

Figuur 1: interferogram van de berlusconibeving van 6 april 2006 in Midden-Italië bij het middeleeuwse stadje L'Aquila. Het beeld is gebaseerd op radarhoogtemetingen met de Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) op de ESA-satelliet Envisat. Toelichting: zie tekst. (Bron: INGV)

Berlusconibeving in beeld

Op 6 april 2009 werd het midden van Italië getroffen door een zware aardbeving. De verschuivingen van de ondergrond werden onder andere in kaart gebracht met radarhoogtemetingen vanuit de ruimte. Dergelijke hoogtemetingen vinden ook andere toepassingen, zoals het volgen van het gedrag van vulkanen en het bepalen van het zeeniveau wereldwijd.

De aardbeving van 6 april deed zich voor in de Apennijnen in Midden-Italië (zie ook kader aardbevingen). Het epicentrum van de beving lag in de buurt van het middel-

eeuwse stadje L'Aquila, ongeveer 95 kilometer ten noordoosten van Rome, en is met het grotere groene vierkant gemarkeerd in figuur 1. De hoofdschok had een kracht van 6.3

Geerke Floor en Kees Floor

Geerke Floor is verbonden aan de Universiteit van Girona (Spanje) en de Franse Geologische Dienst BRGM in Orléans, waar ze in het kader van het Europese Marie-Curie project AquaTrain onderzoek doet naar selenium in de bodems rond de Etna en andere vulkanen. Kees Floor verzorgt cursussen, workshops, lezingen en geschreven teksten over het weer en aanverwante onderwerpen. Veel van zijn bijdragen aan Zenit (en andere tijdschriften) zijn te vinden op keesfloor.nl

op de schaal van Richter. Daarnaast waren er talrijke minder sterke naschokken. Sommige daarvan zijn ingetekend als kleinere groene vierkantjes; in alle afgebeelde gevallen bedroeg de magnitude 5 of meer op de schaal van Richter.

Bij de beving vielen minstens 287 slachtoffers; duizend mensen raakten gewond. Veertigduizend bewoners van de regio werden dakloos en moesten deels worden opgevangen in tentenkampen. Ook was er veel materiële schade: vijftienduizend gebouwen raakten zwaar beschadigd of werden totaal verwoest. Slechts een op de drie gebouwen kwam er ongeschonden doorheen.

De beving werd in heel Midden-Italië gevoeld. Doordat de Italiaanse premier Berlusconi tijdens de napsleep van de bevingen geregeld met markante opmerkingen de pers haalde, verwijzen we hier naar deze gebeurtenis als de berlusconibeving.

Interferometrie

Wie wel eens een aardbeving heeft gevoeld, weet dat de grond dan beweegt onder je voeten. Die bewegingen leiden tot vervormingen en veranderingen in het reliëf van het gebied, die met onder andere radarhoogtemetingen vanuit de ruimte in kaart kunnen worden gebracht (zie kader radarhoogtemetingen). Zo heeft de Envisat van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA een Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) aan boord, die de gegevens leverde waaruit figuur 1 is afgeleid. De methodiek die daarbij gebruikt wordt, noemt men Synthetic Aperture Radar interferometry of kortweg InSAR. Wat kort door de bocht kun je zeggen dat daarbij twee hoogtekaarten met elkaar worden vergeleken: in dit geval een van 1 februari 2009, dus van voor de aardbeving, en een van 12 april, de eerste overkomst van de Envisat na de beving. Het resultaat van deze bewerking levert een interferogram op, dat een interferentiepatroon in regenboogkleuren bevat, bij voorkeur geprojecteerd op een kaart van de omgeving. Elke kleurrijke band komt overeen met een verplaatsing van het aardoppervlak van 2,8 centimeter in de richting van de satelliet of de tegenovergestelde richting.

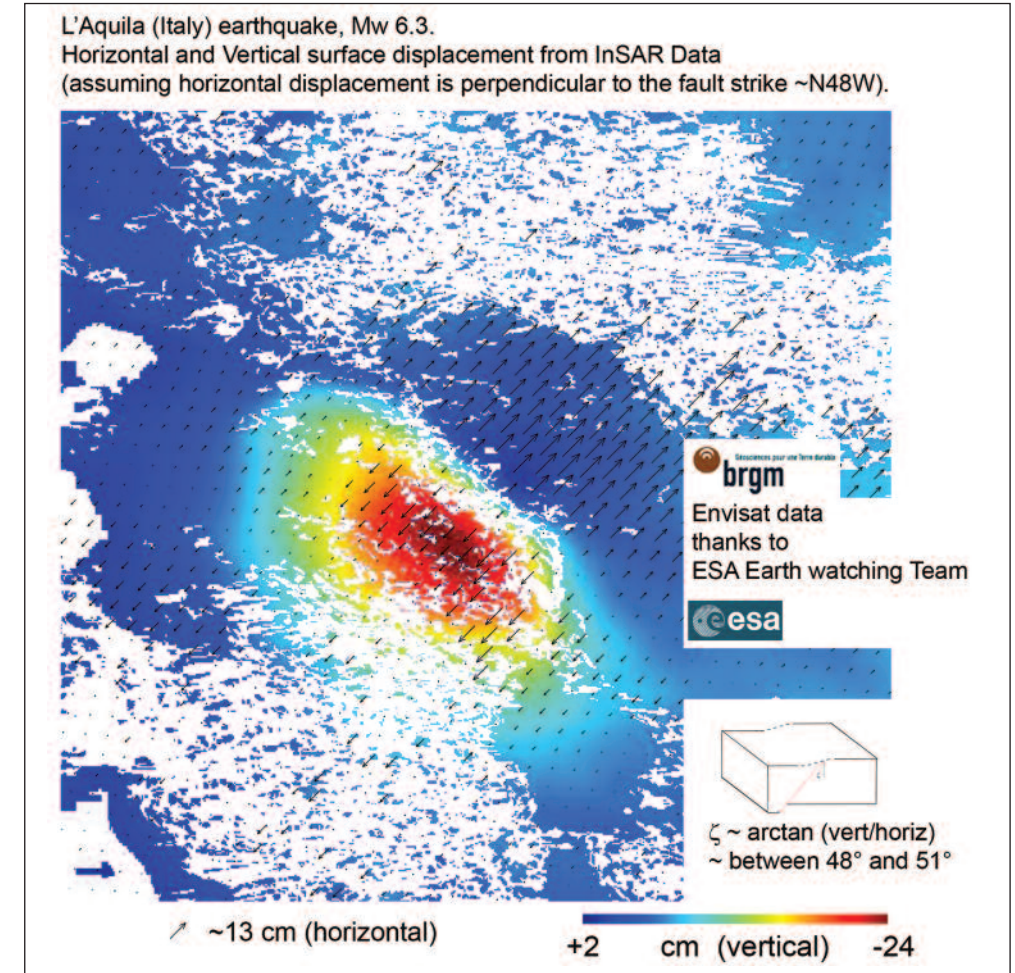
Het interferogram van de berlusconibeving van 6 april toont negen van die interferentiebanden rond de plaats waar de veranderingen het grootst waren, ongeveer midden tussen L'Aquila en Fossa (zie figuur 1). De grond bewoog daar maar liefst 24

centimeter naar beneden langs een lijn in de richting van de satelliet. De gegevens kwamen goed overeen met de meetresultaten van vijf GPS-stations in de buurt, in figuur 1 weergegeven met zwarte driehoekjes. Het interferogram werd gemaakt door onderzoekers van het Italiaanse Instituut voor Geofysica en Vulkanologie INGV in Catania op Sicilië. Andere instituten en instellingen uit Italië, Frankrijk, Griekenland en Iran maakten op basis van de radarhoogtemetingen van de Envisat en andere satellieten vergelijkbare interferogrammen.

Paganicabreuk

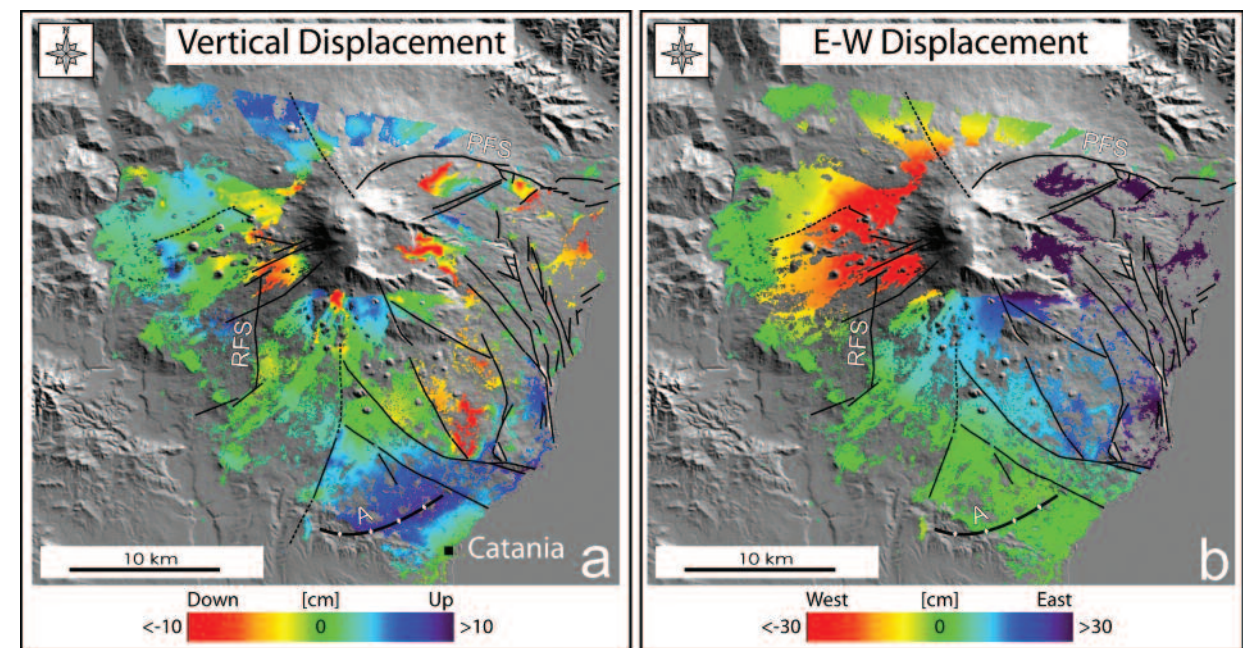
De verschuivingen in de aardkorst traden op langs de Paganicabreuk, genoemd naar het daar vlakbij gelegen plaatsje Paganica. Het breukvlak (zie ook kader aardbevingen) loopt onder L'Aquila door en komt aan het aardoppervlak langs de noordwest-zuidoost georiënteerde gele lijn in de figuur, waar de vervormingen het sterkst zijn en dus de interferentiebanden het dichtst op elkaar liggen. De breuk was al eerder tijdens geologisch veldwerk aan het licht gekomen en is ingetekend op geologische kaarten van het gebied sinds de jaren negenig van de vorige eeuw.

Medewerkers van de Franse Geologische Dienst BRGM vertaalden de radarhoogtemetingen naar kaarten met horizontale en verticale verplaatsingen van het aardoppervlak. Daarbij is ervan uitgegaan dat de ho-



izontale bewegingen loodrecht op de richting van de in figuur 1 geel ingetekende breuklijn staan. De stijgen en daalbewegingen zijn in figuur 2 weergegeven in kleur, de ingetekende pijlen geven de horizontale

Figuur 2: vervormingen van het aardoppervlak in horizontale en verticale richting, gebaseerd op radarhoogtemetingen vanuit de ruimte. (Bron: BRGM)



Figuur 3: veranderingen van het aardoppervlak rond de Etna over een periode van 15 jaar: 1992-2006. De linkerfiguur toont vervormingen in verticale richting, de rechterfiguur in de richting oost-west. De figuren zijn gebaseerd op radarhoogtemetingen vanuit ESA-satellieten ERS-1, ERS-2 en Envisat en daaruit afgeleide interferogrammen. De zwarte lijnen geven de ligging van belangrijkste breuken in de aardkorst. (Bron: Neri et al)

bewegingen. Aan de zuidwestkant van de Paganicabreuk daalde de bodem tot maximaal 24 centimeter; aan de noordoostkant kwam de bodem tot 2 centimeter omhoog. De lengte van elke pijl is een maat voor de verplaatsing in horizontale richting; bij de langste pijlen is die verplaatsing ongeveer 13 centimeter. Uitgaande van de radarhoogtemetingen kunnen verder de bewegingen in de aardkorst worden nagebootst met een computermodel. Dat is ondermeer gedaan door wetenschappers van het al eerder genoemde INGV. Ze maakten een driedimen-

sionale situatieschets, zoals afgebeeld in figuur 4. De kleuren op het blauw getinte breukvlak geven een maat voor de bewegingen die daarlangs optraden. Op 4 kilometer diepte was de verschuiving het grootst: 90 centimeter.

Etna

De radarhoogtemetingen en de bijbehorende interpretatie daarvan met behulp van interferometrie vindt ook toepassingen op andere terreinen, zoals de vulkanologie. Om de uitbarstingen van een vulkaan goed te voorspellen, is het belangrijk te

weten wanneer magma richting het aardoppervlak komt. Bij nieuwe toevoer van magma wordt namelijk op een gegeven moment de druk zo hoog dat er een uitbarsting kan plaatsvinden. Soms gaat de verplaatsing van magma vrij abrupt; in dat geval geven de kleine aardbevingen die daarbij optreden een aanwijzing dat een eruptie op handen is. Andere keren dringt het magma zo geleidelijk op dat er geen bevingen ontstaan en er alleen maar een geringe vervorming van de vulkaan optreedt. Dan bieden radarhoogtemetingen, waarmee die vervorming gesignaleerd kan worden als voorbode van een uitbarsting, uitkomst.

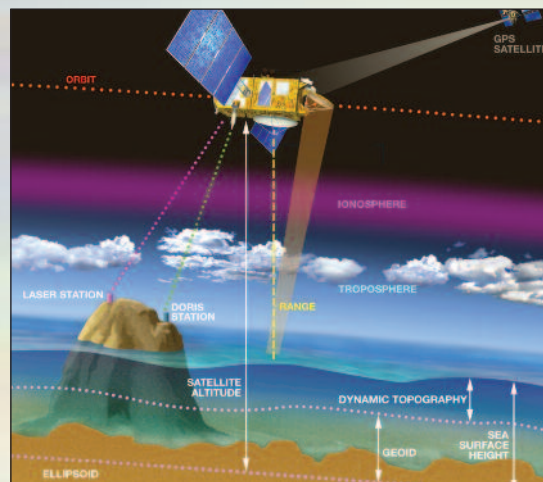
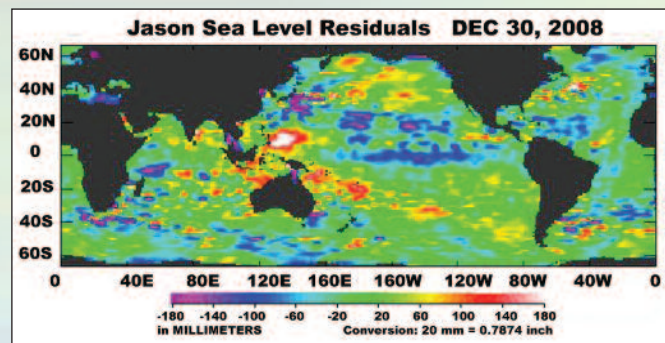
De Etna is de grootste en meest actieve vulkaan van Europa (zie ook Zenit, maart 2006) en de best bestudeerde vulkaan ter wereld. Beschrijvingen van uitbarstingen gaan terug tot voor het begin van onze jaartelling. Toch is onze kennis over de vulkaan en de processen die zich daarin afspelen, vooral de afgelopen twintig jaar verkregen met nieuwe technieken, zoals InSAR. De radarhoogtemeters op de ESA-satellieten ERS-1, ERS-2 en Envisat doen hun werk sinds 1992, zodat er inmiddels een meetreeks beschikbaar is van meer dan 15 jaar. De beschikbaarheid van zo'n lange meetreeks met de daarop gebaseerde analyses is uniek in de wereld. Vulkanologen werken liever met lange reeksen dan met de gegevens van slechts één uitbarsting. Ze kunnen er een beter inzicht mee verkrijgen in het algemene gedrag van de vulkaan over langere tijd en cyclisch gedrag, waarbij patronen zich herhalen, nauwkeuriger bestuderen.

Uit de analyse van de meetgegevens blijkt dat de Etna 'ademt': nu eens krimpt hij of zakt hij wat in, zoals de afgelopen jaren het geval was, dan weer dijt hij uit of komt omhoog, zoals in de jaren negentig van de vorige eeuw*. Figuur 3 geeft de totale vervorming van het aardoppervlak over de periode waarin metingen werden verricht. Door het 'ademhalingsgedrag' te koppelen aan het patroon van uitbarstingen dat de vulkaan laat zien, kunnen de toekomstige erupties beter worden voorspeld.

*Een filmpje van de ademende Etna staat op de ESA-website: www.esa.int/esaCP/SEMQGKTYRF_index_0.html

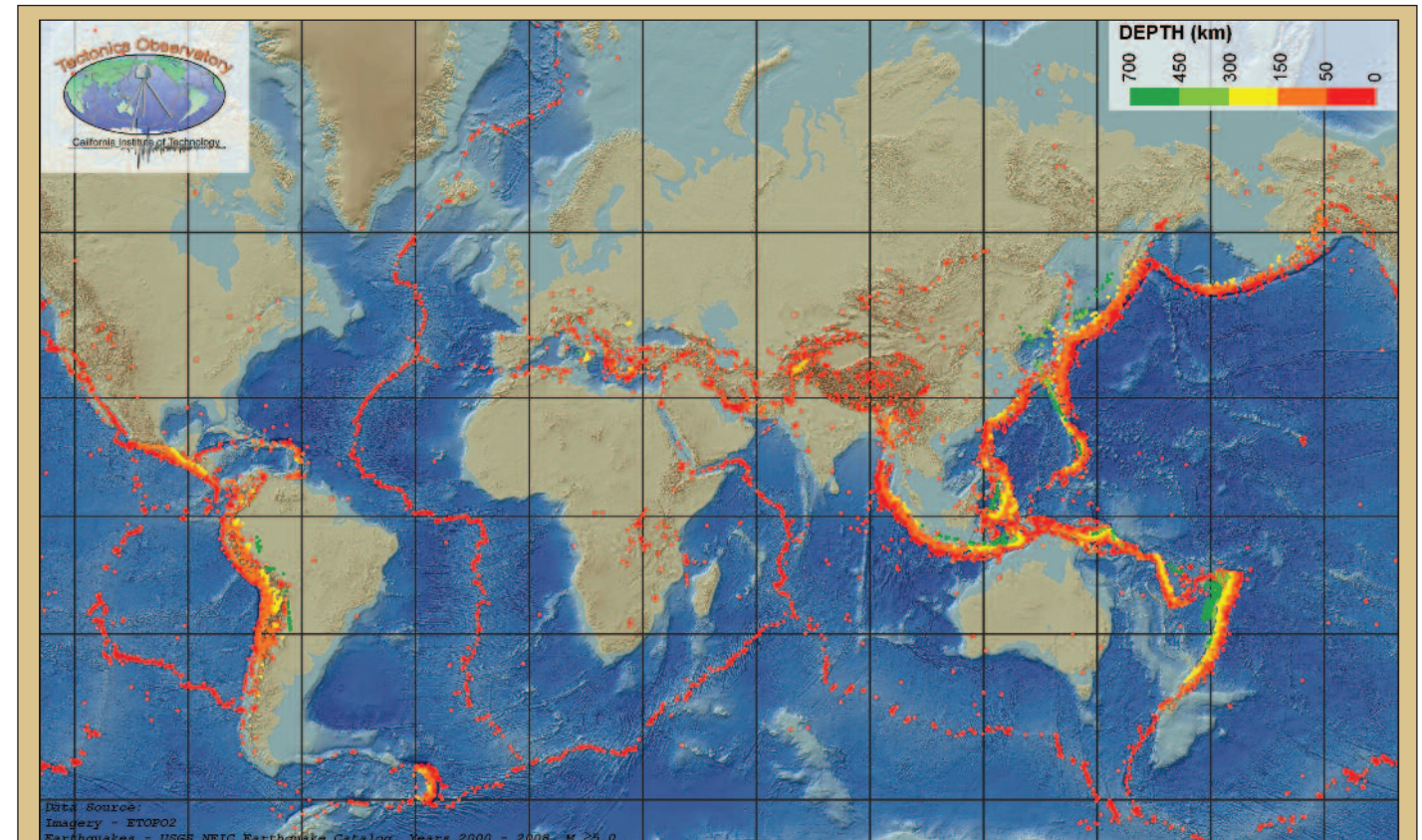
Radarhoogtemeting vanuit de ruimte.

Uiteindelijk willen we niet die afstand weten, maar de hoogte van het aardoppervlak ten opzichte van een referentieniveau dat vast zit aan de aarde. Meestal kiest men daarvoor de zogenoemde referentie-ellipsoïde, een ruwe benadering van de vorm van het aardoppervlak. Om de vereiste precisie te bereiken moet de positie van de satelliet bekend zijn met een nauwkeurigheid van 1 tot 2 centimeter. De positiebepaling wordt op verschillende manieren gedaan. Om vrij snel een eerste indruk te hebben van de hoogte van de satelliet gebruikt men gegevens van de Diode onboard navigator (DORIS). Later worden de posities nauwkeuriger berekend met onder andere positiebepalingen via laser en met GPS-gegevens. Ook verdere informatie over het zwaartekrachtsveld van de aarde en over de satelliet zelf, zoals uitgevoerde manoeuvres, het brandstofverbruik, de oriëntatie van de zonnepanelen en dergelijke, is hierbij nodig. Uiteindelijk krijgt men de beschikking over zeer nauwkeurige hoogtebepalingen, bijvoorbeeld van de hoogte van de zeespiegel. Daarnaast zijn er toepassingen bij het bestuderen van aardbevingen, vulkanen, overstromingen en landverschuivingen.



Radarhoogtemetingen

Sinds het begin van de jaren negentig van de vorige eeuw verrichten radars op satellieten zeer nauwkeurige hoogtemetingen vanuit de ruimte. De hoogte van het landoppervlak of het zeeniveau wordt bepaald met een radarpuls, die uitgezonden wordt door het instrument op de satelliet. Satellieten waarop zich zo'n instrument bevindt, zijn de ERS-2 en de Envisat van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA en de meer op zeeniveaumetingen gerichte satellieten JASON-1 en JASON-2. De radarpuls legt een traject af door de dampkring, kaatst vervolgens terug tegen het aardoppervlak en wordt uiteindelijk weer opgevangen door een ontvanger op de satelliet. Uit de voortplantingssnelheid van de radargolven en de tijd die de radarpuls voor de heen- en terugreis nodig heeft, kan de afstand tussen satelliet en het oppervlak (range in de figuur) worden bepaald. In eerste benadering plant de radarstraling zich voort met de lichtsnelheid. In de atmosfeer ligt de voortplantingssnelheid echter lager, doordat waterdamp en elektronen vertraging veroorzaken. Om nauwkeurige waarden voor de afstand tussen satelliet en aardoppervlak te krijgen, wordt voor deze effecten gecorrigeerd.



Wereldkaart met aardbeviingsactiviteit in de periode 2000-2008. De bevingen markeren de randen van de platen in de aardkorst. De kleuren geven de diepte van de bevingen, van ondiep (rood) naar diep (groen). (Bron: Lisa Christiansen, Caltech Tectonics Observatory)

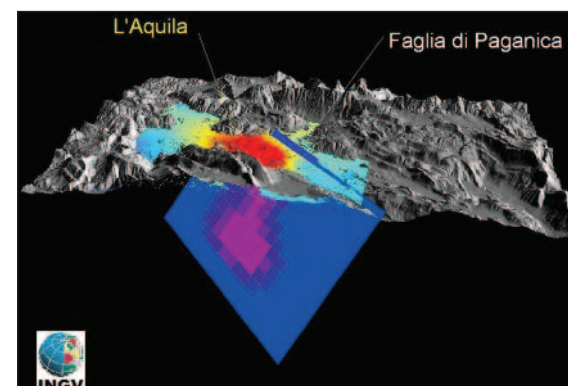
Aardbevingen

Aardbevingen, zoals de berlusconibeving van 6 april van dit jaar, hangen samen met de manier waarop de aarde is opgebouwd. De buitenste laag van de aarde heet de lithosfeer. Deze bestaat uit verschillende platen, die ten opzichte van elkaar bewegen door stromingen in de eronder gelegen mantel. Bij sommige randen bewegen de platen uit elkaar. Dat is bijvoorbeeld het geval in het midden van de Atlantische Oceaan en in andere mid-oceanische ruggen. Elders botsen platen tegen elkaar. Dat gebeurt onder andere aan de grens van de Euro-

pees-Aziatische plaat en de Afrikaanse plaat. De spanningen die bij dergelijke processen optreden, ontladen zich door schoksgewijze verschuiving van stukken aardkorst langs een breukvlak in het gesteente. Daarbij verspreiden zich trillingen door de aarde: een aardbeving. Aardbeviingshaarden markeren dus de randen van de platen. Zo zijn op de wereldkaart alle aardbevingen ingetekend met een magnitude van 5 of meer op de schaal van Richter die zich volgens gegevens van de Amerikaanse Geologische Dienst (USGS) voordeden in de periode 2000 tot en met 2008. De randen van de platen zijn in zo'n figuur gemakkelijk terug te vinden.

De berlusconibeving van 6 april valt buiten de getoonde periode. Datzelfde geldt voor de vorige zware aardbeving in de regio, die plaatsvond in 1997. Het epicentrum lag toen 85 km ten noordnoordwesten van dat van de recente berlusconibeving. De beving van 1997 had een kracht van 6 op de schaal van Richter. Ze maakte deel uit van een aardbeviingszwerm, waarbij in de periode september tot en met november 1997 talrijke aardbevingen optraden. Acht daarvan hadden een kracht van 5 of meer op meer op de schaal van Richter.

Figuur 4: de berlusconibeving trad op langs de Paganicabreuk, die in deze driedimensionale computerbewerking blauw is weergegeven. De paarse tinten zijn een maat voor de verplaatsingen die langs het breukvlak optraden. De grootste verplaatsingen deden zich voor op 4 kilometer diepte en bedroegen ongeveer 90 centimeter. (Bron: INGV)



Bronnen

1. ESA-website: www.esa.int
2. Neri, et al., 2009, Deformation and eruptions at Mt. Etna (Italy): 'A lesson from 15 years of observations', Geophys. Res. Lett., 36, L02309.