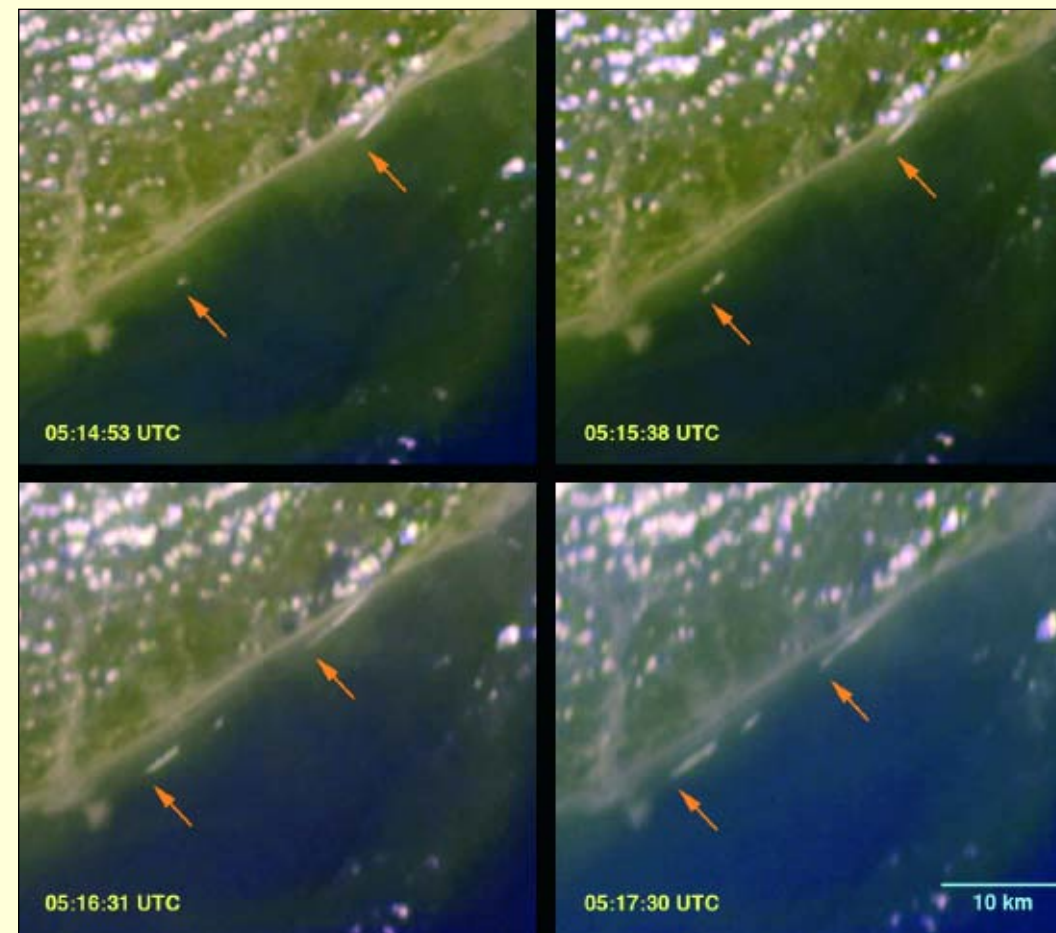




1. Het strand van Kalutara op Sri Lanka tijdens de tsunami van tweede kerstdag. Het zeewater heeft zich ver teruggetrokken. Op zee een gevarieerd patroon met golven. (Satelliet: QuickBird; bron: DigitalGlobe)

3. Beelden van de tsunami bij de kust van Andhra Pradesh, India. (Instrument MISR; satelliet: Terra; bron: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team)



De tsunami op satellietbeelden

Na de tsunami van tweede kerstdag vorig jaar kwamen er talrijke satellietopnamen beschikbaar. In de meeste gevallen brachten ze de schade in beeld door de situatie voor de ramp te vergelijken met die erna. Veel uitzonderlijker waren echter de beelden van de tsunami en de daarmee samenhangende golven zelf.

Kees Floor*

Om dergelijke beelden te kunnen maken, moet op het juiste moment en op de juiste plaats de juiste satelliet overkomen. Doordat de ramp zich in de ochtend voltrok, was de kans hierop vermoedelijk groter dan op een ander tijdstip van de dag. Verscheidene satellieten zijn vooral bedoeld om het aardoppervlak duidelijk in kaart te brengen. In gebie-

den waar de dag onbewolkt begint, ontwikkelen zich later in de ochtend of in de middag vaak stapelwolken, die het aardoppervlak vervolgens gedeeltelijk aan het zicht onttrekken. Door rekening te houden met deze dagelijkse gang van de bewolking en de satelliet te laten overkomen vóór de bewolking ontstaat, verkrijgt men meer bruikbare beelden.

Dit verklaart de aanwezigheid van de QuickBird boven het rampgebied. De commerciële satelliet is bedoeld om zeer gedetailleerde opnamen aan te leveren, bijvoorbeeld van dorpen en stadswijken. Daarnaast zijn er uiteraard talrijke andere toepassingen voor bijvoorbeeld landgebruik of het in kaart brengen van moeilijk toegankelijk gebied.

De QuickBird, waaraan Fokker Space nog heeft meegebouwd, werd in oktober 2001 in een 450 km hoge baan om de aarde geplaatst. Van daaruit brengt hij een 16,5 km brede strook recht onder de satelliet in kaart. De foto's zijn te koop bij het bedrijf DigitalGlobe,

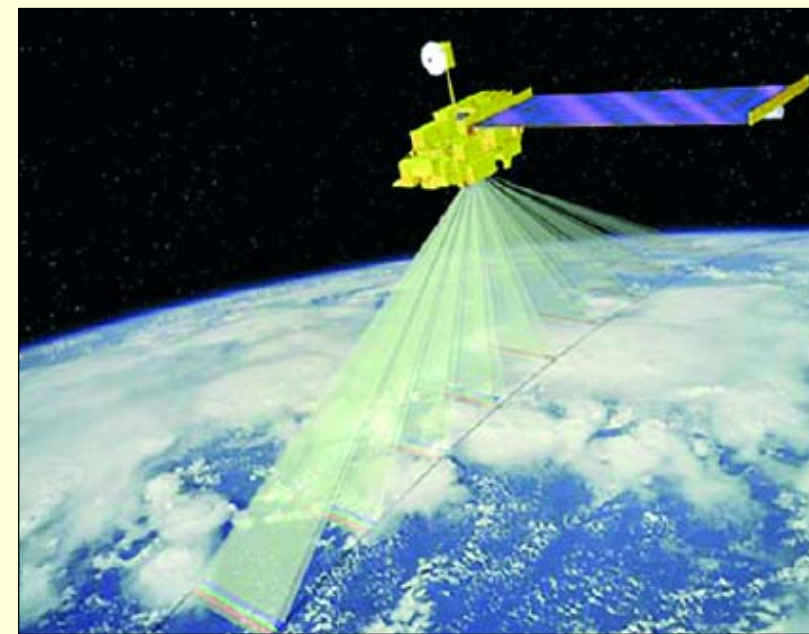
maar in bijzondere gevallen komen er gratis beelden beschikbaar voor verspreiding via dagbladen, tijdschriften of internet. Figuur 1 is een voorbeeld daarvan. De opname toont het strand van Kalutara op Sri Lanka. De oceaan heeft zich ver teruggetrokken en water van de vloedgolf stroomt terug naar zee. De wisselwerking tussen de tsunami en de bodem geeft aanleiding tot een gevarieerd patroon van golven, dat door de satelliet gedetailleerd in beeld is gebracht.

MISR

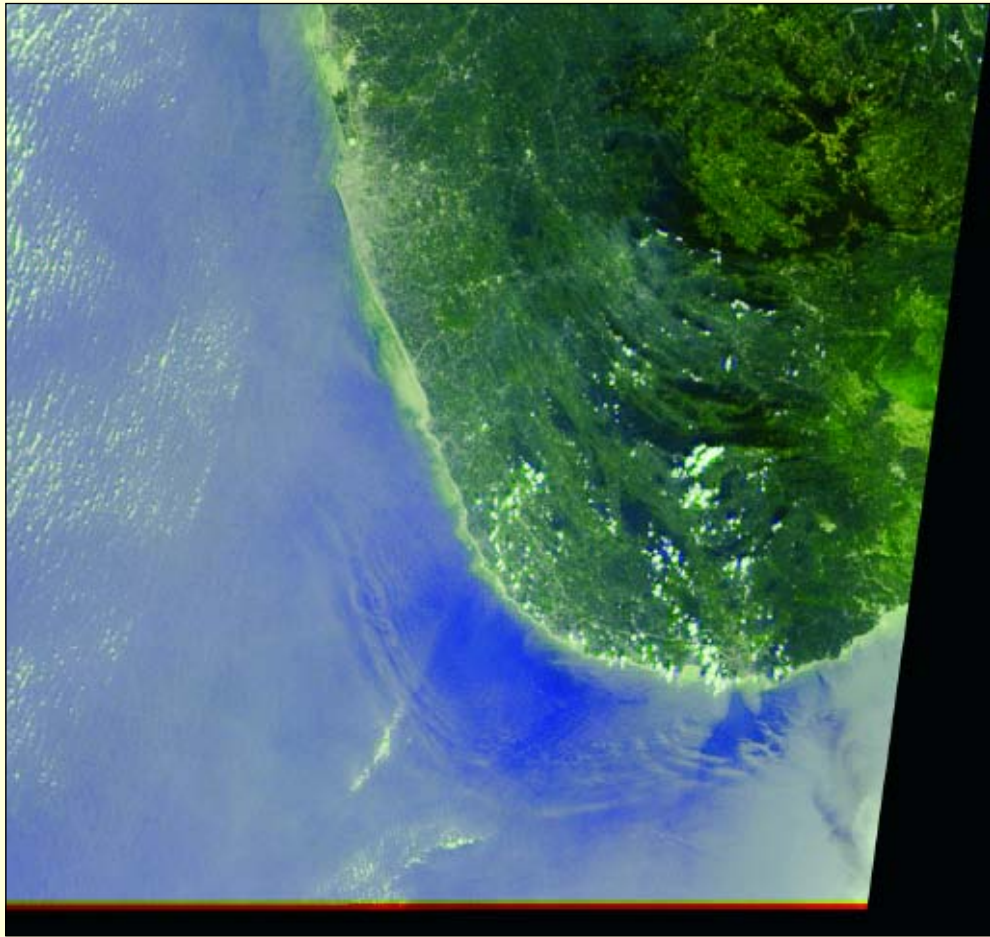
De meeste satellietbeelden van de aarde worden gemaakt vanuit een positie recht boven het gebied dat in beeld is gebracht, zij het met veel lagere resolutie dan die van QuickBird. Per keer dat de satelliet overkomt, levert dat één beeld op. De Amerikaanse Terra-satelliet, ook bewust in een ochtendbaan geplaatst en bekend van zijn schitterende MODIS-beelden, voert echter nog andere instrumenten mee. Eén daarvan neemt niet uitsluitend recht naar beneden waar. Deze

Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR) meet vanaf 705 km hoogte het door de aarde gereflecteerde zonlicht onder negen verschillende hoeken (fig. 2). Dergelijke metingen hebben zin, omdat de hoeveelheid licht die verstrooid wordt afhangt van de rich-

ting waarin het wordt uitgezonden of wordt waargenomen. Zo kan de stralingshuishouding van aarde en atmosfeer nauwkeuriger bepaald worden dan uit metingen vanuit één richting. Als de satelliet nadert, komt een plaats op aarde eerst in beeld bij de



2. De sensoren van de Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR) van de Amerikaanse satelliet Terra tasten de aarde af in negen verschillende kijkrichtingen. Daardoor komen van een bepaalde plaats op aarde beelden beschikbaar met tussenpozen van minder dan een minuut. Sommige effecten, zoals de zomerglinstering van fig. 4, treden slechts op bij een bepaalde invalshoek en ontbreken op de overige beelden.



4. Golven en tsoenamische schaduw bij de zuidwestkust van Sri Lanka. (Instrument MISR, sensor die onder een hoek van 46 graden naar voren is gericht; satelliet: Terra; bron: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team)

meest vooruit gerichte sensor. Met tussenpozen van bijna een minuut wordt diezelfde plek door de opeenvolgende sensoren waargenomen, totdat na het passeren van de satelliet de meest naar achteren gerichte sensor een laatste beeld maakt. De MISR maakt elke negen dagen een beeld van een elke plek op aarde die tussen 82 graden noorderbreedte en zuiderbreedte ligt. De Terra-satelliet komt elke ochtend over rond 10.30 uur plaatselijke tijd.

India

De aardbeving bij Noord-Sumatra van 26 december 2004 trad op kort voor 01.00 UTC. De de voorste begrenzing van de tsoenami die door de beving werd opgewerkt, bereikte de oostkust van India rond 03.35 UTC. Deze aankomsttijd is bepaald uit waterstandsmetingen in de haven van Vishakapatnam. Diezelfde metingen laten zien dat er tussen 05.10 en 05.20 UTC een volgende serie golven arriveerde. Dat was precies het moment waarop de Terra overtrok.

Zeven minuten lang had de MISR de oostkust van India in beeld. Vier van

de negen beelden die werden gemaakt, zijn weergegeven in figuur 3. Ze omvatten een periode van ongeveer 2,5 minuut. De beelden tonen een gebied van 42 bij 37 km, met de kust van Andhra Pradesh, niet ver van de plek waar de Godavari uitmondt in de Golf van Bengalen.

Als de golven van een tsoenami de ondiepere kustwateren bereiken, worden ze hoger en kunnen ze breken. Dit is vergelijkbaar met het gedrag van gewone golven, maar op veel grotere schaal (zie mijn eerdere artikel in *Zenit* 3). Vermoedelijk tonen de beelden van figuur 3 de voorkant van brekende golven. De pijlen markeren het zuidwestelijke uiteinde ervan. Als een tsoenami de kust onder een hoek nadert, ontstaan er door terugkaatsing en bijbuiging tevens zogeheten randgolven. Deze verplaatsen zich evenwijdig aan de kust en maken dat een bepaalde locatie vaker door golven wordt getroffen. De beelden van figuur 3 suggereren de aanwezigheid van dergelijke randgolven.

Sri Lanka

Kort nadat Terra de beelden van fi-

guur 3 had gemaakt, kwam Sri Lanka in zicht. Daar leverde de MISR de metingen waaruit figuur 4 werd gedestilleerd. Het beeld bestrijkt een gebied van 208 bij 207 km en toont de zuidwestkust van Sri Lanka. De bruine tinten van het zeewater bij de kust, veroorzaakt door sediment, puin en wrakstukken, wijzen erop dat ook deze kant van het eiland tsoenamischade opliep, zij het minder dan de oostkant. Golven van tsoenami's buigen namelijk om eilanden heen, zodat ook de van een aardbeving af gerichte kusten gevaar lopen.

Het rimpelpatroon op figuur 4 voor de kust markeert ongeveer de rand van het continentale plat en wordt vermoedelijk veroorzaakt door de wisselwerking tussen diepe golven en de bodem van de oceaan. Mogelijk gaat het hier om teruggekaatste golven van de tsoenami, maar verder onderzoek moet daarover nog uitsluitsel geven. De rimpels zijn zichtbaar doordat ze zich voordoen in een gebied met zonneglinstering.

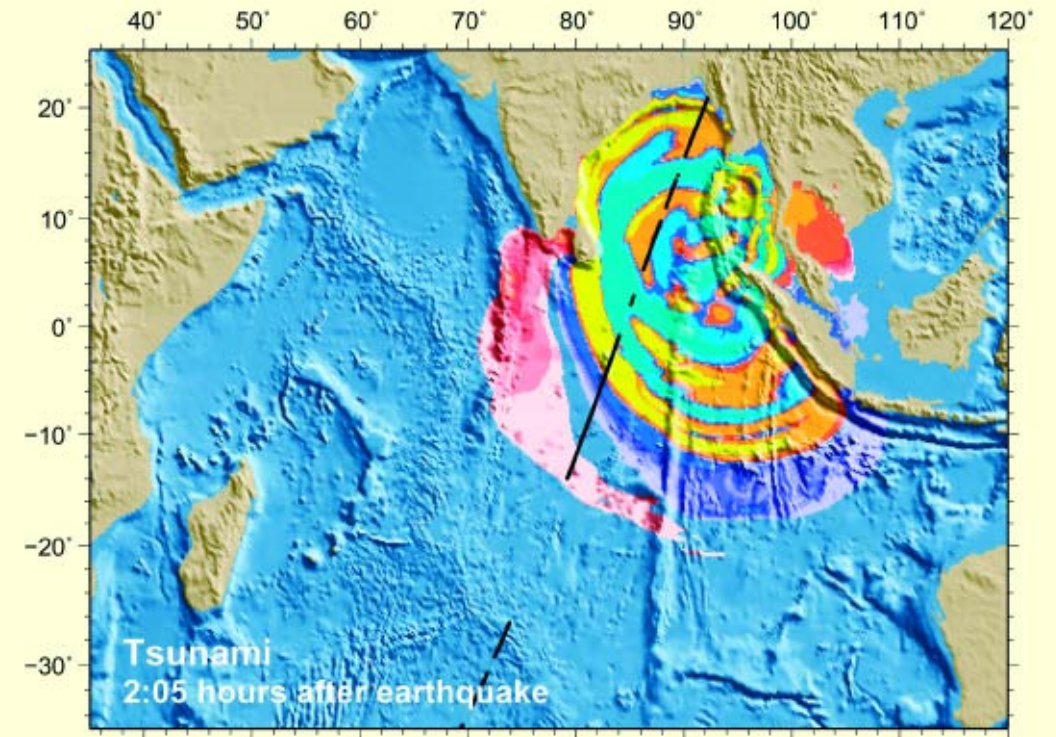
De helderheid van deze reflecties van zonlicht hangt af van de positie van de zon, de hoek waaronder wordt waargenomen en de oriëntatie van het zeeoppervlak. Doordat de MISR het aardoppervlak onder negen verschillende hoeken bekijkt, zijn er negen kansen om het effect te zien. Recht van boven waren de rimpels niet zichtbaar. De zonnepiegeling trad uitsluitend op in het beeld van de sensor die onder een hoek van 46 graden naar voren is gericht.

Radarhoogtemetingen

Figuur 5 geeft een andersoortig beeld van de tsoenami. De informatie waarop het beeld is gebaseerd, is afkomstig van een radarhoogtemeter op de Frans-Amerikaanse satelliet TOPEX-Poseidon, die al sinds 1992 waarnemingen verricht. Voor deze satelliet maakt het niet uit of het dag of nacht is en ook bewolking doet er niet toe; de aanwezigheid boven de Indische Oceaan berust dus sterker op toeval dan bij de andere satellieten.

De meetwaarden van de instrumenten van de satelliet zijn vergeleken met de gemiddelde toestand van de vorm van de oceaan in dat gebied tijdens een eerdere overkomst, twintig of dertig dagen ervoor. Op deze manier konden golf-toppen (rood of geel) en golf-dalen (blauw of turkoois) van de

tsoenami worden teruggevonden, in kaart gebracht en vergeleken met de rekenresultaten van computermodellen van tsoenami's. Het beeld van figuur 5 geeft een momentopname 2 uur en 5 minuten na de beving. Uit de meting van de TOPEX/Poseidon en zustersatellieten Jason-1 en Envisat bleek dat de hoogste toppen op de oceaan (geel) een hoogte hadden van vijftig à zestig centimeter. Ze werden gevolgd door een dal van veertig centimeter. Twee opeenvolgende toppen lagen volgens de metingen tweehonderd kilometer uit elkaar. De tsoenamigolf is daardoor voor schepen op de open oceaan eigenlijk niet waarneembaar. In de buurt van de kust nam de snelheid van de golven af van 800 tot 32 km/uur. Tegelijkertijd groeide de hoogte aan van vijftig centimeter tot meer dan tien meter.



5. Radarhoogtemeting van de Indische Oceaan tijdens de tsoenami van tweede kerstdag 2004. (Satelliet: TOPEX/Poseidon; bron: Remko Scharroo/NOAA Laboratory for Satellite Altimetry)

Aardbeving beïnvloedde aardrotatie

De aardbeving die de 'kersttsoenami' veroorzaakte, heeft ook gevolgen gehad voor de rotatie van onze planeet of meer precies voor de zogeheten Chandler-schommeling. Omdat de aarde geen volmaakte bol is, draait zij strikt genomen niet gelijkmatig om één vaste as. In plaats daarvan volgen de polen ruwweg een cirkel met een middellijn van tien meter. Anders gezegd: de aarde schommelt met een amplitude van ongeveer 0,7 boogseconde per jaar. En elke gebeurtenis waarbij de massaverdeling van de aarde wordt veranderd, maar ook weersystemen en oceaanstromingen hebben invloed op deze schommeling.

Bij de aardbeving van 26 december 2004 is een groot stuk van het noordelijke deel van de Indische Oceaan ten opzichte van Azië een meter of twintig naar het noorden opgeschoven. Tegelijkertijd is dit gedeelte van de aardkorst enkele meters de aardmantel in gedrukt en is het noorden van Sumatra enkele meters omhooggekomen. Uit modelberekeningen blijkt dat deze verschuivingen tot een kleine verandering in de jaarlijkse schommelbeweging van de aardas heeft geleid. Deze verandering is echter te klein om direct meetbaar te zijn: een centimeter of 2,5.

Ook de aardrotatie is beïnvloed. Dat komt doordat – heel overdreven geformuleerd – de aarde door de verschuivingen in de aardkorst slanker is geworden. Het gaat om een afname van slechts 1,2 mm in de omtrek aan de evenaar, maar dat is voldoende om de dag 0,0000027 seconde te bekorten. Hierdoor zullen onze klokken over duizend jaar een seconde extra achter lopen op de draaiing van onze planeet. Dat effect valt echter in het niet bij de afwijkingen die ontstaan onder invloed van de getijdenwrijving.

Bron: Steven Dutch, 'The 2004 Indonesian Earthquake and Earth's rotation', <http://www.uwgb.edu/dutchs/PLATETEC/RotationQk2004.HTM>

POLARIS OPTISCHE INSTRUMENTEN

MEADE nieuwe LXD75 serie telescopen



Bel voor introductieprijsen

Newton 152 mm
Schmidt-Newton 152 mm, 203 mm, 254 mm
Schmidt-Cassegrain 203 mm
Achromatische refractor 127 mm en 152 mm

POLARIS OPTISCHE INSTRUMENTEN
Nachtegaalstraat 76; 3581 AM Utrecht
tel/fax: 030-2322569
e-mail: fa.polaris@wolmail.nl