

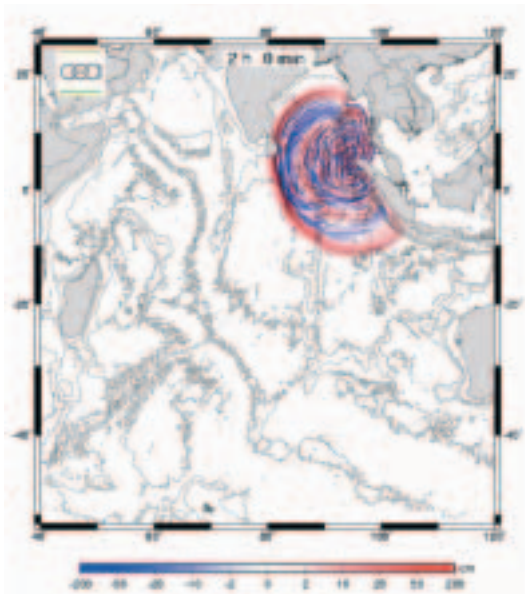
Chen Ji, Seismologisch Laboratorium, California Institute of Technology

Computerreconstructie van de rampzalige aardbeving op 26 december 2004. De beving vond plaats op 18 kilometer diepte langs de breuk (vette zwarte lijn) tussen de Indo-Australische plaat (linksonder) en de Euraziatische plaat. De zwarte ster markeert het epicentrum. De dunne zwarte lijnen geven de kust van noordwest Sumatra en nabije eilanden aan. De kleur codeert voor de beweging van de zeebodem in meters. Links: daling en stijging. Rechts: horizontale beweging, loodrecht op de breuklijn. Aan de westkust van Sumatra traden bodemdalingen op tot één meter. Daardoor zijn delen van het kustgebied blijvend onder zeeniveau terechtgekomen.

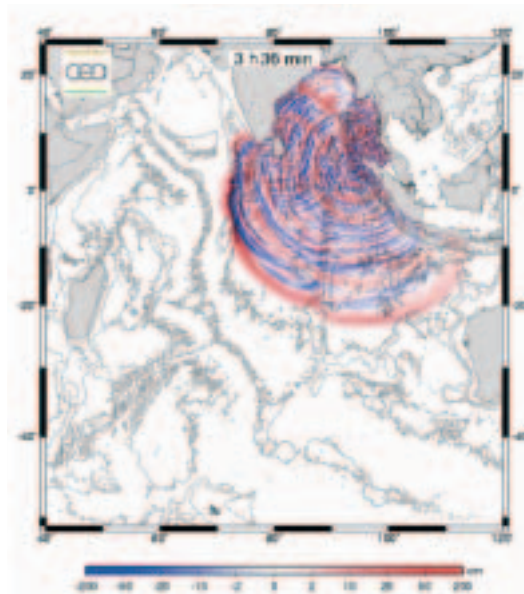
De aarde trilt nog steeds na

De rampzalige aardbeving en tsunami's van tweede kerstdag 2004 zijn door seismografen en overkomende satellieten tot in detail waargenomen. Acht minuten lang – een record – schoven de Indo-Australische en de Euraziatische aardschollen langs elkaar heen. Een onderzoeker: "Wrang dat we op deze manier aan onze informatie moeten komen."

Kees Floor



Modelberekening van de golfhogten van de tsunami, twee uur na de aardbeving. De golven hebben zojuist India en Sri Lanka bereikt.



Golfhoogten, 3 uur 36 minuten na de beving. Nu zijn ook door de kust teruggekaatste golven zichtbaar.

Commissariat à l'énergie atomique (CEA).

“Meer meetgegevens graag”, verzuchtte Lori A. Dengler nog in maart vorig jaar. De geofysicus werkt met haar collega's aan de Humboldt State University in Alasaka aan risicokaarten voor tsunami's. Binnen een jaar werd ze op haar wenken bediend. Op 26 december 2004 richtte een tsunami voor het eerst in vijfhonderd jaar grote verwoestingen aan langs de kusten van de Indische Oceaan. Ze is niet de enige die halsreikend naar de registraties uitkijkt. “Fascinerend; dit komt bijna nooit voor. Ook wij seismologen kijken onze ogen uit, al is het wrang dat we op deze manier aan onze informatie moeten komen”, zegt Hein Haak, hoofd seismologie van het KNMI. “De aarde kwam over zo'n groot gebied in beweging, dat het begrip epicentrum zijn betekenis verliest.” De activiteit van de zeebeving strekte zich namelijk uit over een gebied met een lengte van 1200 kilometer, meer dan bij de zwaarste aardbeving van de laatste honderd jaar, die van 1960 in Chili. Vanaf het punt waar de plotselinge verschuiving langs de breuklijn begon, trok het proces met een snelheid van 2,5 kilometer per seconde naar het noord-noordwesten. Op 150 kilometer van het epicentrum kwam de aarde op tien kilometer diepte twintig meter of meer omhoog. “De aardbeving van Roermond, met een sterkte van 5,8 op de schaal van Richter de zwaarste uit de Nederlandse recente geschiedenis, steekt daar maar magertjes bij af. Op bijna twintig kilometer diepte kwam de grond er over een gebied met een diameter van ongeveer vier kilometer zo'n

twintig centimeter omhoog”, aldus Haak.

Ook Rinus Wortel – zich als zo vele aardwetenschappers ergerend aan het woord zeebeving, omdat het de aarde is die beeft – is onder de indruk van de beving van Noord-Sumatra. “Vooral de duur was uitzonderlijk”, aldus de hoogleraar tektonofysica aan de Universiteit Utrecht. “De brontijd was ongeveer acht minuten. Er zijn slechts een of twee bevingen bekend met een brontijd van vijf minuten of meer. De lange brontijd is typisch voor het soort aardbevingen waarbij tsunami's verwacht mogen worden.”

Terugkaatsing Die tsunami's vormen het studieterrain van Wortels collega Piet Hoekstra. Zijn vakgroep doet onderzoek aan kusten en rivieren. Zelf ging de Utrechtse hoogleraar ooit op Java op zoek naar de sporen die een tsunami in de bodem had achtergelaten na de ontploffing van de vulkaan Krakatau in 1883. Hoekstra blijkt nu vooral geïmponeerd door de terugkaatsing van de tsunamigolven tegen de kusten van India en Sri Lanka.

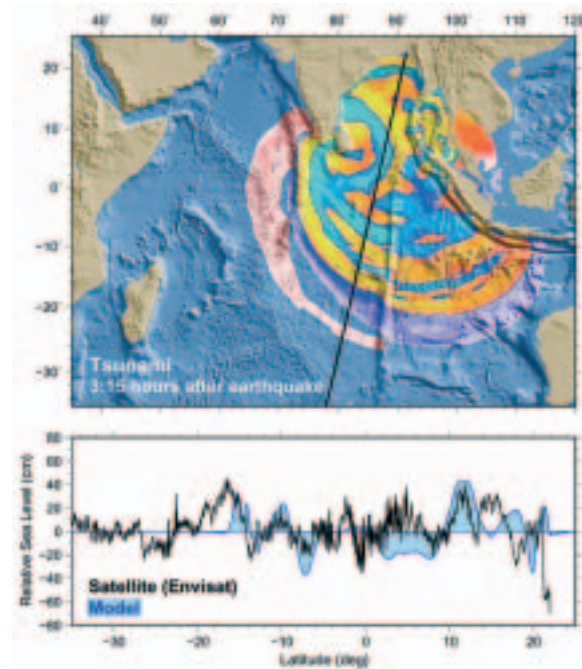
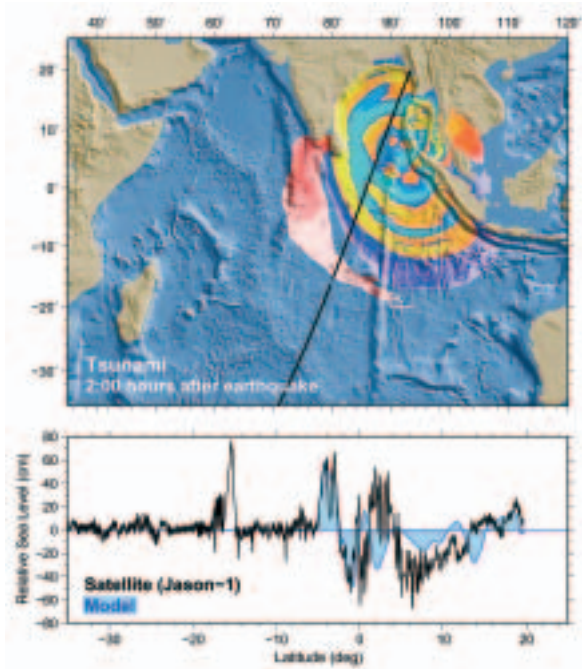
“Door dat effect werd het strand van het Thaise Phuket tweemaal getroffen: eenmaal rechtstreeks door de directe golf en daarna opnieuw door de teruggekaatste golf.” Enthousiast, maar toch ingetogen toont hij de van internet geplukte animaties die het effect duidelijk laten zien. “Deze modelberekeningen worden bovendien bevestigd door satellietmetingen”, aldus Hoekstra. Ook Ernst

Schrama beschikt over hoogtemetingen vanuit de ruimte. “Het was puur toeval dat een aantal satellieten op de juiste plek en op de juiste tijd overkwam.” Schrama is hoofddocent Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek van de Technische Universiteit Delft, waar ze al sinds 1980 het zee-niveau meten met satellieten. Twee uur na de aardbeving trok de Jason-satelliet over het rampgebied. Vijf minuten later volgde de TOPEX-Poseidon, nog weer ruim een uur later de Envisat. Al die satellieten kunnen hoogtebepalingen verrichten met radar.

Terugkaatsing van golven herkende tsunamikenner Hoekstra ook op veel kleinere schaal. “Je ziet op een van de spectaculaire, uiterst gedetailleerde beelden van de commerciële Amerikaanse QuickBird satelliet een randgolf die gevangen blijft in de kustzone voor het strand van Kalutara op Sri Lanka en dan terugdraait naar de kust.”

Breking Zoals bij alle golfverschijnselen treedt er in de kustgebieden niet alleen terugkaatsing op maar ook breking. “Die refractie herverdeelt de energie van de tsunami naar ondiepere delen en naar kappen; in baaien komt de klap naar verhouding minder hard aan”, verklaart Hoekstra het verschil in schade en ravage tussen verschillende stukken kust.

“Gezamenlijk zijn terugkaatsing en breking verantwoordelijk voor de vorming van een muur van water, die zich met een snelheid van 10 tot 18 meter per seconde over een tientallen of honderden meters brede kuststrook landinwaarts uitrolt.



NASA

Radarhoogtemetingen met de Frans-Amerikaanse satelliet Jason-1, twee uur na de aardbeving. De zwarte lijn is de baan waarlangs de satelliet metingen heeft verricht. Onderin: zeeniveauctuatie zoals waargenomen door de radarhoogtemeter en een modelvoorspelling van de tsunami.

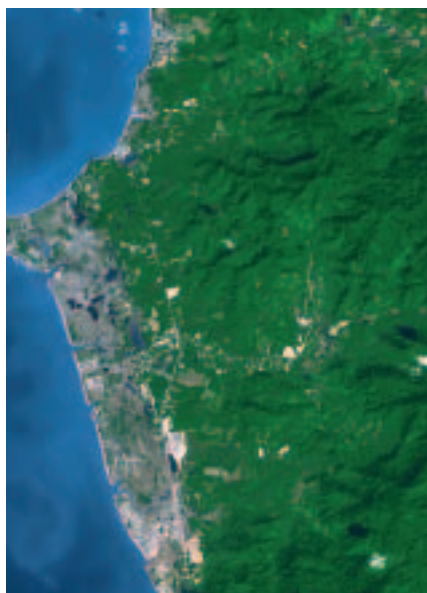
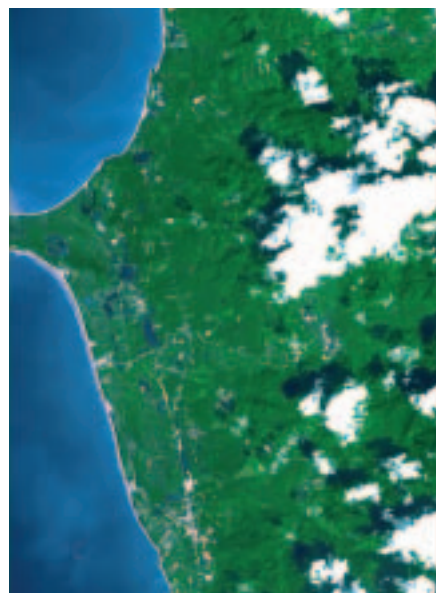
Radarhoogtemetingen met de Europese satelliet Envisat, 3 uur 15 minuten na de beving. Nu zijn ook teruggekaatste golven zichtbaar.

Daarbij ontstaat veel schade, maar onderschat vooral het effect van het naar zee terugstromende water niet. Meegevoerde brokstukken en puin geven als het ware nog een klap na.”

De herverdeling van energie blijkt niet de enige factor die bepaalt waar de schade optreedt. Satellietbeelden laten zien dat stranden soms meer te verduren

hadden dan uitstekende delen van het vasteland. “Hoogteverschillen zijn ook van belang”, volgens Tim Gubbels van Science Systems and Applications, Inc., uit Lanham, Maryland, USA. “Daarnaast zijn vorm en diepte van de oceaانبodem, brekingseffecten, vegetatie en landgebruik factoren die verschillen in schade kunnen verklaren.”

Kustlijn ten noorden van het vliegveld van Phuket, Thailand, ongeveer twee jaar voor (links) en enkele dagen na de tsunami (rechts). Het (ingekleurde) beeldveld is 9.8 x 27.6 km. Instrument: ASTER. Satelliet: Terra.

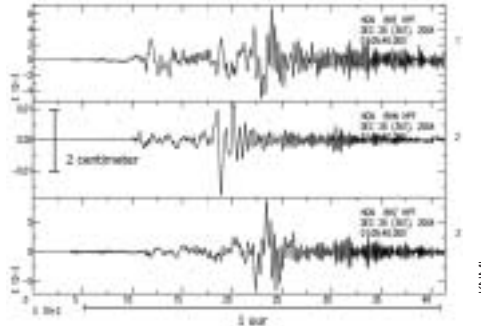
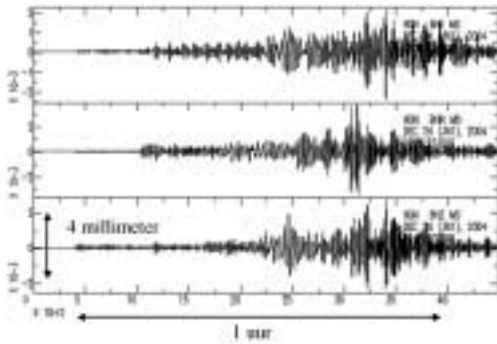


Registraties Terug naar de bron: de aardbeving zelf. De trillingen die ze uitzond en die zich langs het aardoppervlak over de hele aarde verspreidden, waren ook in Nederland te meten. Haak: “De seismografen van het KNMI in de Heimansgroeve in het Limburgse Geuldal sloegen vier millimeter uit.” Wortel: “De uitwijking van de seismometers op Fort Hoofddijk in het Utrechtse universiteitscentrum De Uithof bedroeg zes millimeter.” Haak: “Kijk je naar laagfrequente oppervlaktegolven, dan kwam de grond in Nederland zelfs twee centimeter omhoog. Overigens, doordat die bewegingen langzaam gaan, voel je ze niet.”

“De aarde blijft veel langer natrillen dan de eigenlijke beving duurt. Acht minuten beving blijken goed voor een meer dan een week trillende bodem in Nederland”, vervolgt Haak. “En dan hebben we het nog niet eens over de eigentrillingen van de aarde die seismologen *breathing mode* en *football mode* noemen”, vult Wortel aan. Bij zulke eigentrillingen verandert de aarde als geheel periodiek van vorm. “Eén periode van zo’n trilling duurt respectievelijk 20 en 54 minuten, terwijl de trillingen van het gewone seismogram een periode hebben van slechts enkele seconden. Na de be-

NASA/GSFC/MEI/ERSDAC/JAROS en U.S./Japan ASTER Science Team

“De aarde kwam over zo’n groot gebied in beweging, dat het begrip epicentrum zijn betekenis verliest.”



Registratie van de aardbeving door het KNMI. De seismometer staat in de Heimansgroeve, Limburg. De aarde bewoog volgens de normale registratie (a) vier millimeter op en neer, op lage frequenties (b) zelfs 2 centimeter.

ving op het Russische schiereiland Kamchatka in 1952 werd het bestaan van eigentrillingen vermoed door de Amerikaanse seismoloog Hugo Benioff. Die beving staat met de recente aardbeving van Noord-Sumatra op een gedeelde vierde plaats in de lijst van zwaarste bevingen sinds 1900. Bij de aardbeving van 1960 in Chili, die de lijst aanvoert, werden ze voor het eerst aangetoond. En nu doen de 20-minuten-trillingen zich weer voor; tot april van dit jaar zullen ze nog terug te vinden zijn in de meetgegevens”, voorspelt Wortel.

Haak ging in zijn registraties direct op zoek naar de laagfrequente trillingen en vond ze beide. “De *football mode* met een periode van 54 minuten werd voor het eerst in Nederland waargenomen”, vertelt hij trots. “We hebben de beno-

digde meetapparatuur al tien jaar in huis, maar moesten tot december 2004 wachten voor er een aardbeving optrad die sterk genoeg was om de hele aarde in trilling te brengen.”

Zware bevingen Het gebied waar de beving van tweede kerstdag optrad, is seismisch zeer actief. Er schuiven daar namelijk twee delen van de aardkorst over elkaar heen. “Dat gaat met een snelheid van zes centimeter per jaar. Om zulke zware aardbevingen te krijgen, mag dat proces niet te gladjes verlopen,” legt Wortel uit. “Juist als de overschuiving langdurig stagneert, bouwt zich meer spanning op, die zich tijdens de beving kan ontladen.”

Over dergelijke bevingen in Nederland maakt Haak zich geen zorgen; daar leent de ondergrond zich niet voor. Ook

voor tsunami’s langs de Nederlandse kust is hij niet bang: “Aardbevingen bij IJsland of elders op de Midden-Atlantische Rug ontberen de sterkte om tsunami’s op te wekken. Daarvoor moet je rond de Middellandse Zee zijn of voor de kust van Portugal. Tijdens de beving van Lissabon in 1755 met een geschatte sterkte van 8,7, week de zee voor Lissabon achteruit om twintig minuten later met dertig meter hoge golven terug te komen. Deze tsunami heeft Nederland echter niet bereikt. Het Kanaal was kennelijk te nauw om hem door te laten en de omweg rond de Britse Eilanden te groot.”

De enige mechanismen die hier een tsunami kunnen brengen, zijn de inslag van een meteoriet of een kolossale landschuiving bij Noorwegen. Aan dat laatste is wel eens gerekend, weet Haak: “De Noordzee is zo ondiep, dat een eventuele tsunami door wrijving met de bodem vrijwel al z’n energie kwijt zou raken. Een hoogte van meer dan een meter zit er daardoor niet in. Ook zou de snelheid teruglopen naar twintig kilometer per uur. Alle tijd dus om een waarschuwing te doen uitgaan”, stelt Haak gerust.

De ramp van tweede kerstdag 2004 heeft nu al een vloedgolf aan internetpublicaties opgeleverd. Die gaat zich volgens Wortel uitbreiden naar de congressen en symposia waar de aardwetenschappers elkaar ontmoeten. Haak is ervan overtuigd dat de wetenschappelijke gemeenschap nog jaren blijft ‘natrillen’.

Natrillen De aarde als geheel kan op diverse manieren trillen. Twee voorbeelden: vervormen als een rugbybal en krimpen/zwellen. Zulke extreem langzame oscillaties houden na een zware aardbeving maandenlang aan.

