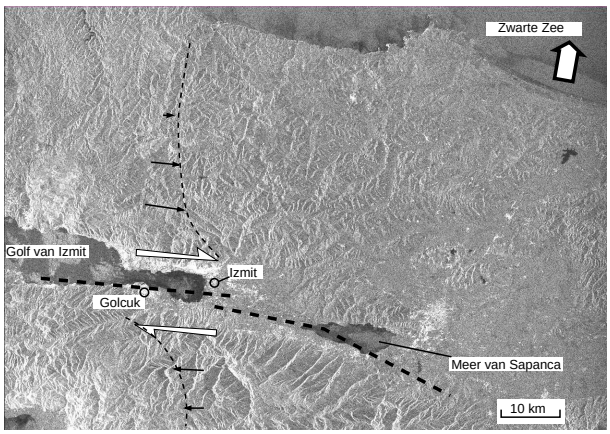
Reprint Remote Sensing Nieuwsbrief no. 90, Feb. 2000

Deformatiepatroon van de aardbeving van 17 augustus 1999 in Turkije gemeten met satelliet radar interferometrie

Ramon Hanssen, Bert Vermeersen, Remko Scharroo, Bert Kampes,
Stefania Usai, Rüdiger Gens en Roland Klees
Delft Institute for Earth-Oriented Space Research, Delft University of Technology
P.O. Box 5030, 2600 GA Delft, The Netherlands
hanssen@geo.tudelft.nl

Op 17 augustus 1999, 3 uur 's nachts locale tijd, werd de omgeving van Izmit, Turkije, getroffen door een zeer zware aardbeving: 7.5 op de schaal van Richter (KNMI) . De aardbeving was het gevolg van jarenlange spanningsopbouw rond de Noord-Anatolische breukzone, waar de Anatolische plaat en de Eurazische plaat elkaar raken.



Figuur 1: Radar intensiteitsbeeld. Dit beeld dient ter orientatie, en toont de Zwarte Zee in het noordoosten, de golf van Izmit in het westen en het meer van Sapanca in het centrum. Topografie is zichtbaar in het zuiden. Steden zoals Izmit hebben een heldere intensiteit. De ligging van de Noord Anatolische breuk is aangegeven met de dikke stippellijn.

Figuur 1 is het radar intensiteitsbeeld van de europese ERS-2 satelliet, opgenomen van 785 km hoogte. Helderheidsverschillen in dit beeld ontstaan doordat 'ruwe' gebieden meer energie terugkaatsen naar de satelliet dan 'gladde' gebieden. Duidelijk is te zien hoe de bebouwing rond Izmit sterk reflecteert, net als de kant van de bergen die naar de satelliet toegekeerd zijn. Watergebieden, zoals de golf van Izmit, zijn in de ogen van de radar gladder, en weerkaatsen minder energie terug naar de satelliet waardoor ze donkerder lijken. De stippellijn die horizontaal door het beeld loopt geeft ongeveer de positie van de Noord-Anatolische breuk aan.

Figuur 2 is het zogenaamde 'interferogram', berekend door twee radar opnames (van 13 augustus en 17 september) met elkaar te vergelijken. Met een kleurcode is in dit beeld aangegeven hoe de afstand van het terrein tot de satelliet is veranderd tussen de twee opnames. Wanneer de aarde tussen deze twee opnames hetzelfde zou zijn gebleven, zouden alle landgebieden een constante kleur moeten hebben. Tussen de twee opnames van dit beeld is de aarde echter sterk gedeformeerd als gevolg van de aardbeving op 17 augustus. Het patroon van de kleurveranderingen geeft geodeten en geofysici nauwkeurig aan welke deformaties er hebben plaatsgevonden. Net als bij het tellen van de jaarringen van een boom is het mogelijk de deformatie tussen twee punten in het beeld te berekenen door de kleurencycli te tellen.

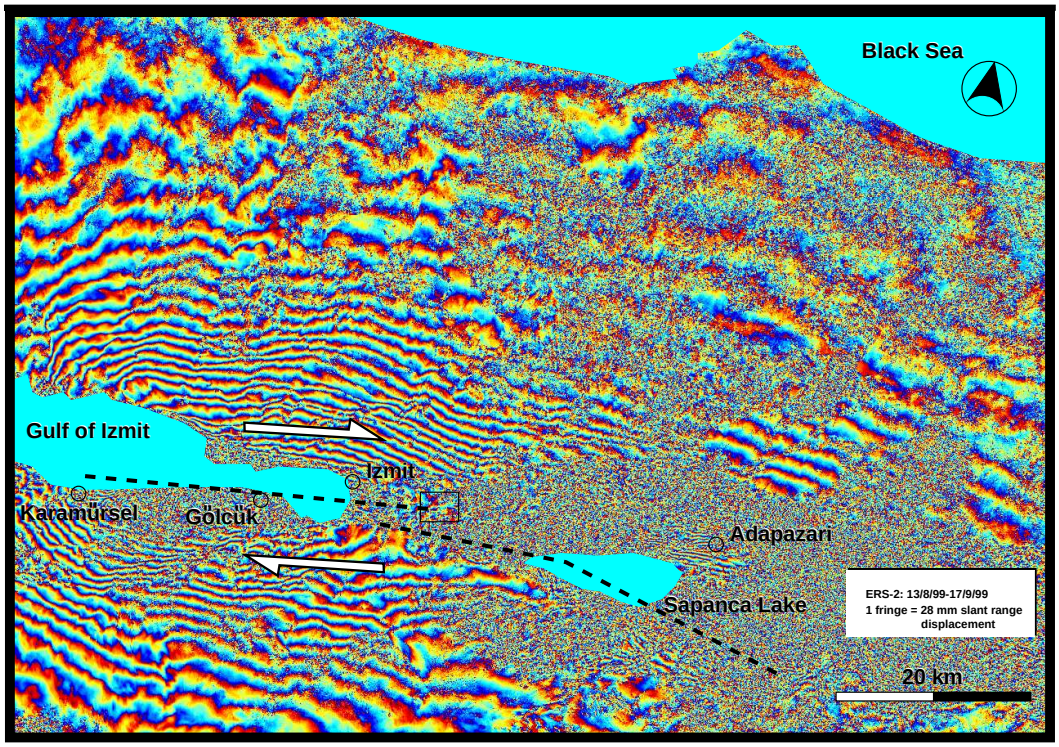
Interpretatie van het interferogram

Wat betekenen de kleurveranderingen in het interferogram? Als vuistregel geldt: punten op dezelfde kleurlijn hebben ondergaan dezelfde deformatie. Hierbij moet natuurlijk worden opgepast dat men bij de route tussen de twee punten continu op dezelfde kleur blijft! Zolang dit mogelijk is kan men dus vaststellen dat beide punten dezelfde deformatie hebben ondergaan.

De synthetische apertuur radar (SAR) van ERS-2 meet de fase, een getal tussen 0 en 360 graden, van de gereflecteerde puls. Elke cyclus van 360 graden komt overeen met de helft van de golflengte van de radar. Voor de 5.6 cm golflengte van ERS-2 betekent dat dus dat elke cyclus, aangegeven met een kleurencyclus in figuur 1b, overeenkomt met 2.8 cm verplaatsing: naar de radar toe of van de radar af. In dit geval geldt

- geel-blauw-rood (GBR): verplaatsing van de radar af, en
- geel-rood-blauw (GRB) verplaatsing naar de radar toe.

Aangezien het niet mogelijk is om absolute afstandsveranderingen te bepalen, kunnen we alleen relatief bepalen wat de afstandsverandering is tussen twee punten in het interferogram.

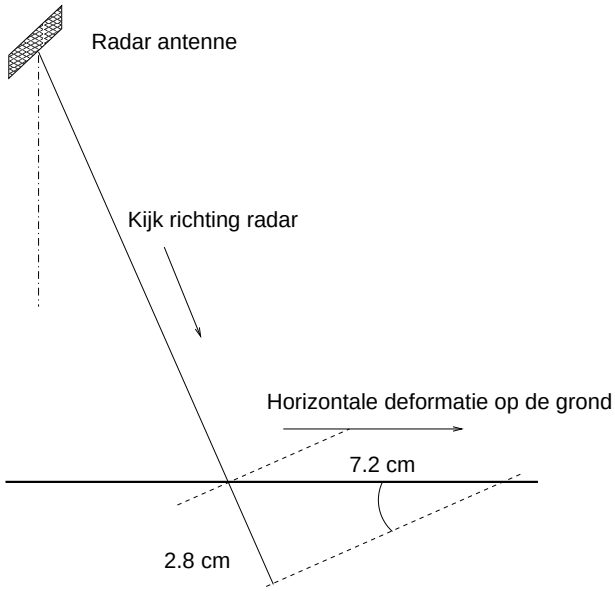


Figuur 2: Radar interferogram. Dit is het verschil in de afstand van het terrein tot de satelliet tussen twee radar opnames: 13-8-99 en 17-9-99. Deze afstandsverandering is uitgedrukt in kleurencycli, waarbij elke cyclus overeenkomt met 2.8 cm.

Voorbeeld

Wanneer we vanaf de kust van de Zwarte Zee het aantal kleurencycli tellen naar de noordkust van de Golf van Izmit, komen we op circa 27 cycli uit. Hieruit leiden we af dat de afstandsverandering naar de radar (27×2.8 cm), 75 cm is. Langs dit pad geteld (Noord-Zuid) dus, is de kleurvolgorde GBR, waaruit we afleiden dat de noordkust van de golf van Izmit zich, ten opzichte van de Zwarte Zee kust, 75 cm van de radar af heeft bewogen.

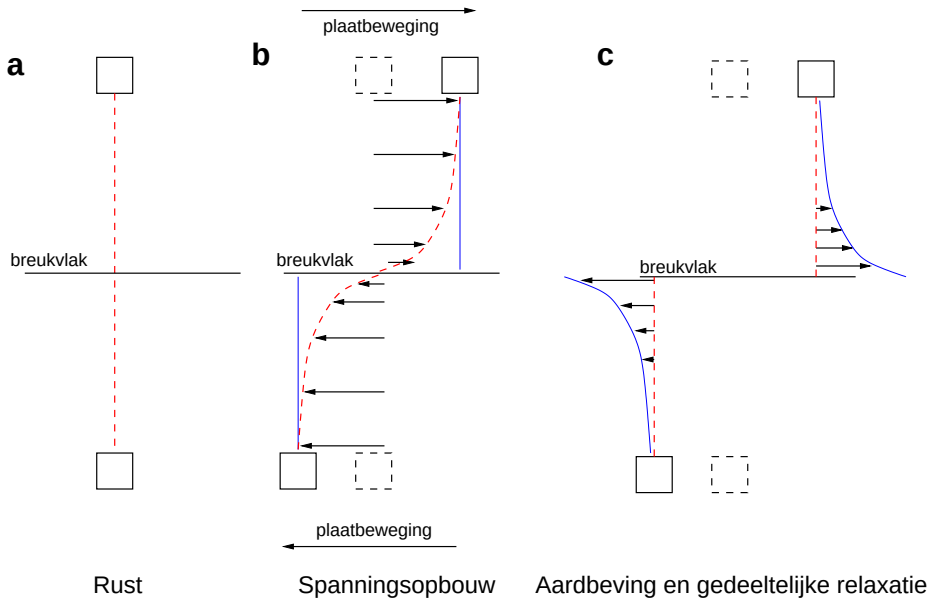
De berekende 75 cm is in dit geval de afgelegde afstand in de kijkrichting van de radar. Omdat we weten dat de verplaatsing voornamelijk horizontaal is, maken we gebruik van de projectie van de vector in de satellietrichting naar de richting op de grond, zie figuur 3. Dat komt neer op een extra vermenigvuldigingsfactor van 2.6. De eindconclusie is hierdoor dat de noordkust van de Golf van Izmit zich 1.95 van de satelliet heeft afbewogen, ten opzichte van de kust van de Zwarte Zee.



Figuur 3: De invalshoek van de radar, ongeveer 23 graden, zorgt ervoor dat de bewegingscomponent in de kijkrichting (2.8 cm per kleurencyclus) overeenkomt met 7.2 cm horizontaal.

Uit het interferogram blijkt direct dat vlakbij de breuklijn zelf de kleurencycli niet meer zo makkelijk te tellen zijn. Dit effect heeft twee oorzaken.

- Vlakbij de breuklijn liggen de kleurencycli te dicht bij elkaar; zo dicht dat ze bijna op elkaar liggen. Vanaf die plek kunnen we ze dus niet meer tellen.



Figuur 4: Schets van de deformatie ten gevolge van de plaatbeweging. In figuur a zijn de platen in rust, en kunnen we een rechte lijn trekken tussen de beide vierkantjes. Na verloop van tijd zijn beide platen ten opzichte van elkaar verschoven (figuur b): de vierkantjes zijn naar hun nieuwe positie verplaatst. Aangezien het breukvlak voldoende wrijving heeft, zullen de platen niet ten opzichte van elkaar verschuiven, maar elastisch deformeren. Er vindt dus spanningsopbouw plaats op het breukvlak. Ten tijde van de aardbeving is de spanning tussen de platen zo opgelopen dat ze op het breukvlak langs elkaar schieten. In figuur c, na de aardbeving, is dat aangegeven. De rode lijn, die in situatie b nog sterk verwrongen was, is nu min of meer terug in z'n oude positie. De blauwe lijn, echter, die in situatie b nog recht was, is nu dus sterk gekromd. In het interferogram zien we het gedrag van de blauwe lijn. Daar waar de blauwe lijn het meest gekromd is verwachten we dat de kleurencycli het dichtst op elkaar liggen.

- Om een goed interferogram te maken moet de structuur van het aardoppervlak zo min mogelijk veranderd zijn tussen de twee radaropnames. Het gebied mag wel bewegen, maar de interne structuur moet min of meer hetzelfde blijven. Het is duidelijk dat het verwoeste gebied rond Izmit erg sterk is veranderd door de aardbeving. Dat verklaart dan ook de ruis in het beeld op de plek van de breuklijn en de steden daar direct boven.

Door deze twee oorzaken 'missen' we dus het laatste gedeelte van de deformatie, juist op de plek waar deze het sterkst is. De boven bepaalde 1.95 m vanaf de Zwarte Zee tot aan de Golf van Izmit zal dus bij de breuk groter zijn. Uit veldmetingen is bepaald dat verschuivingen tussen de 2 en 3 meter hebben plaatsgevonden, zie ook onderstaande foto in figuur 5. Vlak bij de golf zijn zelfs verplaatsingen van 4–4.5 m waargenomen.

Analyse van het waargenomen patroon

In figuur 4 is geschetst hoe het waargenomen patroon van kleurencycli kan worden verklaard. Het breukvlak representeert de grens tussen de Eurazische plaat aan de noordkant en de Anatolische plaat in de zuidkant. De rode lijn geeft de kortste afstand tussen de twee vierkantjes aan. Door de plaatbeweging verplaatsen beide vierkantjes zich van elkaar af, parallel aan de breuklijn (figuur 4b). Doordat er langs de breuk geen verplaatsing plaatsvindt, wordt de rode lijn sterk verbogen. De blauwe lijn geeft op dat moment de kortste afstand naar het breukvlak aan. Vlak na de aardbeving, waarbij beide platen langs elkaar schieten ziet de situatie er uit als in figuur 4c. Doordat de opgebouwde spanning zich gedeeltelijk heeft kunnen ontladen is de rode lijn versprongen naar zijn nieuwe positie. De blauwe lijn geeft nu de hoeveelheid deformatie aan die tussen vlak voor en vlak na de beving heeft plaatsgevonden. In feite kan het deformatiepatroon gezien worden als het omgekeerde spanningspatroon voorafgaande aan de aardbeving; vergelijk de rode lijn in figuur 4b met de blauwe in figuur 4c.

Spanningsontlading?

Zolang in het interferogram de kleuren patronen evenwijdig lopen, geldt dat beide zijden van de breuklijn evenwijdig aan elkaar verschoven zijn. Op die plekken is de spanning die in de loop der jaren is opgebouwd gedeeltelijk ontladen. In het interferogram zien we echter dat de patronen niet overal evenwijdig aan de

breuk lopen: in het westen buigen de kleurlijnen af richting de Golf van Izmit, zowel aan de noord- als aan de zuidkant van de golf. Dit betekent dat beide zijden ten opzichte van elkaar niet verplaatst zijn. Met andere woorden, op die plek zijn de platen niet verschoven en is een groot gedeelte van de spanning nog steeds aanwezig! Dit betekent een groter risico bij toekomstige aardbevingen. Een juiste kennis van de locatie van gebieden waar de spanningsopbouw nog steeds doorzet is essentieel bij het verbeteren van risico analyses.

Figuur 5: 230 cm horizontale deformatie van bij station Tepetarla in de region tussen het meer van Sapanca en de golf van Izmit (bron: Esen Arpat, Kandilli observatory