke opnamestudio

Het station van Membach is één van de beste seismische stations van de veertig stations die deel uitmaken van het Belgisch netwerk dat wordt beheerd door de Koninklijke Sterrenwacht van België (KSB). Het neemt elke aardbeving in de wereld waar met een magnitude groter dan 5. De meeste seismische stations beschikken over slechts één seismometer die de hoogfrequente signalen van de aardkorst waarneemt. Maar naast verschillende seismo-



De ingang van het station van Membach.

meters herbergt Membach sinds 1995 ook een supergeleidende of cryogene gravimeter en sinds 1996 ook een absolute gravimeter. Met deze brede waaier van instrumenten is de KSB een soort oor dat luistert naar het gebrom van de aarde in al zijn frequenties. Die variëren van licht geruis met eeuwenlange perioden tot snelle en verwoestende trillingen met frequenties van meer dan 1 hertz.

Deze groep instrumenten is uitzonderlijk en zorgt ervoor dat in Membach uiterst origineel onderzoek kan worden uitgevoerd. Slechts in enkele andere waarnemingsstations zoals dat van Piñon Flat in Californië en in het Zwarte Woud in Duitsland luistert men naar zo'n groot gamma van frequenties.

### De beving van Sumatra

Zoals andere grote aardbevingen als in 1960 in Chili ( $M_w=9,5$ ) en in 1964 in Alaska ( $M_w=9,2$ ), was de aardbeving van Sumatra en de Andamaneilanden op 26 december 2004 ( $M_w=9,1$  tot  $9,3$ ) het gevolg van een breuk in een subductiezone, daar waar een grote rotsachtige oceanische plaat onder een continentale plaat schuift. Deze bewegingen veroorzaken gigantische breukzones met een breedte van 200 kilometer en een lengte van 1000 kilometer en gaan gepaard met bruske verschuivingen van de ene plaat ten opzichte van de andere over een afstand van een tiental meter. Bij Sumatra scheurde het breukvlak op amper 10 minuten tijd over meer dan 1300 kilometer afstand, vanaf het noorden van Sumatra tot de Andamaneilanden, een eilandengroep in de Golf van

Bengalen. Dit is een gemiddelde snelheid van twee kilometer per seconde. Nog nooit eerder is zo'n grote scheur waargenomen. Ze deed zich voor op het breukvlak van de Indisch-Australische plaat en het zuidoostelijk deel van de Euraziatische plaat, dat afkalft tussen de kleinere Birmaplaat en de Soendaplaat.

Ter vergelijking: de beving van Roermond ( $M_s = 5,4$ ), die in 1992 over heel België werd gevoeld, werd veroorzaakt door een breuk die zich in de diepte over een afstand van vier kilometer gedurende twee seconden voortplantte. De aardbeving van Izmit die Turkije zo hevig trof in augustus 1999 ( $M_w = 7,4$ ), was het gevolg van een breuk die de aardkorst in 40 seconden tijd uiteenscheurde vanaf een diepte van 15 kilometer tot aan het aardoppervlak over een afstand van 120 kilometer.



Tektonische context, die aan de basis ligt van de aardbeving van Sumatra en de Andamaneilanden van 26 december 2004 (illustratie Kris Vanneste, KSB).

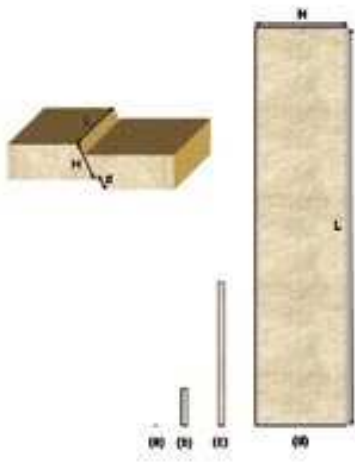
>  
De cryogene gravimeter in Membach.

>>  
De absolute gravimeter in Membach.



### De magnitude: viool of contrabas?

De magnitude van een aardbeving is de weerspiegeling van de bron en wordt bepaald door de oppervlakte van de breuk (in het geval van de beving van Sumatra zo groot als de helft van de oppervlakte van Frankrijk!), evenals door de gemiddelde verplaatsing van het breukvlak. De magnitude kenmerkt dus een aardbeving in termen van de uiteindelijke verplaatsing. Maar deze waarde kan niet onmiddellijk bekomen worden en wordt berekend op basis van langperiodieke seismische golven. De magnitude van de aardbevingen in Chili, Alaska en Sumatra werden berekend met behulp van metingen van golven met een periode van 300 seconden. Aangezien de breuk in het geval van Sumatra langer is dan die van Chili in 1960 of Alaska in 1964 lijkt het vreemd dat de magnitude kleiner is. Bij de aardbeving van 2004 hebben



Magnitude en breukvlak. De magnitude hangt af van de breedte  $l$ , de lengte  $L$  en de verplaat sing  $d$ . Vergelijking van verschillende bevingen: (a) Roermond, 1992,  $M=5,4$ ; (b) Izmit, 1999,  $M_w = 7,4$ ; (c) San Francisco, 1906,  $M=7,9$ ; (d) Sumatra-Andamaneilanden, 2004,  $M = 9,1-9,3$ .

zich echter trage breukbewegingen voorgedaan. Daardoor wordt energie geproduceerd over een lange periode. Een exacte berekening van de magnitude moet dus rekening houden met de traagste bewegingen met perioden die variëren tussen 5000 seconden en een uur. Op basis van onderzoek van vrije trillingen (zie volgende paragraaf), kon men de magnitude opnieuw evalueren tussen 9,1 en 9,3. Met een gelijkaardige methode zouden de magnitudes van Chili en Alaska veertig jaar geleden mogelijk lager zijn ingeschat.

Als men een aardbeving zou vergelijken met een symfonisch orkest dan brengt de ene ongetwijfeld eerder hoge tonen voort, terwijl de andere een belangrijkere rol toebedeelt aan de contrabassen. Spijtig genoeg beschikte men in 1960 nog niet over een "absoluut oor". Men had nog geen ontvangers die geschikt waren om de diepe klanken waar te nemen en waardoor men een correcte berekening had kunnen maken. In ieder geval is de onzekerheid in verband met de weinige gegevens die in de jaren '60 beschikbaar waren zo groot dat elke vergelijking in de orde van één of twee tiende magnitude onmogelijk is.

En de zaken zijn nog ingewikkelder. Ook de tektonische context is heel verschillend. In Chili schoof een slechts 15 miljoen jaar oude plaat loodrecht onder een andere plaat. In het geval van Sumatra gebeurde dit schuinweg, vooral in het noorden, en de plaat die onder de andere schuift is ook ouder: van 60 miljoen jaar in het zuiden tot 90 miljoen in het noorden van de breuk. Deze verschillen maken vergelijkingen tussen aardbevingen nog moeilijker. De mechanische koppeling tussen de twee betrokken platen en dus de bijbehorende plaatverschuivingen zijn functie van hun ouderdom.

Het is dus niet echt mogelijk een rangschikking te maken tussen de aardbevingen van 1960, 1964 en 2004. Gezien de grote afmetingen van de breuken kan men wellicht stellen

dat ze alledrie een hoge plaats innemen op de lijst van zware aardbevingen. Voor de beving van Sumatra zal overigens pas een definitief cijfer beschikbaar zijn wanneer we het mechanisme van de breuk beter begrijpen. Dat kan nog maanden en zelfs jaren duren.

### Een gigantische concertzaal

De bruuske verplaatsingen op de oceanbododem hebben niet alleen een verwoestende tsunami veroorzaakt, maar deden ook de hele aarde schokken. Ze veroorzaakten verschillende vrije trillingen, die ook normale modi worden genoemd<sup>2</sup>. Over het algemeen zijn die niet rechtstreeks waar te nemen in seismogrammen. Alleen door wiskundige (zogenaamde "spectrale") analyse kan men de verschillende tonaliteiten zichtbaar maken. Bij de aardbeving van Sumatra werd de aarde zo hevig geschud dat deze modi wel rechtstreeks zichtbaar waren in de meetgegevens van bepaalde seismometers en cryogene gravimeters, waaronder die van Membach.

Op de illustratie is te zien dat sommige van die modi nog wekenlang waarneembaar waren, voor ze door de nieuwe beving van Sumatra van 28 maart 2005 lichtjes heropleefden.

Door de grote kwaliteit van de meetgegevens van deze beving, in het bijzonder door cryogene gravimeters, zal men betere modellen van de aarde kunnen opstellen. Misschien bieden ze zelfs een oplossing voor sommige hangende kwesties. Zo wil men bijvoorbeeld weten of ijzerkristallen zich in de binnenkern van de aarde richten volgens de rotatie van onze planeet.

### Het meten van aardbevingen

Bij de aardbeving van Sumatra kwamen er problemen in verband met de ijking van de seismometers van het wereldwijd netwerk naar boven. Sommige meettoestellen hebben een foutmarge tot 10%. Dat is behoorlijk veel. Het tijdschrift *Science* schrijft dat in het geval van Sumatra een dergelijke onzekerheid het equivalent vertegenwoordigt van een aardbeving van magnitude  $M_w = 8,4$ . Deze waarde is groter dan alle schokken die tussen 1965 en 2001 plaatsvonden. Dit legt ook een beperking op aan een beter begrip van de beweging

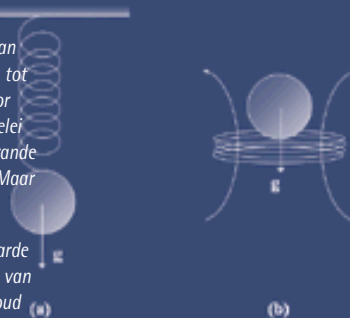
<sup>2</sup> Michel Van Camp, *Les oscillations libres de la Terre, Ciel et Terre* 117 (3), 98-102, 2001

Schema van de magnetische en klassieke ophanging aan een veer.

## De cryogene gravimeter legt zijn oor te luisteren

Zoals een seismometer meet ook een klassieke gravimeter de verplaatsingen van een massa die aan een veer is opgehangen. Een gravimeter is in het bijzonder gevoelig voor trage variaties van de zwaartekracht in de orde van enkele uren tot verschillende maanden. Bij een cryogene gravimeter wordt de puur mechanische ophanging aan een veer vervangen door magnetische levitatie van een sfeer, opgewekt door stroom die permanent circuleert binnenin twee spoelen. Het supergeleide geheel wordt op een temperatuur van  $-269^{\circ}\text{C}$  gehouden en is bijzonder stabiel. Daardoor kan men tijdelijke veranderingen van de zwaartekracht meten met een nauwkeurigheid die 100 keer hoger is dan bij conventionele gravimeters. Maar in tegenstelling tot gravimeters met een veer kunnen cryogene gravimeters momenteel niet getransporteerd worden.

Oorspronkelijk, in de jaren '70 en '80, waren deze instrumenten voornamelijk bedoeld om trage vervormingen van de aarde te onderzoeken met perioden van meer dan één uur, die voornamelijk te wijten zijn aan getijdenkrachten. Op het eind van de jaren '90 toonde onderzoek van de Koninklijke Sterrenwacht van België en van het observatorium in het Zwarte Woud aan dat de nieuwe cryogene gravimeters beter dan de klassieke seismometers geschikt zijn om bepaalde vrije trillingen van de aarde te bestuderen. Zoals hierna blijkt heeft de aardbeving van Sumatra van 26 december 2004 de seismometrische kwaliteiten van de cryogene gravimeters bevestigd.



van tektonische platen tijdens een aardbeving. In tegenstelling tot deze stations van het seismometrisch wereldnetwerk hebben het twintigtal cryogene gravimeters in de wereld grondverplaatsingen met een nauwkeurigheid van 0,1% kunnen meten. Membach verkreeg op 26 december 2004 metingen in de orde van een centimeter. Gelukkig is het mogelijk de ijkingsproblemen te corrigeren door metingen van seismometers en gravimeters met elkaar te vergelijken.

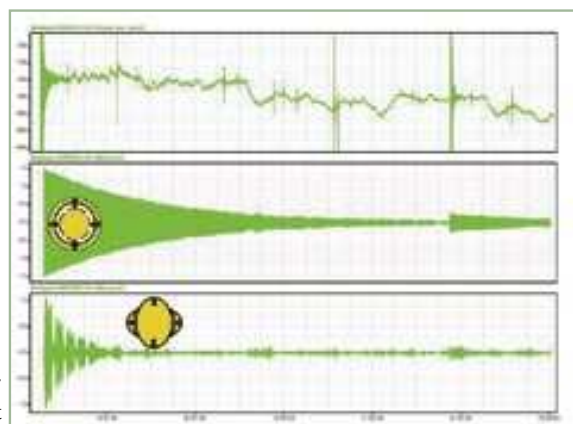
### Op internationaal niveau

De Koninklijke Sterrenwacht van België stuurt al sinds lang gravimetrische en seismische gegevens naar internationale centra door. In het bijzonder stelden we begin 2004 voor om de gegevens van Membach in realtime door te sturen naar het Amerikaanse *Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)*. Dat verzamelt onder meer gegevens van seismometers in heel de wereld en stelt ze ter beschikking aan onderzoekers.

De KSB werd zo het eerste instituut dat metingen van een cryogene gravimeter doorspeelt aan seismologen in de hele wereld via het centrum IRIS, dat ons hiervoor overigens zeer erkentelijk is. De belangstelling voor deze metingen werd nog eens bevestigd bij de aardbeving van Sumatra, zoals blijkt uit een recent artikel in *Science*<sup>5</sup> waarbij onder meer naar het werk in Membach verwezen wordt.

Michel Van Camp

5 Park, J., Song, T. R., Tromp, J., Okal, E., Stein, S., Roult, G., Clevede, E., Laske, G., Kanamori, H., Davis, P., Berger, J., Braitenberg, C., Van Camp, M., Lei, X., Sun, H., Xu, H., and Rosat, S., Long-period behavior of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake from its excitation of Earth's free oscillations, *Science*, 308, 1139-1144, 20 May 2005.



Boven: metingen door de cryogene gravimeter van Membach van 26 december 2004 tot 20 april 2005. Zichtbaar zijn de hoofdschok, de talloze nabevingen en andere schokken. Een "geluidsversie" van een gelijkaardige opname, 200.000 keer versneld, is te vinden op [http://www.iris.washington.edu/about/ENO/iows/2\\_2005a.htm](http://www.iris.washington.edu/about/ENO/iows/2_2005a.htm).

Onder: dezelfde metingen na filtering, zodat de "ballon" modus oSo (in het midden) en de "rugby" modus oSonderaan geïsoleerd zijn. oSo heeft een periode van 20,9 minuten en bestaat uit een beweging van de aarde die vergelijkbaar is met het herhaaldelijk opblazen en aflaten van een ballon. oS heeft een periode van 53,8 minuten en is de laagste. Hij kreeg de bijnaam "rugby" omwille van de oblate en prolate bewegingen van de aardbol (waarbij de aardbol respectievelijk de vorm van een liggende en rechtstaande rugbybal aanneemt). Er zijn nog honderden andere modi, maar deze twee zwakken zo traag af dat ze nog weken zichtbaar blijven. Alleen de aardbeving van Sumatra van 28 maart met een magnitude van 8,6 was krachtig genoeg om ze weer, zij het zwakker, te doen heropflakkeren.



[homepage.oma.be/mvc/](http://homepage.oma.be/mvc/)

(persoonlijke webpagina van Michel Van Camp)

Vanneste, K. en Van Hoolst, T., De aardbeving van 26 december 2004, in *Heelal* 50, nummer 7, pp. 216-227, juli 2005.

Vanneste, K. en Van Hoolst, T., De tsoenami van 26 december 2004, in *Heelal* 50, nummer 8, pp. 261-269, augustus 2005.

## De absolute gravimeter geeft de toon aan

Zoals een seismometer is ook een gravimeter relatief: hij meet slechts variaties, die verbonden zijn met bewegingen van de bodem. Om deze bewegingen in praktische eenheden om te zetten zoals de centimeter, moet men de instrumenten ijken, bijvoorbeeld met behulp van een absolute gravimeter.

De absolute gravimeter die de Koninklijke Sterrenwacht van België in 1996 bekam geeft rechtstreeks de waarde  $g$  van de zwaartekracht met een nauwkeurigheid van een miljardste. Dit is even nauwkeurig als het meten van de afstand aarde-maan tot op 10 centimeter nauwkeurig. Bij deze gravimeter bevindt zich een massa in het luchtledige over een afstand van een twintigtal centimeter in vrije val. Metingen van de afgelegde afstand in functie van de tijd leveren een waarde van  $g$  op. Dit instrument is voornamelijk bedoeld voor metrologische doeleinden en cartografie, evenals voor onderzoek van tektonische vervormingen van de beweging van ondergronds water. Membach, thuishaven van deze transporteerbare gravimeter, is het Belgisch referentiepunt geworden voor metingen van de zwaartekracht, waar  $g$  gemiddeld gelijk is aan  $9,810\,467\,250\text{ nm/s}^2$  met variaties van enkele  $\text{nm/s}^2$  (enkele miljardsten  $g$ ) in functie van de seizoenen.

De absolute gravimeter van de KSB heeft een internationale reputatie en neemt deel aan talloze metrologische campagnes, onder meer voor het Internationaal Bureau voor Maten en Gewichten. In de metrologie (de wetenschap van het "meten") is het belangrijk de waarde van  $g$  goed te kennen voor metingen van druk, de bepaling van de kilogramme ijking van relatieve gravimeters. Dat is dan weer belangrijk bij het opstellen van modellen van de aarde, het berekenen van de magnitude van grote aardbevingen en om beter de bewegingen te begrijpen bij de botsing van grote tektonische platen.

Momenteel leveren absolute gravimeters de beste methode om relatieve gravimeters te ijken. Ze zijn de "stemvorken" waardoor geofysici kunnen luisteren naar de hifi muziek, die onze aarde voortbrengt.

3 Michel Van Camp, Thierry Camelbeeck, T. et P. Richard, Le kilogramme, la constante de Planck et le soulèvement de l'Ardenne, *Ciel et Terre*, 120 (1), pp. 5-11, 2004.

4 M. Van Camp et O. de Viron, La mesure de la Terre est une des bases de son étude physique, *Ciel et Terre* 121 (3), pp. 66-78, 2005.