

Zoutpilaren & satellietbeelden

*Bodembeweging bij Napels
scherper in kaart gebracht
door differentiële
interferogrammen*



DOOR LIZET KRUYFF

*Het gebied ten
noordwesten
van Napels is
één van de
actiefste
vulkanische
gebieden in
Europa.
Metingen geven
aan of de
bodem stijgt
of daalt, maar
tot nu toe was
het niet
mogelijk om
met een
tweedimensionaal
patroon direct
te meten en op
basis daarvan
een model te
ontwikkelen
over hoe dit
verschijnsel
precies
verloopt. Door
combinatie van
twee
satellietbeelden
van een*

Solfatara, de krater even boven Pozzuoli: kamperen op de rand, temidden van vulkanische activiteiten ligt een toeristencamping.

[Differentiële] sar-interferometrie

Synthetic Aperture Radar Interferometrie (insar) is een radarsysteem dat op een vliegtuig of satelliet bevestigd wordt en pulsen uitzendt in het microgolfbereik van het elektromagnetisch spectrum. De pulsen worden deels geabsorbeerd en deels gereflecteerd. Een deel van de verspreide straling wordt opgevangen door de antenne, die deze zwakke echo vertaalt in digitale gegevens en die vastlegt voor beeldverwerking in een later stadium. Voor elke echo registreert de antenne de corresponderende waarden van intensiteit en fase en de doorlooptijd die - omdat de puls zich met lichtsnelheid voortbeweegt - direct gerelateerd is aan de afstand van het door de antenne in beeld gebrachte gebied. De sleutel tot de interferometrie-techniek is het meten van de fase van het radarsignaal. De fase is direct gerelateerd aan de afstand die de puls aflegt, dus tussen de antennes in de lucht en op de grond. Wanneer de radar zich op twee verschillende tijden op dezelfde positie bevindt en het terrein heeft zich niet bewogen, dan is de afstand hetzelfde gebleven en het verschil van de fasewaarden van het signaal op de twee tijdstippen dus nul. Hebben zich in de tussentijd op het terrein

*bepaald gebied
- opgenomen op
twee
verschillende
tijdstippen,
via een
zogeheten
interferogram
- kan nu met
zeer hoge
nauwkeurigheid
worden
vastgesteld in
welke richting
en hoeveel de
bodem zich in
de tussentijd
bewogen heeft.*

Stefania Usai M.Sc., aio bij het Delft Institute for Earth-Oriented Space Research (DEOS), combineert voor haar promotie-onderzoek een reeks van deze interferogrammen zodat men een beeld krijgt van hoe de vervorming zich in de loop van de tijd heeft ontwikkeld. Op basis daarvan kunnen modellen worden gemaakt, die aantonen hoe het deformatieproces zich tot nu toe heeft voltrokken. Ook kan met enige mate van zekerheid worden aangegeven hoe deze beweging zich in de toekomst verder ontwikkelt.

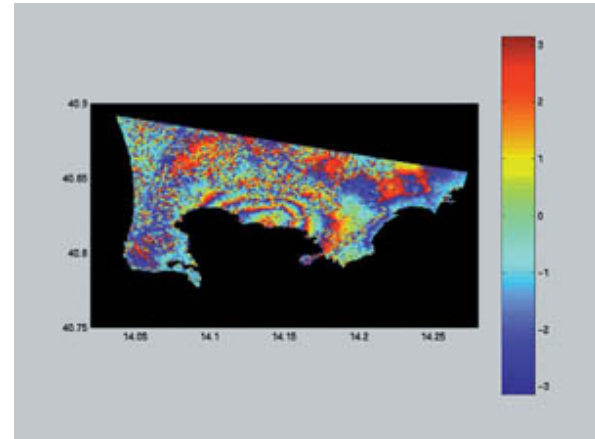
In Zuid-Italië, rondom Napels, wonen twee miljoen mensen in een gebied dat langzaam in elkaar zakt en vervolgens vrij plotseling weer stijgt. Al in de oudheid stond het gebied bekend om zijn vruchtbare grond. Het waren de Grieken die er een kolonie stichtten en de eerste wijnstokken aanplantten. Zij noemden het gebied 'De Flegreïsche Velden', naar de vele zwaveldampen die uit de grond omhoog kwamen ('phlegraios' is Grieks voor verbranden, verzengen).

Boven één van de kratermeren, het Lago Averno, waren de giftige wolken zo sterk dat vogels dood neervielen als zij over het meer vlogen. Hier was de toegang tot de onderwereld, meenden de toenamlige Griekse kolonisten. De vruchtbare grond en natuurlijke grondstoffen bleken een sterkere trekpleister dan geloof en bijgeloof. De streek groeide snel uit tot een dichtbevolkt en dichtbebouwd gebied.

Romeinse markt

De Zuid-Italiaanse bevolking heeft leren leven met het langzaam dalen en stijgen van de bodem in de pseudo-krater. De wetenschappelijke term voor dit verschijnsel is bradyseismiek. Het gebied is - op sommige plaatsen meer dan op andere - volop in beweging. In de jaren tachtig stulpten delen bijna twee meter omhoog, met alle gevolgen vandien. In het stadje Pozzuoli moesten oude wijken verlaten worden, terwijl even buiten de stad tussen 1982 en 1984 een nieuw strand ontstond. De recent aangelegde kustweg in Pozzuoli ligt beduidend hoger dan de vorige. Oude huizen werden verlaten, nieuwe snel gebouwd. Voor de inwoners een gebruikelijke gang van zaken. Nu zakken grote delen van het gebied er weer in, soms een paar centimeter per jaar. Het hevigst is de beweging in Pozzuoli zelf, dat al vanaf zijn stichting met deze problemen kampt. In de Romeinse tijd was Pozzuoli, dat toen 'Puteoli' heette,

wel bewegingen voorgedaan, dan is de afstand ten opzichte van de radar wél veranderd - hetgeen een faseverschil oplevert tussen de twee signalen dat dus niet nul is. Omdat de radargolflengte zich in het bereik van centimeters (5,6 cm voor ers) beweegt, veroorzaakt een afstandsverschil van 1 centimeter een faseverschil van enkele tientallen procenten van een fasecyclus (2π). Het faseverschil geeft dus de bodembeweging weer met nauwkeurigheden in een orde van centimeters of zelfs millimeters.



Een voorbeeld van een interferometrisch fase beeld, of interferogram, van de Flegreïsche Velden. Dit interferogram, gegenereerd op basis van ers data, laat de deformatie zien die in de periode maart 1997 tot maart 1999 plaatsvond. Iedere kleurcyclus (fringe) - bijvoorbeeld van rood naar rood - betekent 2,8 cm daling. Ongeveer drie fringes zijn op dit beeld te zien, kortom een deformatie van zo'n 8,4 centimeter. Het deformatiepatroon is radiaal en het centrum ligt in het stadje Pozzuoli.



Pozzuoli, bradyseismische bewegingen aan een mediterrane baai

een bloeiende handelsstad met een groot amfi-theater en veel buitenlandse handelsposten. De marktplaats, het Macellum, ligt nu eigenlijk onder de zeespiegel, en vele meters dieper dan de huidige omgeving. Ergens in de eerste eeuw van onze jaartelling moet de bodem zijn gaan dalen. De bevolking heeft de vloer een keer opgehoogd om de voeten droog te houden, maar uiteindelijk hebben de inwoners het moeten opgegeven. Veel later, in de negende eeuw, daalde de bodem nog verder tot ruim onder de zeespiegel. Archeologen vonden sporen van zeepokken en zoutvraat op de zuilen.

Inmiddels ligt de markt weer bijna op begaanbare grond, maar hoe lang nog is een vraag. Pozzuoli daalt weer - ondanks het rijzen van de jaren tachtig. Het risico van een ramp wordt nog eens versterkt door de hoge bevolkingsdichtheid, de nauwe straatjes en de dichte bebouwing, waardoor evacuatieplannen moeilijk op te stellen en uit te voeren zijn.

Netwerk van meetpunten

De beweging van de bodem wordt er nauwkeurig in de gaten gehouden.

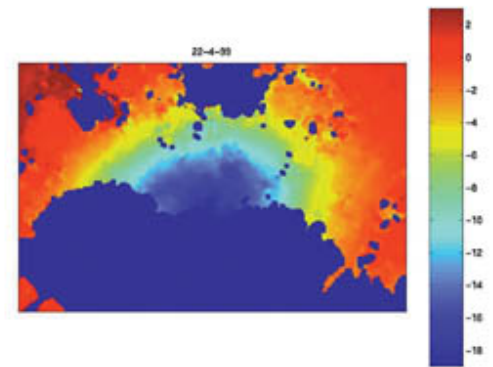
Al geruime tijd brengt het Osservatorio Vesuviano (Vesuvius-observatorium) de beweging in beeld door regelmatig de hoogte van de bodem op vaste punten te meten en die metingen met de voorgaande te vergelijken. Bij de afdeling Fysische Meetkundige en Ruimtegeodesie (fmr) van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de tu delft werkt promovenda Stefania Usai aan een proefschrift en de mogelijkheid om met SAR Interferometrie (insar) een tweedimensionaal deformatiemodel over een bepaalde tijd te genereren van de beweging van de bodem.

Bij deze aanpak draait het niet, zoals bij meer klassieke meetmethoden, uitsluitend om de beweging op een aantal vaste meetpunten. Het hoogtemeetkundig netwerk van de Campi Flegrei bestaat uit 300 vaste punten over in totaal ongeveer 120 kilometer, met een gemiddelde onderlinge afstand van 400 meter, in elf lussen. Die vormen de basis bij de klassieke topografische technieken. Vanwege de enorme verticale grondbeweging die tijdens de afgelopen crises zijn vastgelegd, herhalen de geodeten en geofysici de metingen ieder jaar; in de meeste wegzakkende delen van de Campi Flegrei zelfs iedere zes maanden. Dat is een kostbare en tijdrovende bezigheid.

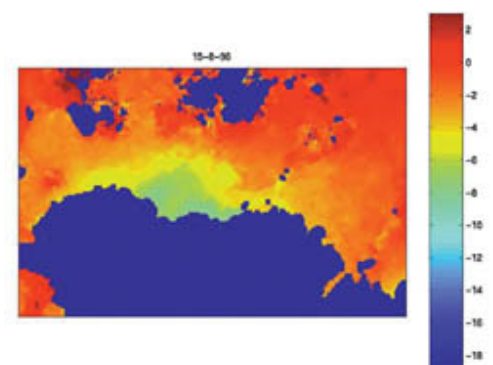
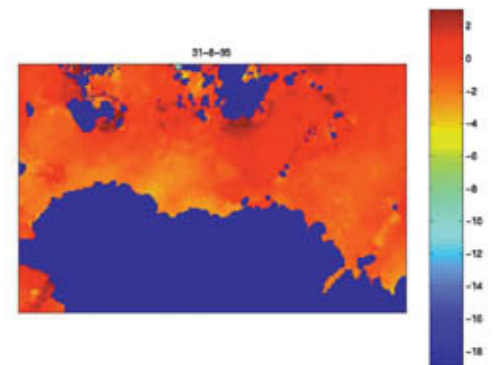
Satellietbeelden

Desondanks leveren al deze metingen niet voldoende exacte informatie op om het stijgen of dalen van de bodem op korte termijn te kunnen voorspellen. Zowel de klassieke technieken als een twee jaar geleden aangelegd gps-systeem bieden alleen informatie over wat er op de vaste punten plaatsvindt. Wat er in de tussenliggende gebieden gebeurt, is giswerk. Daarbij blijkt nu het onderzoekswerk van de Delfts-Italiaanse promovenda Usai mooi van pas te komen. insar is een geschikte methode om de deformatie van een heel gebied in kaart te brengen, waarbij ook de bodemdeformatie over een bepaalde periode aangetoond kan worden. De beelden zijn gemaakt door de satellieten ers 1 en ers 2 en ter beschikking gesteld door de esa (European Space Agency).

Er zijn wel bepaalde bewerkingsstappen nodig om de juiste hoeveelheid gegevens te krijgen. Zo moeten de satellietbeelden worden gekoppeld aan geografische coördinaten. Eventuele `ruis' moet worden geëlimineerd.



Door interferogrammen die op verschillende tijdstippen genomen zijn in serie te zetten, modelleert Stefania Usai M.Sc. het verloop van de bodembeweging. In de periode april 1995 tot en met april 1999 is de bodem in het centrum van Pozzuoli zo'n 18 centimeter gedaald. De afbeeldingen zijn cumulatief, steeds refererend aan het eerste meetpunt in april 1995.



Daarvoor wordt differentiële insar gebruikt: het meten van de faseverschillen van de tussenperiode tussen de twee metingen in. Stefania Usai: 'Er zijn twee oorzaken voor het ontstaan van faseverschillen. De satelliet meet in principe op dezelfde plaats hetzelfde punt op aarde, in het ideale geval is het faseverschil dan nul - tenzij het meetpunt is verschoven. Is dat in de tussentijd verzakt, dan heb je wel verschil in afstand en dat veroorzaakt het patroon van het interferogram.

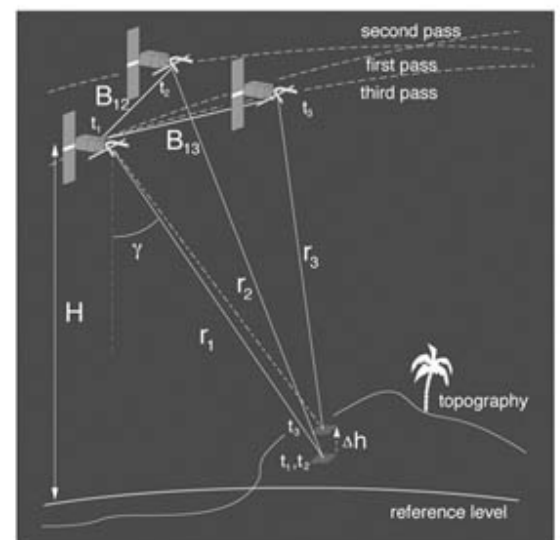
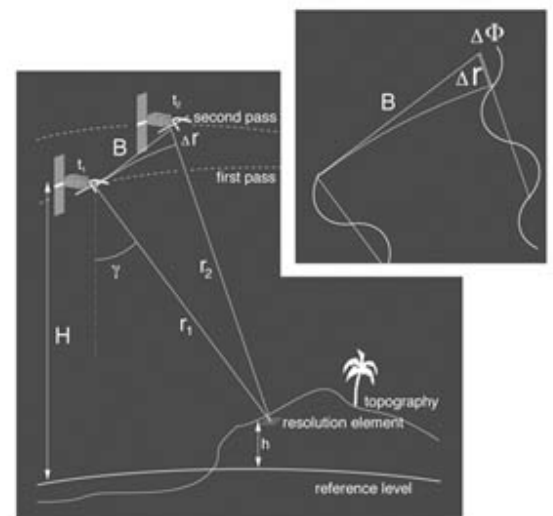
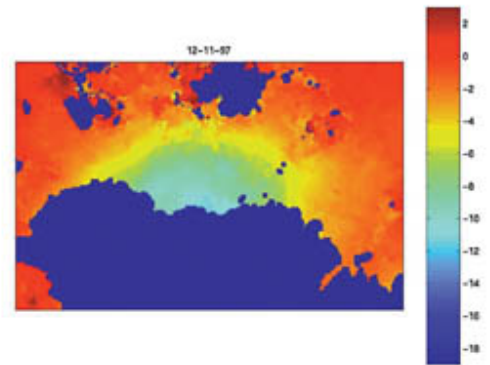
Er is nog een oorzaak voor een faseverschil. Je krijgt de radar natuurlijk zelden of nooit twee keer precies in dezelfde positie. De satelliet meet hetzelfde punt vanaf twee iets verschillende posities in de lucht. De afstand is dus ook iets anders. Er komt wel een interferogram tot stand, maar dat geeft de verschillende opnameposities aan en niet het verzakken van de grond. Je moet daarom oppassen voor het vermengen van deze effecten. Dit los ik op door er een ander interferogram naast te leggen en de verschillen weer af te trekken, als je zeker weet dat daar geen deformatie heeft plaatsgevonden. Dit is de differentiële methode. Heb je die toegepast, dan krijg je een deformatie-interferogram.'

Het gebied dat de uit Milaan afkomstige Delftse onderzoekster in Zuid-Italië bestudeert, beslaat 40 bij 30 kilometer. Het centrum van Pozzuoli zit daar bij, verder strekt het onderzoeksterrein zich uit tot de Posilippo-heuvel in Napels in het oosten en het kustplaatsje Baia in het westen. Landinwaarts loopt «Usais» gebied tot Solfatara en de kraters ten westen van Napels. De promovenda: 'Wanneer je twee opnamen die op verschillende momenten genomen zijn met elkaar vergelijkt, zie je een deformatie met een radiale symmetrie die precies dit gedeelte van de Campi Flegrei omvat. Opnamen uit verschillende jaren geven zowel de richting van de deformatie aan als de exacte mate waarin de verzakking in het gebied plaatsvindt. Duidelijk is dat deze streek vanaf 1995 gestaag aan het dalen is. In de periode april 1995 tot april 1999 heb ik een maximale daling gemeten van ongeveer 18 centimeter op het diepste punt, in het hartje van Pozzuoli.'

Kleurenbandjes

In de eerste fase van Usais onderzoek bestudeerde ze of het eigenlijk wel mogelijk was om met deze methode gebieden met hogere verticale bodemverplaatsingen te onderscheiden van gebieden die niet of weinig bewogen. Door de in tijd oplopende satellietbeelden met elkaar te combineren kan tot in detail de verandering worden waargenomen en met die informatie kunnen weer modellen worden ontwikkeld. Usai: 'Zoals verwacht is nu bewezen dat het gebied met de maximale verticale beweging het centrum van Pozzuoli is en dat de deformatie een halfrond patroon heeft. De dalende beweging neemt af naarmate de grenzen van de «waaier» worden bereikt. Het interferogram laat dit duidelijk zien; de kleurenbandjes geven steeds een deformatie van 2.8 centimeter aan.'

Usais opzet was gedurende een periode van vier jaar deze informatie te meten en te analyseren. Inmiddels kon de promovenda aantonen dat insar een betrouwbare methode is om de beweging van de oppervlakte te registreren en een model te ontwikkelen voor de Campi Flegrei, in zowel ruimte als tijd. Door haar onderzoekswerk komt er tevens actuele informatie beschikbaar, zodat de plaatselijke bevolking met toekomstige risico's rekening kan houden en plannen voor evacuatie kan opstellen.





De stad Pozzuoli ligt in de kern van de daling. Al sinds de Romeinse tijd kampt dit stadje met hevige bodembewegingen, daarvan getuigt de Romeinse markt (Macellum), die in de eerste eeuw onder de zeespiegel kwam te liggen en later nog vele meters verder de diepte in zakte.



Ontstaan van de Campi Flegrei

De Campi Flegrei vormen een caldera ten noordwesten van Napels. Een caldera is wat er overblijft na een zeer grote eruptie van een grote vulkaan. Bij een dergelijke uitbarsting wordt niet alleen de top van de vulkaankegel voor het grootste deel weggeblazen, maar er komt zo veel materiaal uit de magmahaard mee naar de oppervlakte dat naderhand grote verzakkingen in het centrum van een vulkaanlichaam ontstaan. Wat er nog over is van het centrale deel van de oude kegel zakt langs steile concentrische breuken weg in de diepte. Deze pseudo-krater heeft de naam caldera gekregen, naar de krater waar dit verschijnsel voor het eerst werd waargenomen: op de zeer vulkanische Canarische Eilanden, voor de kust van West-Afrika.

Op de bodem van een caldera vormen zich nieuwe vulkaantjes, die samen opnieuw een grote vulkaan kunnen gaan vormen waarna de geschiedenis zich - op zeer lange termijn - herhaalt. De Campi Flegrei in Zuid-Italië ontstonden na twee extreem krachtige explosieve erupties zo'n 37.000 en 12.000 jaar geleden. Tal van vulkaaneilandjes,

meren en kraters zijn in het landschap waar te nemen. Het magmatisch systeem van de caldera is nog steeds actief; de laatste grote uitbarsting vond plaats in 1538, waarbij een nieuwe berg ontstond. Volgens de annalen rees de grond toen in twee dagen tijd zes meter. Daarna zakte de bodem weer geleidelijk in tot 1970. Tussen 1970 en 1984 werd een maximum stijging van 3 meter gemeten. Ook nu nog is vulkanische activiteit waarneembaar, in de krater van Solfatara (letterlijk: zwavelland) die tussen 2500 en 1500 voor Christus gevormd werd. In de bodem van de vulkaan zijn barsten te zien, waar de modder bubbelt en dampen uit opstijgen. De Romeinen begonnen al met de exploitatie van de zwavel, de aluin en de kaoline. In de vorige eeuw zette de bevolking de modder en stoom voor heelkundige doeleinden in. Nu is het vooral een toeristische trekpleister, inclusief camping. Ook vinden er tal van wetenschappelijke onderzoeken plaats in Europees verband.

